

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de RELIZANE  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département :Génie des procédés



جامعة غليزان  
RELIZANE UNIVERSITY

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :

Génie chimique

Intitulé

**Etude des méthodes de decolmatage des membranes des stations  
de dessalement de l'eau de mer**

**Présenté par :**

Mlle : Habchaoui Lamia

Mlle : BanabdelkaderRomaissa

**Devant les membres de jury :**

MrAsliBoubkeur

MmeCherrak Rachida

MmeChrayet Fatima Zohra

MCA Président (U. Relizane)

MCB Encadrante (U. Relizane)

MAA examinatrice (U. Relizane)

Année universitaire : 2024/2025

# REMERCIEMENTS

Nous remercions tout d'abord **Dieu** le tout puissant de nous avoir accordé le courage, la volonté et la patience pour l'accomplissement de ce modeste travail.

Nous tenons à remercier tout particulièrement notre encadrante **Mme CHERRAK RACHIDA**, pour sa direction, ses orientations sa patience, sa disponibilité et surtout, ses conseils judicieux.

Nous remercions vivement **Mr Asli Boubkeur**, président du jury pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant d'évaluer notre travail, ainsi que pour ses remarques pertinentes et ses conseils éclairés.

Nos remerciements s'adressent également à **Mme Chrayet Fatima Zohra**, examinatrice pour l'attention qu'elle a portée à notre projet et pour la qualité de ses observations, qui ont contribué à enrichir notre réflexion.

Nous remercions également les employés du complexe KAHRAMA pour leur aide.

Nos remerciements vont aussi à l'ensemble d'enseignants de génie chimique pour leur attitude positive et encourageante envers nous tout au long de notre période d'étude, Et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

# *Dédicace*

Je dédie ce travail à ma mère, mon père et ma sœur et mon frère à qui ont suent m'encourager et m'aider dans mon travail, je leur souhaite beaucoup de bonheurs, d'amours et une bonne santé pour avoir donné sans compter et œuvré pour ma réussite, je vous aime.

Aussi, je dédie ce travail à mon grand-père et ma grand mère qui sont toujours dans mes cotée pour me soutenir et mon binôme, compagnon de route dans cette aventure universitaire

*Benabdelkader Romaiassa.*

# *Dédicace*

Je dédie ce travail à ma mère, mon père qui m'ont toujours  
encouragée, soutenue et crue en moi

Mes frères Youcef, Chemseedine, Younes qui ont suent m'encourager  
et m'aider dans mon travail, je leur souhaite beaucoup de bonheurs,  
d'amours et une bonne santé pour avoir donné sans compter et œuvré  
pour ma réussite.

Aussi mon binôme, compagnon de route dans cette aventure  
universitaire.

*Habchaoui Lamia.*

# SOMMAIRE

---

|   |          |
|---|----------|
| Remerciement.....   | i        |
| Dédicace.....   | ii       |
| Introduction générale.....  | 1        |
| <b>CHAPITRE I HISTORIQUE DE L'USINE KAHRAMA.....</b>  | <b>2</b> |
| I - Historique de la création de la société KAHRAMA : .....                                   | 3        |
| 1- Objet de l'usine :.....  | 4        |
| 2- Ensemble du système :.....   | 4        |
| 3 -Composants principaux :.....   | 5        |
| ▪ Centrale électrique : .....   | 5        |
| ▪ Système de dessalement :.....   | 6        |
| <b>CHAPITRE IILES PROCEDES DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER .....</b>                           | <b>7</b> |
| II.1-Introduction : .....   | 8        |
| II.2 Les caractéristiques de l'eau :.....   | 8        |
| ▪ L'eau de mer : .....  | 8        |
| ▪ Les eaux saumâtres : .....  | 8        |
| II.3 Le procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF) :..... | 9        |
| II.3.1 Principe de MSF : .....  | 9        |
| II.3.2 Composants du système de dessalement : .....   | 11       |
| ▪ Evaporateur :.....  | 11       |
| ▪ Réchauffeur de saumure : .....  | 11       |
| ▪ Dégazeur :.....   | 11       |
| ▪ Système de vide : .....   | 11       |
| ▪ Pompes : .....  | 12       |
| II.3.3 les avantages de Multi Stage Flash (MSF): .....  | 12       |
| II.4Le procédé d'osmose inverse : .....   | 12       |
| I.4.1 Le principe de l'osmose inverse :.....  | 13       |
| I.4.2 Les composant d'osmose inverse :.....   | 14       |
| 1) Récipients a pression et membrane: .....   | 14       |
| 5) Panneau de commande .....  | 15       |
| II.4.2. Objectifs de l'osmose inverse [11] : .....  | 16       |
| II.4.3 Les avantages d'osmose inverse : .....   | 16       |
| • Efficacité énergétique :.....   | 16       |
| • Installation modulaire et évolutive .....   | 16       |
| • Qualité de l'eau produite : .....   | 16       |
| • Coûts d'exploitation réduits : .....  | 16       |

|   |           |
|---|-----------|
| II.5 Le procédé de distillation multi effets :                                  | 16        |
| II.5.1 Le principe de MED :   | 18        |
| II.5.2 Les avantages de MED :   | 19        |
| II.6 Le procédé Électrodialyse (ED) :   | 20        |
| II.6.1 Principe de ED:  | 20        |
| II.6.2 Les avantages de ED :  | 21        |
| <b>CHAPITRE III Les techniques de traitement du calcaire et le colmatage ..</b> | <b>22</b> |
| III.1.Introduction :  | 23        |
| III.2Mécanisme de formation de calcaire :                                       | 23        |
| III.3 les techniques de prévention du calcaire :                                | 24        |
| 1) Prétraitement de l'eau d'alimentation  | 24        |
| 2) Injection d'antiscalants :   | 24        |
| 3) Chloration rapide de l'eau brute :   | 24        |
| 4) Contrôle du pH :   | 25        |
| 5) Surveillance continue  | 25        |
| III.4 Conséquence de colmatage calcaire :                                       | 25        |
| III.5 les techniques de traitement du calcaire :                                | 26        |
| III.5.1Système de nettoyage à billes :  | 26        |
| III.5.2 Système de nettoyage à l'acide :  | 26        |
| III.5.3 Système de nettoyage en place (OI) :                                    | 27        |
| III.6-Nettoyage acide et ses effets sur les membranes :                         | 28        |
| <b>Partie expérimentale</b>   | <b>29</b> |
| 1-Introduction :  | 30        |
| 2-Echantillonnage des dépôts calcaires :  | 30        |
| 3-Matériels :   | 31        |
| 3.1Les produits chimiques :   | 31        |
| 3.2 Matériels verrerie et équipements :   | 31        |
| 4- Protocole expérimental :   | 32        |
| 4.1 Préparation des échantillons :  | 32        |
| 4.2 Paramètres étudiés :  | 33        |
| 4.3 Préparation des solutions:  | 34        |
| Concentration des acides après dilution :                                       | 35        |
| 4.4 Etapes expérimentale :  | 36        |
| 5. Taux de dégradation :  | 38        |
| 6- Spectres Infrarouge des échantillons :                                       | 40        |
| Conclusion Générale   | 45        |

## **LISTE DES FIGURES**

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure 1:</b> Ensemble de système.....   | 5  |
| <b>Figure 2:</b> Principe de fonctionnement d'un système par détente successive (MSF) à 3 étages .....  | 11 |
| <b>Figure 3:</b> membrane d'osmose inverse [8].....   | 13 |
| <b>Figure 4:</b> principe d'osmose inverse .....  | 14 |
| <b>Figure 5:</b> Les composants d'osmose inverse.....   | 16 |
| <b>Figure 6:</b> Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED) .....  | 17 |
| <b>Figure 7:</b> Schéma de principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur.....  | 18 |
| <b>Figure 8:</b> Schéma du procédé de l'Electrodialyse. ....  | 21 |
| <b>Figure 9:</b> dépôts de calcaire.....  | 30 |
| <b>Figure 10:</b> préparation d'échantillon.....  | 33 |
| <b>Figure 11:</b> préparation d'acide citrique et NAOH.....   | 35 |
| <b>Figure 12:</b> les étapes expérimentales.....  | 37 |
| <b>Figure 13:</b> les spectres Infrarouge des échantillons A(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> diluée 10fois), B(H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> diluée 5fois), C(Acide citrique diluée 5fois), D(HCL diluée 5fois), E(Tartre brute), F(NaOH diluée 10fois) ..... | 42 |

## **LISTE DES TABLEAUX**

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau 1:</b> puissance d'électricité et la capacité de production du..... | 5  |
| <b>Tableau 2:</b> Classification des eaux selon la salinité[3]. .....          | 9  |
| <b>Tableau 3:</b> Liste des produits chimique .....                            | 31 |
| <b>Tableau 4:</b> Les concentrations des acides après dilution .....           | 35 |
| <b>Tableau 5 :</b> les masses après dégradation .....                          | 38 |
| <b>Tableau 6:</b> taux de dégradation .....                                    | 38 |

## Résumé

---

Le dessalement de l'eau de mer apparaît comme une solution incontournable face à la raréfaction de ressources en eau douce, notamment dans les régions arides. Cependant, l'efficacité des procédés de dessalement, notamment par osmose inverse, est largement limitée é par le colmatage des membranes, dû à l'accumulation de dépôts organiques, inorganiques et biologiques.

Le travail de recherche vise à explorer les mécanismes de colmatage au sein des unités de dessalement, ainsi que leurs effets sur les performances du système, et différentes stratégies de prévention et de traitement du colmatage ont pu être testées, allant de techniques de prétraitement, Ce travail de recherche montre l'intérêt d'une gestion intégrée du colmatage au sein des installations de dessalement afin de garantir la pérennité et la sécurité des approvisionnements en eau potable.

ان تحلية مياه البحر حلٌ أساسيٌّ في مواجهة ندرة موارد المياه العذبة، لاسيما في المناطق القاحلة. ومع ذلك، فإنَّ كفاءة عمليات التحلية، وخاصةً التناضح العكسي، محدودةٌ إلى حدٍّ كبيرٍ بسبب انسداد الأغشية، نتيجةً لتراكم الرواسب العضوية وغير العضوية والبيولوجية. يهدف البّحث إلى استكشاف آليات الانسداد داخل وحدات التحلية، وتأثيراتها على أداء النظام. وقد اختبرت استراتيجياتٍ مختلفةً لمنع الانسداد ومعالجته، بدءًا من تقنيات المعالجة المسبقة، وصولًا إلى إدارة الانسدادات المتكاملة داخل محطات التحلية لضمان استدامة إمدادات مياه الشرب وسلامتها.

Seawater desalination appears to be an essential solution in the face of the scarcity of freshwater resources, particularly in arid regions. However, the efficiency of desalination processes, particularly reverse osmosis, is largely limited by membrane clogging, due to the accumulation of organic, inorganic and biological deposits. The research aims to explore the clogging mechanisms within desalination units, as well as their effects on system performance. and different strategies for preventing and treating clogging were tested, ranging from pretreatment techniques, This research shows the interest of integrated clogging management within desalination plants in order to guarantee the sustainability and security of drinking water supplies.

### **Introduction générale**

Notre Planète a souffert ces dernières décennies de très importantes pollutions dues à l'émission de carbone eu égard à l'industrialisation à grande échelle, aux importantes nappes de pétrole versées par les cargos lors d'accidents ou tout simplement lors des vidanges et rinçages des cuves de pétroliers au large de la mer.

Le phénomène des gaz à effet de serre et les très importantes pollutions citées plus haut, impactent et dérèglent négativement la météorologie de notre Planète Terre.

Notre Pays n'a pas échappé à ces effets néfastes et souffre énormément de ce dérèglement de par le manque de pluviométrie plus particulièrement au Nord-Ouest du Pays.

L'eau est un liquide précieux parce qu'il est à l'origine de la vie. Sans eau, il n'y aurait pas de vie sur Terre. Elle est indispensable à l'Homme, à l'animal et à la plante.

Sachant que l'eau constitue 75 % de la surface de la Planète Terre, c'est la seule Planète à avoir ce liquide précieux.

Longtemps considérée comme une ressource inépuisable, pure et gratuite, l'eau potable est aujourd'hui de plus en plus rare, polluée et chère. Car Les besoins en eau de bonne qualité et en quantité abondante ont augmenté avec la croissance démographique et le développement industriel, particulièrement en Algérie qui est frappée par des sécheresses récurrentes, poussant notre gouvernement à trouvé des solutions durables.

Dans cette quête de l'eau, la recherche de la satisfaction des besoins en eau potable, est devenue vitale.

C'est à ce titre que le but de notre étude s'articule autour de trois chapitres.

- Le premier chapitre traitera de l'historique du complexe "Kahrama"
- Le second chapitre sera consacré à l'étude du système de procédé de dessalement de l'eau de mer
- Le troisième chapitre étudiera les techniques de traitement du calcaire et le colmatage

Les résultats présentés dans ce travail illustrent la capacité et l'efficacité des acides dans la dégradation des tartres on comparent avec d'autres acides et base à différentes concentrations.

***CHAPITRE I***  
***HISTORIQUE DE L'USINE***  
***KAHRAMA***

---

### I - Historique de la création de la société KAHRAMA :

Pour faire face à l'augmentation sans cesse croissante & rapide de la demande en eau, et à la sécheresse persistante depuis plus de deux décennies en Algérie, une décision historique a été prise par le Gouvernement Algérien pour choisir 'l'option Dessalement d'Eau de Mer' afin de régler définitivement le problème de disponibilité de l'eau.

Le Complexe KAHRAMA est justement inscrit dans l'ambitieux programme national de « Dessalement d'Eau de Mer », qui est composé de quinze projets.

Totalisant une capacité approximative de 2 500 000 m<sup>3</sup>/jour, ces projets placent l'Algérie, à l'horizon 2011 – 2012, parmi les pays ayant des capacités les plus importantes au monde. Le Complexe KAHRAMA étant le premier à avoir été réalisé, nous l'avons surnommé "Complexe Pionnier du Dessalement d'Eau de Mer en Algérie"

Le complexe Kahrama est situé dans la zone industrielle d'Arzew à proximité du pôle industriel de Béthioua qui est situé à 40 km de la ville d'Oran.

Le financement de ce projet a été assuré grâce à la coopération du Consortium Sonatrach/Sonelgaz (AEC) et une partie modeste de la Filiale de la Société Américaine Black&Vitch, basée en Afrique du Sud.

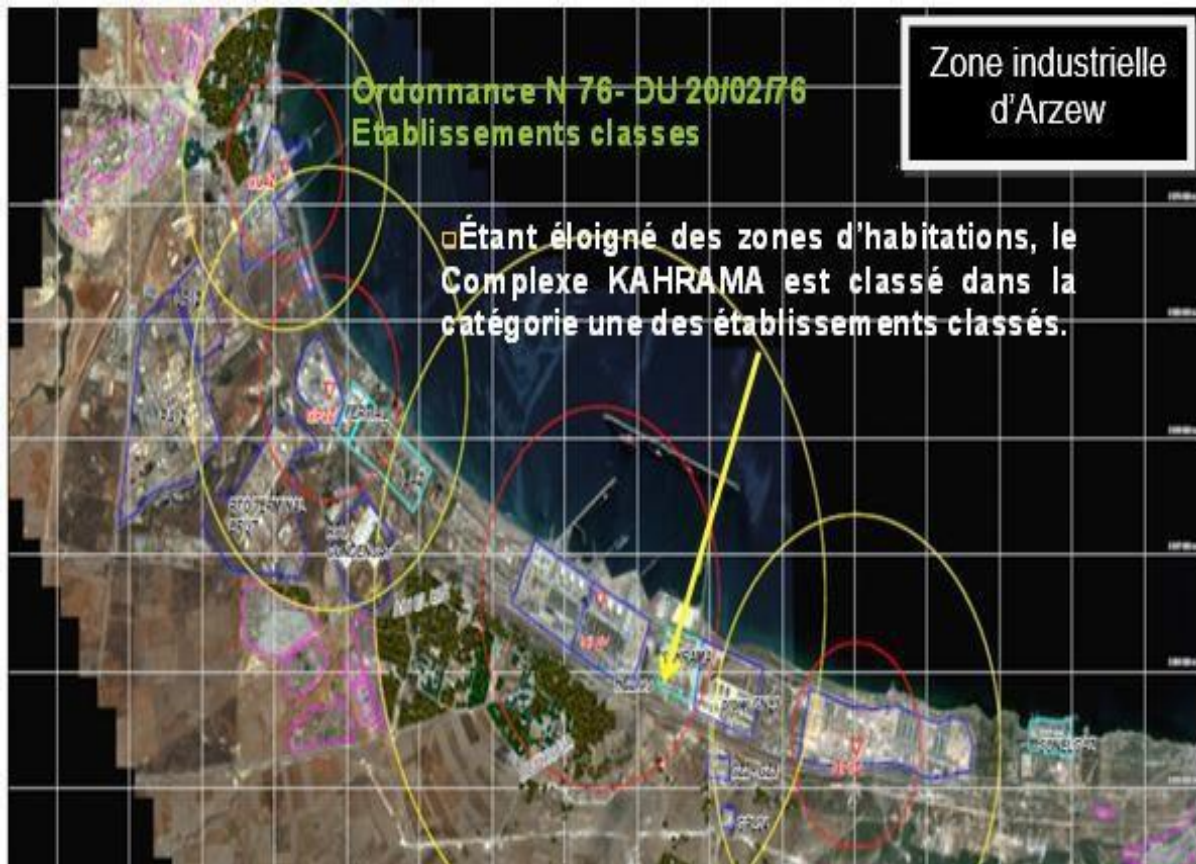
Kahrama est le seul complexe de dessalement d'eau de mer à l'échelle nationale qui utilise le cycle cogénération (MSF).

Il s'étend sur une superficie de 12,5 hectares et est délimité par le complexe GNL2/Z à l'Ouest et le complexe GNL3/Z à l'Est, la mer méditerranée au nord et la route nationale N°11 au Sud.

Cette station de dessalement a été mise en service le 19 mai 2005

Ce complexe est prévu pour produire de l'eau dessalée et de l'électricité pour être couplée sur le réseau national. L'eau potable nécessaire au besoin du quotidien de la population environnante est obtenue en redminéralisant l'eau dessalée.

L'électricité est produite à partir de trois turbogénérateurs dont l'un est en Stand-Bay. Les gaz d'échappement des deux turbines à gaz entraînant les deux générateurs sont utilisés comme énergie thermique. En effet, la température de ces gaz d'échappement est de l'ordre de 500 °C environ, suffisante pour le fonctionnement des trois chaudières installées.



### 1- Objet de l'usine :

L'usine de dessalement et de l'électricité d'Arzew est un complexe qui produit et fournit de l'eau potable et de l'électricité. Elle comprend également le système qui surveille, contrôle et traite les sous-produits tels que les eaux usées, la saumure condensée et les gaz d'échappement, etc. afin que l'environnement puisse être maintenu aux conditions acceptables.

### 2- Ensemble du système :(Fig. 1)

En général, les composantes de ce système sont regroupées en 03 catégories, à savoir :

- Le système de la Centrale électrique qui consiste en la production d'électricité,
- Le système de dessalement qui consiste en la production d'eau douce,
- Les autres systèmes annexes pour la fourniture des utilités, de vapeur d'eau, etc.

Etant donné que le procédé de dessalement requiert la fourniture de vapeur d'eau, cette dernière est produite par les chaudières (HRSG) dont l'énergie thermique est fournie grâce aux gaz d'échappement des turbines à gaz dont la température avoisine les 500°C

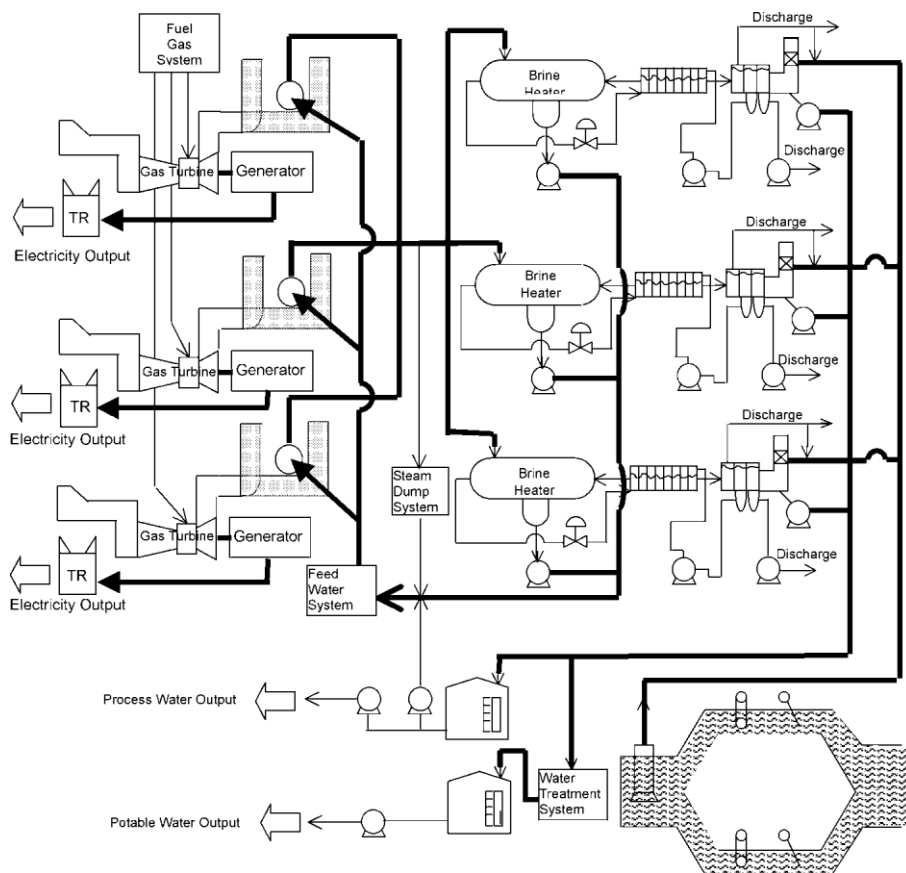


Figure 1: Ensemble de système

Le tableau ci-dessous nous donne les valeurs contractuelles installées de la production de la puissance d'électricité et la capacité de production du distillat.

| CentraleElectrique                  |                         |
|-------------------------------------|-------------------------|
| Puissance de sortie d'un générateur | 114,6MW/ Unité          |
| UrsinedeDessalement                 |                         |
| Capacité de production de distillat | 88.888m <sup>3</sup> /j |

Tableau 1:puissance d'électricité et la capacité de production du

### 3 -Composants principaux :

Voici la description des principaux composants de l'usine :

- Centrale électrique :
  - Générateur à turbine à gaz,
  - Système de gaz combustible,
  - Chaudière (HRSG),
  - Transformateur principal

- **Système de dessalement :**
  - Prise d'eau de mer,
  - Réchauffeur de saumure
  - Rejet de saumure,
  - Bacs de stockage d'eau dessalée
  - Système de déversement de vapeur
  - système d'alimentation d'eau potable

***CHAPITRE II***  
***LES PROCÉDES DE DESSALEMENT***  
***DE L'EAU DE MER***

---

### II.1-Introduction :

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: (Multi slash flash MSF et Multi effets distillation MED)
- Les procédés utilisant des membranes: l'osmose inverse et l'électrodialyse.

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

- une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière,
- un pré-traitement avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte,
- le procédé de dessalement lui-même,
- le post-traitement avec une éventuelle reminéralisation de l'eau produite.

A l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement.

### II.2 Les caractéristiques de l'eau :

- **L'eau de mer** :c'est l'eau salée des mers et des océans. Ceux-ci occupent un volume estimé à 1340 millions de km<sup>3</sup>, ce qui représente 97,208 % de la capacité des grands réservoirs d'eau à la surface de la Terre.

Ce volume n'inclut pas les eaux souterraines (aquifères), dont 85 % des capacités sont plus ou moins salées. L'eau de mer contient environ 35 g / L jusqu'à 40 g / L de sel[2].

- **Les eaux saumâtres** :on appelle généralement eau saumâtre une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. En fait, la plupart des eaux saumâtres ont une salinité comprise entre 1 et 10 g / L. Elles se présentent soit, sous forme d'eaux de surface, soit sous forme souterraines. Les différentes teneurs en ions (Mg, Ca, F,...) peuvent être très variées selon l'origine de l'eau. La quantité de sel à éliminer est variable selon leur toxicité éventuelle[3].

## Chapitre II

---

Lorsqu'on classe les eaux en fonction des quantités de matières dissoutes qu'elles contiennent, on obtient les données consignées au **tableau 2**.

| Type d'eau            | Salinité (mg / L) |
|-----------------------|-------------------|
| Eaudouce              | < 500             |
| Eaulégèmentsaumâtre   | 1 000 – 5 000     |
| Eaumodérémentsaumâtre | 5 000 – 15 000    |
| Eautrèssaumâtre       | 15 000 - 35000    |
| Eau de mer            | 35000 – 42 000    |

**Tableau 2:Classification des eaux selon la salinité[3].**

La distinction entre les types d'eau repose sur la concentration globale en sels ; d'après l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé), une eau est considérée comme potable si sa salinité totale est comprise entre 0.1 et 1g/L. La salinité de l'eau produite pour la consommation se situe en général autour de 0,4 g / L. Pour une utilisation industrielle en revanche, une eau de salinité comprise entre 20 à 50 g /L peut être acceptée [4].

### **II.3 Le procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF) :**

Parmi les méthodes de dessalement, la technique de flash multi-étages (MSF) a été développée dans les années 1950. Cette technique repose sur la distillation thermique, qui consiste en des chambres multi-étages où chaque chambre acquiert une pression inférieure à la précédente grâce à un éjecteur à vapeur.

MSF a longtemps dominé le marché avant le développement de l'osmose inverse. Cependant, il reste la deuxième technologie de dessalement la plus utilisée[5].

#### **II.3.1 Principe de 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 détentes 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 dévésiculeur 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[5].

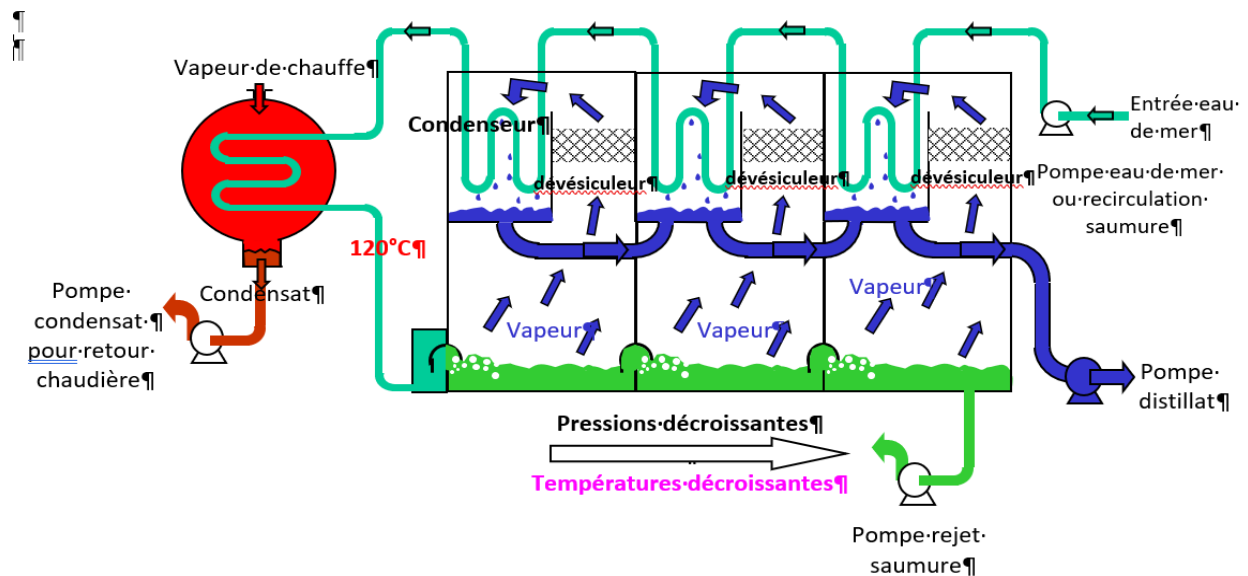


Figure 2: Principe de fonctionnement d'un système par détentes successives (MSF) à 3 étages

### II.3.2 Composants du système de dessalement :

#### ▪ **Évaporateur :**

L'évaporateur est construit comme échangeur de chaleur horizontal à calandre et faisceau tubulaire en une seule passe avec la vapeur se condensant au côté calandre et la saumure se véhiculant à l'intérieur du faisceau tubulaire

Les premiers 14 étages constituent la section de récupération de chaleur (HRC), tandis que les derniers 03 étages constituent la section de rejet de chaleur (HRJ). La boîte d'eau en avant et en arrière de chaque étage de l'évaporateur dirige l'écoulement vers le faisceau tubulaire.

#### ▪ **Réchauffeur de saumure :**

Le réchauffeur de saumure est prévu pour réchauffer la saumure recyclée. C'est un échangeur de chaleur horizontal à calandre et faisceau tubulaire en une seule passe avec la vapeur se condensant du côté calandre et la saumure se véhiculant à l'intérieur du faisceau tubulaire.

#### ▪ **Dégazeur :**

Le dégazeur enlève l'air dissous de l'eau d'appoint avant que ce dernier entre dans l'évaporateur ; Le dégazeur minimise la possibilité de corrosion des composantes de l'évaporateur, surtout la calandre d'évaporateur, en dégazant la teneur en oxygène dans l'eau d'appoint.

#### ▪ **Système de vide :**

Le système de vide est utilisé pour maintenir le système évaporateur aux conditions de vide en aspirant les gaz non-condensables générés de l'eau d'appoint ou

de la saumure. Le système de vide aspire également l'air fuit dans le système évaporateur des environs atmosphériques.

Le système de vide se compose de 02 éjecteurs de vapeur d'eau, du pré-condenseur, du condenseur de premier étage et du condenseur de second étage. L'éjecteur de vapeur hogging est utilisé pour évacuer le système évaporateur durant le démarrage.

### ▪ Pompes :

Les pompes jouent un rôle majeur dans l'usine de dessalement. Les pompes suivantes sont installées dans chaque unité de dessalement[1].

### II.3.2 les avantages de Multi Stage Flash (MSF):

- **Technologie éprouvée et fiable** : Utilisée depuis des décennies, la MSF est reconnue pour sa robustesse et sa fiabilité, notamment dans les régions du Golfe et en Afrique du Nord.
- **Adaptée aux grandes capacités**: Idéale pour les installations industrielles de grande envergure, capable de produire d'importants volumes d'eau douce.
- **Haute qualité de l'eau produite**: Élimine efficacement la quasi-totalité des sels dissous, produisant une eau douce de haute qualité.
- **Utilisation de chaleur résiduelle** : Peut être couplée à des centrales électriques pour exploiter la chaleur résiduelle, améliorant ainsi l'efficacité énergétique globale[6].

### II.4Le procédé d'osmose inverse :

L'osmose inverse est un procédé de purification et cela par une séparation de l'eau de ses sels dissous par un système de filtrage très fin qui est une membrane semi-perméable sous l'action de la pression.

Une membrane semi- perméable est une membrane permettant certains transferts de matière entre deux milieux qu'elle sépare, en favorisant certains par rapport à d'autres.

Ce procédé fonctionne à température ambiante. C'est à dire il va permettre de filtrer tous les particules dissoute ou en suspension dans l'eau.

L'écoulement s'effectue en continu tangentiellement à la membrane. Une partie de la solution à traiter se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes[7] :

- Le perméat qui passe à travers la membrane.
- concentrât ou rétentat qui ne passe pas à travers la membrane et qui contient les molécules ou particules retenues par la membrane.

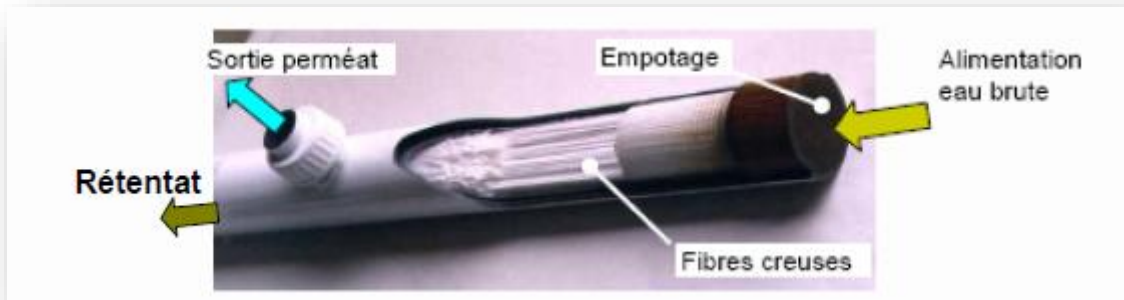


Figure 3:membrane d'osmose inverse [8]

### I.4.1 Le principe de l'osmose inverse :

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si on considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes, l'osmose se traduit par un flux d'eau dirigée de la solution diluée vers la solution concentrée.

Si on applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Avec une pression suffisamment forte, le flux d'eau va même s'annuler: cette pression est nommée la pression osmotique (en faisant l'hypothèse que la solution diluée est de l'eau pure).

Si on dépasse la valeur de la pression osmotique, on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique: c'est le phénomène d'osmose inverse[9].

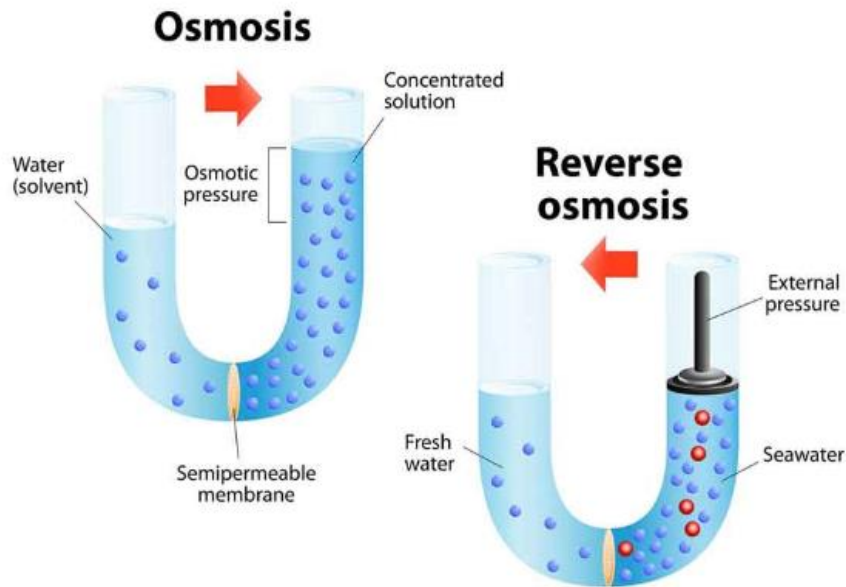


Figure 4: principe d'osmose inverse

### I.4.2 Les composant d'osmose inverse :

#### 1) Récipients a pression et membrane:

De toute évidence, un système d'osmose inverse n'irait pas très loin sans les éléments membranaires. Les protéines qui composent les éléments de la membrane varient en fonction du type d'eau absorbée et de la clarté finale. Il existe des éléments membranaires pour l'eau saumâtre, l'eau de mer, la désinfection de qualité hospitalière et des membranes conçues pour éliminer des contaminants spécifiques, pour n'en nommer que quelques-uns. S'il y a un besoin de traitement de l'eau, vous pouvez être sûr qu'il y a certainement un élément de membrane pour le travail. La taille de la tâche (municipale, commerciale ou industrielle) déterminera la taille et le nombre de membranes d'osmose inverse dans un système. Il peut y avoir n'importe où d'une seule membrane de deux pouces et demi (comme dans un système d'eau à osmose inverse sous évier) à des centaines de membranes de huit pouces travaillant toutes ensemble (une usine d'osmose inverse typique).

#### 2) Skid d'osmose inverse:

La meilleure façon de rendre votre système d'osmose inverse aussi durable que possible consiste à utiliser un cadre en acier au carbone enduit de poudre sur lequel monter tous vos composants. Il est résistant aux éléments, conçu pour les fortes vibrations des pompes haute pression et se monte au sol pour garantir sa durée de vie.

#### 3) Filtre à cartouche:

La plupart des systèmes d'eau par osmose inverse sont livrés avec un filtre à cartouche pour s'assurer qu'aucune particule suffisamment grosse pour endommager les membranes ne se trouve à proximité. Cette cartouche est généralement un filtre en polypropylène filé de cinq microns, mais peut varier sur demande. La cartouche est livrée dans un boîtier durable qui peut supporter la pression de l'alimentation principale ou des pompes de surpression.

#### **4) Pompe haute pression à osmose inverse :**

Sans pompe de haute qualité, le taux de rejet d'un système d'osmose inverse n'est pas viable dans la plupart des environnements commerciaux ou industriels. Il est essentiel pour le système de s'assurer que la pompe est adaptée à la quantité et à la taille de la membrane de manière appropriée. Habituellement, plus la puissance de la pompe d'admission est élevée, meilleurs sont les taux de rejet et de récupération du perméat.

#### **5) Panneau de commande :**

Enfin, le système d'osmose inverse doit être contrôlé par un opérateur humain. Chez Pure Aqua, nous utilisons des automates programmables avancés ou un microprocesseur à semi-conducteurs en fonction du degré d'avancement des commandes. Les commandes peuvent également être utilisées pour gérer plusieurs systèmes simultanément, ce qui en fait une usine de production d'eau pour un seul homme.

Un système d'osmose inverse peut avoir un certain nombre d'autres composants intégrés ou intégrés en tant que composants supplémentaires. Le skid entier peut être intégré dans un système conteneurisé, par exemple, de sorte que votre système de dessalement par RO soit toujours en mouvement. Il existe un certain nombre de patins supplémentaires qui peuvent également être fixés à un système RO, pour des tâches telles que le nettoyage de la membrane, le prétraitement, le dosage de produits chimiques et un certain nombre d'autres tâches si nécessaire[10].

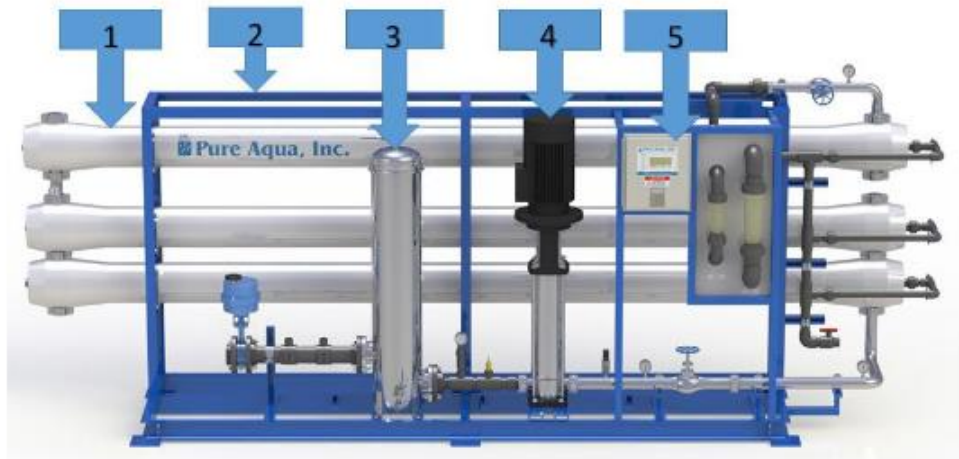


Figure 5: Les composants d'osmose inverse

### II.4.2. Objectifs de l'osmose inverse [11] :

L'osmose inverse utilise des membranes denses qui laissent passer le solvant (l'eau) et arrêtent tous les sels. Cette technique est utilisée pour:

- Le dessalement des eaux de mer ;
- Le dessalement des eaux saumâtres ;
- La production d'eau ultra pure ;
- La concentration de solutions (concentration de jus de fruits par exemple) ;

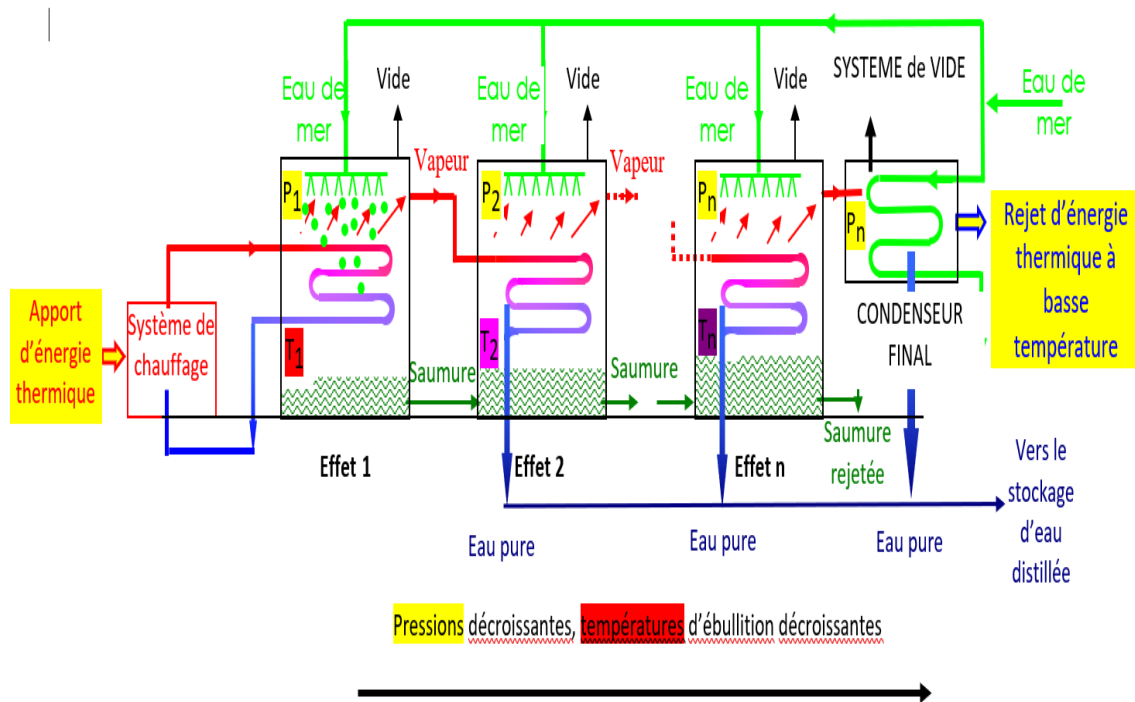
### II.4.3 Les avantages d'osmose inverse :

- **Efficacité énergétique** : Consomme généralement moins d'énergie que les procédés thermiques, surtout avec des systèmes de récupération d'énergie.
- **Installation modulaire et évolutive** : Facile à adapter à différentes capacités, des petites unités domestiques aux grandes installations industrielles.
- **Qualité de l'eau produite** : Peut éliminer jusqu'à 99,7 % des sels et impuretés, produisant une eau de haute pureté.
- **Coûts d'exploitation réduits** : Grâce à l'amélioration des membranes et des systèmes

### II.5 Le procédé de distillation multi effets :

- Une unité de dessalement multi-effets (MED) est un évaporateur où l'eau de mer est évaporée en une ou plusieurs étapes (3 jusqu'à 14) à basse température ( $< 70\text{ °C}$ ) afin de produire de l'eau distillée propre.

Le procédé MED est conçu pour produire de l'eau distillée à partir de vapeur ou de chaleur résiduelle issue de la production d'électricité ou de procédés chimiques, et/ou pour produire de l'eau potable



**Figure 6: Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED)**

- Ce schéma représente une unité de distillation à effets multiples composée de 3 cellules
- Dans la dernière cellule, la vapeur produite est condensée sur un échangeur de chaleur à tubes et calandre conventionnel (condenseur de distillat) refroidi par de l'eau de mer.
- À la sortie du condenseur, une partie de l'eau de mer réchauffée est utilisée comme appoint de l'unité, et une partie est rejetée à la mer. La saumure et le distillat sont collectés de cellule en cellule jusqu'à la dernière d'où ils sont extraits par des pompes centrifuges.
- L'efficacité thermique d'une unité est quantifiée par le rapport gain/sortie (GOR) défini comme la quantité de distillat produite par unité de vapeur de chauffage utilisée [5].

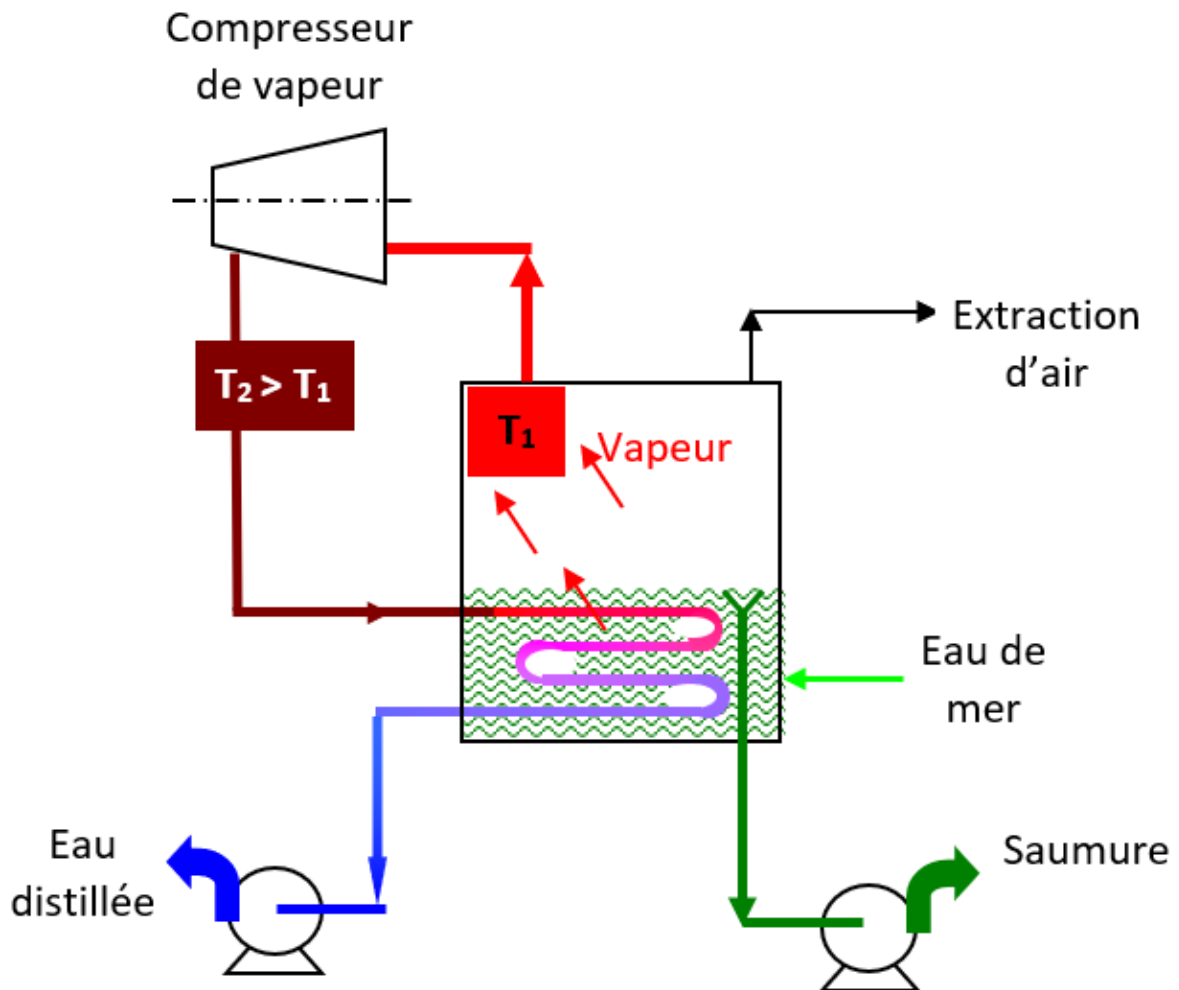


Figure 7: Schéma de principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur

### II.5.1 Le principe de MED :

Un évaporateur MED est constitué de plusieurs cellules (ou effets) consécutives maintenues à des niveaux de pression (et de température) décroissants, de la première cellule (chaude) à la dernière (froide). Chaque cellule est principalement constituée d'un faisceau de tubes horizontaux. Le haut du faisceau est arrosé d'eau de mer d'appoint, qui s'écoule ensuite de tube en tube par gravité.

De la vapeur de chauffage est introduite à l'intérieur des tubes. Comme les tubes sont refroidis extérieurement par un flux d'appoint, la vapeur se condense en distillat (eau douce) à l'intérieur des tubes. Simultanément, l'eau de mer se réchauffe et s'évapore partiellement en récupérant la chaleur de condensation (chaleur latente). Du fait de l'évaporation, l'eau de mer se concentre légèrement en descendant dans le faisceau et forme de la saumure au fond de la

cellule. La vapeur produite par l'évaporation de l'eau de mer est à une température inférieure à celle de la vapeur de chauffage. Elle peut néanmoins servir de fluide caloporteur pour l'effet suivant, où le processus est répété. La diminution de pression d'une cellule à l'autre permet à la saumure et au distillat d'être aspirés vers la cellule suivante, où ils se vaporisent et libèrent des quantités supplémentaires de vapeur à plus basse pression. Cette vapeur supplémentaire se condense en distillat dans la cellule suivante.

Ce processus est répété en une série d'effets (Distillation à Effets Multiples) (voir schéma avec 3 effets). Dans la dernière cellule, la vapeur produite se condense sur un échangeur de chaleur tubulaire classique. Cet échangeur, appelé « condenseur de distillat », est refroidi par l'eau de mer. À la sortie de ce condenseur, une partie de l'eau de mer réchauffée sert d'appoint à l'unité, l'autre partie étant rejetée à la mer. La saumure et le distillat sont collectés d'une cellule à l'autre jusqu'à la dernière, d'où ils sont extraits par des pompes centrifuges[5].

### II.5.2 Les avantages de MED :

- Consommation électrique très faible (moins de  $1,0 \text{ kWh/m}^3$ ) par rapport à d'autres procédés thermiques tels que le Multi Stage Flash (MSF) ou les procédés membranaires (osmose inverse)
- Fonctionner à basse température ( $< 70^\circ\text{C}$ ) et à faible concentration ( $< 1,5$ ) pour éviter la corrosion et l'entartrage
- Produire régulièrement un distillat de haute pureté
- Ils ne nécessitent pas de prétraitement complexe de l'eau de mer et sont tolérants aux variations des conditions de l'eau de mer
- Ils sont très fiables et simples à utiliser
- Réduisez les coûts des travaux de génie civil grâce à une empreinte réduite
- Sont simples à installer avec des unités emballées montées sur des patins et livrées prêtes à l'emploi, après une installation facile
- Avoir un faible coût de maintenance (pas de pièces rotatives sauf les pompes basse pression)
- Fonctionne 24 heures sur 24 avec une supervision minimale
- Idéal pour le couplage avec les centrales électriques, la vapeur peut être utilisée efficacement à une pression aussi basse que  $0,35 \text{ bar abs}$  ou moins
- Adaptable à toutes les sources de chaleur, y compris l'eau chaude
- Permettent des rendements thermiques très élevés et des économies sur les coûts de combustible
- Portée jusqu'à  $15 \text{ MIGD}$  ( $68\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$ ) par unité.

### II.6 Le procédé Électrodialyse (ED) :

Développés dans les années 60, les procédés d'électro-membrane sont des technologies qui appliquent un potentiel électrique comme force motrice des ions. Ce processus se démarque des autres. Jusqu'à présent, l'eau était mise en mouvement sous haute pression pour retenir les particules de sels sur un filtre. Ici, ce sont les sels ioniques qui sont mis en mouvement par l'action d'un courant continu. Ces procédés électro-membranaires constituent un groupe de plus en plus important de méthodes de séparation des composants chargés en solution (désalinisation, désacidification, déminéralisation).

En effet, le fonctionnement de l'ED est basé sur des membranes échangeuses d'ions qui permettent une récupération élevée de l'eau. Il ne nécessite pas de changement de phase, de réaction ou de produits chimiques. Ces avantages sont bénéfiques pour l'environnement, sans recours aux combustibles fossiles ni aux détergents chimiques [11].

La méthode d'électrodialyse est un processus piloté par la tension électrique. Initialement utilisé comme un processus de dessalement de l'eau de mer, il est maintenant également utilisé pour le processus de dessalement de l'eau saumâtre.

#### II.6.1 Principe de ED:

L'ED emploie des membranes échangeuses d'ions qui sont semi perméables aux ions, selon leur charge. Des membranes cationiques (perméables aux cations, notées K sur la figure ci-dessus) et des membranes anioniques (perméables aux anions, notées A) sont placées alternativement entre deux électrodes. Les électrodes attirent les ions de charges opposées à travers les membranes. Ainsi, les ions vont être séparés et retenus entre deux membranes, permettant de récupérer une eau d'ionisée d'un côté et un concentré d'ions de l'autre.

Les membranes employées bénéficient d'une longévité plus importante que le système d'osmose inverse (jusqu'à 8 fois plus longue [13]). Outre leur haute résistance chimique et mécanique, ces unités de dessalement utilisent un système de détartrage consistant à inverser la polarité des électrodes pour retirer les ions fixés aux membranes. Ainsi, les coûts de maintenance sont très réduits [14]. Les membranes cationiques contiennent dans leur matrice polymère des groupes échangeurs d'ions acides qui ont une charge électrique négative (R-SO<sub>3</sub><sup>-</sup>, R-COO<sup>-</sup>). Cela permet le libre passage des particules à charge positive. Le passage des particules chargées négativement est toutefois toujours possible, mais est considérablement réduit. Inversement, les membranes anioniques contiennent dans leur matrice des groupes basiques échangeurs de cations (R-NR<sub>3</sub><sup>+</sup>, avec R un groupe alkyle).

Les particules négatives peuvent la traverser mais les particules positives sont stoppées. Toutefois, la concentration en sel de l'eau nuance fortement les résultats de production de l'électrodialyse. L'intensité de courant à appliquer pour la mobilité des ions augmente proportionnellement à la salinité. Pour une tension de fonctionnement de 500 V, une concentration initiale de 2,5g/l requiert 2,6 kWh/m<sup>3</sup>, 3,9 kWh/m<sup>3</sup> pour 3,5 g/l et 5,5 kWh/m<sup>3</sup> pour 5 g/l[15]. Ainsi ce procédé est particulièrement efficace et adapté pour le dessalement des eaux saumâtres, peu concentrées. Au-delà de 5 g/l, le système d'osmose inverse est plus pertinent sur les plans énergétiques et économiques.

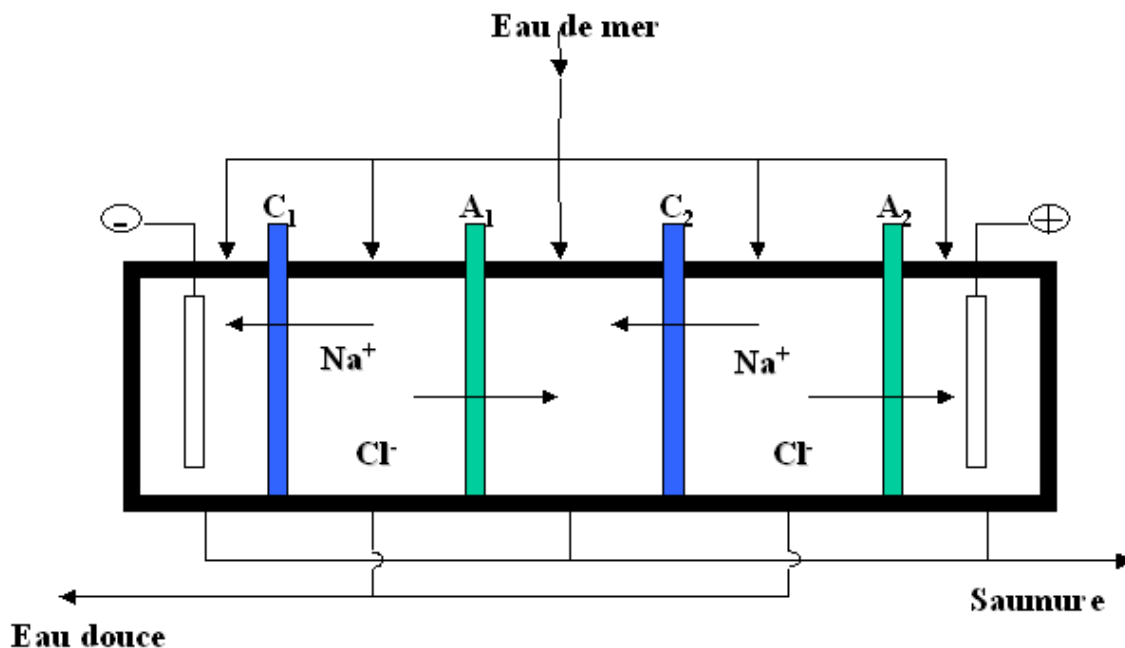


Figure 8: Schéma du procédé de l'Electrodialyse.

### II.6.2 Les avantages'ED :

- as besoin de haute pression ni de changement de phase
- Consommation d'énergie modérée (surtout pour des eaux faiblement salines)
- Processus réversible et contrôlable
- Peu d'utilisation de produits chimiques
- Écologique et adapté au traitement d'eaux industrielles ou légèrement salées

***Chapitre III***  
***Les techniques de traitement du calcaire***  
***et le colmatage***

---

### **III.1.Introduction :**

L'un des problèmes communs dans les installations de dessalement de l'eau de mer est la formation de dépôts minéraux, notamment du carbonate de calcium, connu sous le nom de tartre qui affecte négativement l'efficacité des équipements. Les dépôts de tartre se produisent sous l'influence de certaines conditions physico-chimiques, telles que la température, le pH et la concentration ionique, qui conduisent au processus de précipitation des sels peu solubles. Dans les procédures thermiques, il est observé sur les surfaces d'échange thermique dans MSF et MED et dans le système RO sur les membranes. Cela conduit au colmatage des surfaces[16].

L'objectif de ce chapitre est d'exposer les diverses techniques de traitement existantes, d'expliquer les processus menant à la création de calcaire et d'étudier l'impact du colmatage sur les systèmes de dessalement. On mettra un accent particulier sur les protocoles physiques (préparation, filtration), chimiques (anti-entartrage, contrôle du pH) et de nettoyage employés dans les installations industrielles.

### **III.2Mécanisme de formation de calcaire :**

L'entartrage correspond à la formation de dépôts compacts et adhérents de tartre sur une surface, le  $\text{CaCO}_3$  étant le principal composant du tartre. L'entartrage dépend des caractéristiques physicochimiques de l'eau telles que la concentration en calcium, l'alcalinité ou TAC, la température, le pH ainsi que de la nature des surfaces au contact de l'eau et des propriétés d'interface eau/surface du matériau. Le phénomène de précipitation du  $\text{CaCO}_3$  peut être décrit selon un mécanisme classique de germination-croissance. La germination, ou nucléation, est un processus au cours duquel les ions ou les molécules libres en solution se regroupent et s'organisent en formant les germes d'une phase solide cristalline, le grossissement de ces germes donnera le minéral. Au voisinage des surfaces au contact avec l'eau, les conditions de formation des germes de  $\text{CaCO}_3$  peuvent être différentes de celles qui existent dans la masse d'eau[17].

### III.3 les techniques de prévention du calcaire :

Prévention de l'entartrage dans les stations de dessalement

L'entartrage, principalement dû à la précipitation de sels peu solubles comme le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) ou le sulfate de calcium ( $\text{CaSO}_4$ ), est l'un des problèmes majeurs rencontrés dans les stations de dessalement. Ces dépôts peuvent réduire l'efficacité des membranes d'osmose inverse ou obstruer les surfaces d'échange thermique dans les procédés thermiques (MSF, MED). Afin de préserver les installations et de garantir une production continue et fiable d'eau douce, plusieurs techniques de prévention sont mises en œuvre :

#### 1) Prétraitement de l'eau d'alimentation

Le prétraitement permet d'éliminer les impuretés susceptibles de favoriser la formation de dépôts :

Filtration mécanique : enlève les particules en suspension.

Filtration plus fine (sable, membranes UF) : élimine les matières colloïdales[18].

#### 2) Injection d'antiscalants :

Des produits inhibiteurs de tartre sont injectés dans l'eau brute afin de retarder ou d'empêcher la précipitation des sels

Le système de dosage d'inhibiteur de tartre est utilisé pour empêcher la formation de tartre à l'intérieur de tubes de la section de récupération de chaleur et du réchauffeur de saumure en injectant l'inhibiteur de tartre dans la boîte de puisard de recyclage de saumure montée dans le dernier étage de l'évaporateur.

Le Système de dosage d'anti-mousse est prévu pour injecter la solution d'anti- mousse dans la ligne d'appoint en amont du dégazeur, afin d'empêcher le moussage d'eau d'appoint dans le dégazeur et de saumure de recyclage dans la chambre de l'évaporateur

Les inhibiteurs plus utilisés sont les phosphonates et les polymères organiques[1].

#### 3) Chloration rapide de l'eau brute :

Pour la désinfection côté eau brut, en particulier au niveau du filtre de gravier, une solution d'hypochlorite avec environ 6-12 mg/l de Cl, est ajoutée à intervalles réguliers (tous les 6 à 8 jours) dans la conduite d'alimentation du réservoir intermédiaire. Comme le chlore occasionne des dommages irréparables aux membranes par oxydation, l'eau brute

est menée dans la canalisation d'écoulement derrière le filtre fin pendant la durée de la chloration rapide. Lorsque la l'ajout est terminé, le fonctionnement normal de l'osmose inverse reprend et le chlore se diffusant par après hors des filtres de gravier et de filtres bougies est éliminé par l'addition de méta bisulfite de sodium ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ ) [19].

#### 4) Contrôle du pH :

Le pH de l'eau de mer est toujours alcalin en raison de la présence de sels, qui provoquent la formation de tartre sur les membranes d'osmose inverse. L'ajustement du pH est également bénéfique pour l'élimination des algues et du carbone organique total (COT).

Les performances des membranes d'osmose inverse sont optimales lorsque le pH est bas. Il est donc nécessaire de maintenir le pH de l'eau entre 5,5 et 6,0 en ajoutant de l'acide sulfurique ou un autre type d'acidifiant qui optimise la formation des floccs [20]

#### 5) Surveillance continue

Mesures en ligne : conductivité, pH, pression et contrôle de température car la solubilité de certains sels diminue à haute température donc on limite la température maximale (généralement  $< 115\text{ }^\circ\text{C}$  en MSF,  $< 75\text{ }^\circ\text{C}$  en MED)

Détection de perte de performance si y'a un déclenchement de l'action corrective

### III.4 Conséquence de colmatage calcaire :

Le colmatage par le calcaire, principalement dû à la précipitation du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ), est responsable de nombreux troubles dans les systèmes de dessalement, qu'il s'agisse de procédés d'osmose inverse ou de procédés thermiques.

La croissance de dépôts plus ou moins importants sur les membranes ou les surfaces d'échange de chaleur engendre une série de problèmes techniques et économiques majeurs.

Tout d'abord, la surface active de transfert est réduite, impliquant un débit de perméat produit fortement réduit. Une mince pellicule de calcaire suffit à boucher les pores des membranes ou à diminuer le coefficient de transfert de chaleur du côté des évaporateurs, obligeant ainsi l'opérateur augmenter ou la pression (dans les systèmes RO) ou la température pour compenser la perte de performance. Cette augmentation des conditions de fonctionnement

conduit immédiatement à un surcoût énergétique qui impacte directement le coût de production d'eau.

Par ailleurs, les dépôts peuvent exercer mécaniquement ou chimiquement des contraintes sur les matériaux : ils augmentent l'usure prématurée des membranes polymères, la corrosion sous dépôt des surfaces métalliques et peuvent même entraîner une érosion/corrosion sur d'autres parties du circuit hydraulique. Ces deux phénomènes augmentent fortement la sollicitation des équipements, réduisent leur durée de vie et augmentent fortement la fréquence des opérations de maintenance.

Le colmatage sévère mentionné ci-dessus oblige souvent à des arrêts de production pour des nettoyages chimiques (CIP), qui, outre le fait d'être coûteux en terme d'arrêt de production, tendent à augmenter, de part les produits employés dans ce but, le problème de colmatage, de fuites etc. En somme, l'entartrage minérale, s'il n'est pas efficacement contrôlé, peut faire croître les coûts de production de l'eau jusqu'à près de 20 %.

### **III.5 les techniques de traitement du calcaire :**

#### **III.5.1 Système de nettoyage à billes :**

Le système de nettoyage à billes est utilisé pour nettoyer les surfaces intérieures de tubes de la section de récupération et le réchauffeur de saumure durant l'exploitation normale. Le principe de base d'opération du système de nettoyage à billes consiste en circulation de billes de mousse (éponge) dont le diamètre est légèrement supérieur que celui intérieur du tube

Le système de nettoyage à billes se compose d'un filtre à billes, d'un collecteur de billes et d'une pompe de recyclage de billes.

#### **III.5.2 Système de nettoyage à l'acide :**

La prévention de tartre dans les tubes de transfert de chaleur a une importance capitale pour les unités de dessalement. Le tartrage important cause la réduction de production d'eau. Le système de nettoyage à l'acide est utilisé pour nettoyer périodiquement les tubes de l'évaporateur et du réchauffeur de saumure au moyen d'un acide chlorhydrique (ou acide sulfurique)

Avant que le processus de rinçage à contrecourant à l'eau ne débute, la couche filtrante est aérée par soufflage afin de décoller les particules adhérant est de faciliter ainsi le rinçage à contrecourant à l'eau, La quantité d'air environ 420 m<sup>3</sup>/h requise à cet effet est fournie par la

soufflerie de rinçage, enclenchée automatiquement dans le cadre du déroulement de programme de rinçage à contrecourant. L'air est amené à travers un fond de filière et quitte le réservoir par l'accessoire de purge. Ensuite l'air et l'eau sont amenés en même temps par le dessous du réservoir durant quelques minutes. Suivent l'arrêt de la soufflerie et la phase finale de rinçage exclusif à l'eau après la remise en service du filtre, le premier filtrat est expulsé vers la canalisation de drainage durant environ 3 minutes.

Il ne peut y avoir qu'un seul filtre en mode de rinçage. Ceci vaut également même si plusieurs filtres atteignent en même temps une perte de charge de 500 m bars

Le processus complet de rinçage à contrecourant dure par filtre environ 25 à 30 minutes. On peut prévoir que les filtres de gravier devront être rincés à contrecourant environ tous les 1 à 2 jours[1].

### **III.5.3 Système de nettoyage en place (OI) :**

Le nettoyage des membranes est crucial pour l'exploitation et la maintenance de tout système membranaire. Le nettoyage en place (NEP) est une procédure de nettoyage de l'intérieur des membranes des systèmes d'osmose inverse (OI) permet de nettoyer les membranes sans démonter le système de traitement de l'eau ce dernier nettoie et rince à l'aide d'une solution nettoyante. Il élimine les salissures qui s'accumulent à la surface de la membrane lors des opérations standard

Cette procédure s'effectue en plusieurs étapes successives. Elle débute par un rinçage à l'eau douce pour évacuer les résidus de saumure et stabiliser le système. Ensuite, une solution de nettoyage chimique est préparée (acide ou alcaline selon la nature des dépôts) et injectée dans les modules de membranes. Cette solution est généralement recirculée pendant 30 à 60 minutes à température contrôlée (souvent entre 25 et 35 °C) pour favoriser la dissolution des dépôts : les solutions alcalines sont utilisées contre le biofouling (encrassement biologique) et les matières organiques, tandis que les solutions acides ciblent le tartre (carbonate ou sulfate de calcium). Après cette phase, un rinçage final à l'eau douce est effectué pour éliminer toute trace de produit chimique. Le système peut ensuite être remis en service progressivement. Le respect des paramètres (pH, température, débit) pendant toute la procédure est crucial pour garantir l'efficacité du nettoyage sans endommager les membranes[21].

### **III.6-Nettoyage acide et ses effets sur les membranes :**

Le nettoyage chimique acide est une méthode largement utilisée pour éliminer les encrassements inorganiques, notamment les dépôts de carbonate de calcium, sulfate de baryum, et autres sels peu solubles formés lors du processus de dessalement de l'eau de mer. Les acides tels que l'acide citrique ou l'acide chlorhydrique sont souvent employés à faible concentration pour dissoudre ces dépôts et restaurer la perméabilité des membranes.

Cependant, bien que ce traitement soit efficace contre le tartre minéral, il peut avoir des effets néfastes sur l'intégrité chimique et structurale des membranes, notamment celles à base de polyamide utilisées dans l'osmose inverse. Une exposition répétée ou à des concentrations trop élevées peut provoquer une hydrolyse de la couche active, réduisant la sélectivité et accélérant le vieillissement de la membrane

Il est donc essentiel de respecter des conditions opératoires strictes (pH, durée, température) pour limiter les dommages irréversibles. Par exemple, il est recommandé de maintenir le pH entre 3 et 4 lors d'un nettoyage acide afin d'éviter une dégradation excessive

*Partie expérimentale*

---

### **1-Introduction :**

L'accès à l'eau potable est un défi dans de nombreuses régions arides, ce qui pousse au recours au dessalement de l'eau de mer, notamment par la technologie MSF (Multi-Stage Flash). Ce procédé est cependant freiné par l'entartrage, des dépôts de carbonates qui nuisent à l'efficacité énergétique et augmentent les coûts de maintenance. Pour y remédier, des nettoyages acides sont utilisés, mais l'efficacité dépend du type d'acide et des conditions d'application.

-Notre travail consiste à éliminer le tartre qui stagne dans les pipes à l'aide des acides et unbaseet de les comparer entre eux pour déterminer les plus efficaces.

### **2-Echantillonnage des dépôts calcaires :**

Les échantillons de dépôts calcaires ont été pris au niveau des évaporateurs de la station de dessalement KAHRAMA, dont le fonctionnement repose sur le procédé Multi-Stage-Flash (MSF). Ces dépôts sont déposés sur les surfaces internes des tubes échangeurs de chaleur dus aux grosses températures et à la forte concentration en sels dissous.

Le prélèvement a été réalisé à l'aide d'une pompe sous pression, qui permet de détacher partiellement les dépôts adhérents et d'élever les particules solides en suspension dans le flux d'eau sous pression. Cette technique a été mise en œuvre pour éviter la contamination. Les échantillons récupérés ont été filtrés, séchés à température ambiante, puis conservés



**Figure 9: dépôts de calcaire**

### 3-Matériels :

#### 3.1 Les produits chimiques :

Le tableau suivant représente les produits chimiques utilisés :

**Tableau 3: Liste des produits chimique**

| Produit                  | Formule chimique                             | Structure simplifié                                     |
|--------------------------|--|---|
| Acide chlorhydrique      | HCL  | H-Cl  |
| Acide sulfurique         | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>               | HO-S(=O) <sub>2</sub> -OH                               |
| Acide citrique           | C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub> | HOOC-CH <sub>2</sub> -C(OH)(COOH)-CH <sub>2</sub> -COOH |
| Acide phosphorique       | H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>               | HO-P(=O)(OH) <sub>2</sub>                               |
| Base Hydroxyde de sodium | NAOH   | Na-OH   |

- Eau distillée
- Tartre (carbonate de calcium prélevé d'une installation MSF)

#### 3.2 Matériels verrerie et équipements :



Béchers 25ml



Eprouvettes graduée



Fioles jaugées



Pipettes graduées



Agitateur magnétiques  
Et barreaux



Tubes à essai



Verre de montre



Mortier et le pilon



Balance électronique



Etuve



Papier filtre et entonnoir



Spatule



Erlenmeyer



Gants, masque et blouse pour laprotection

## **4- Protocole expérimental :**

### **4.1 Préparation des échantillons :**

Le tartre a été broyé, puis pesé pour obtenir des échantillons homogènes de 2.00 g chacun. Ces échantillons ont été utilisés comme support pour les tests d'acides.



**Figure 10: préparation d'échantillon**

## **4.2 Paramètres étudiés :**

Type des acides :

- Acide chlorhydrique (**HCL**)
- Acide sulfurique (**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**)
- Acide citrique (**C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>**)
- Acide phosphorique (**H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>**)
- Hydroxyde de sodium (**NAOH**)

❖ Concentrations des acides :

### **1) Acide chlorhydrique HCL :**

Pour **HCl** à **37 %** et densité **1,19 g/ml** et masse molaire = **36,46 g/mol**

➤ Concentration molaire :

$$C = 12,08 \text{ mol/L}$$

### **2) Acide phosphorique (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>):**

Pour **H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>** à **85%** et densité **1,685 g/ml** et masse molaire = **98 g/mol**

$$C = 14,61 \text{ mol/L}$$

### **3) Acide sulfurique (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>):**

Pour **H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>** à **98%** et densité **1,84 g/ml** et masse molaire = **98,08 g/mol**

$$C = 18,38 \text{ mol/L}$$

### **4) Acide citrique (C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>) :**

Pour **C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub>** On dissous **6,40 g** d'acide citrique dans **100 ml = 0,1 L**

Masse molaire = **192,12 g/mol**, masse utilisée = **6,40 g** et volume = **0,1 L**

$$C = 0,333 \text{ mol/L}$$

## Partie experimental

---

### 5) Base hydroxyde de sodium NAOH :

Pour NAOH On dissous **8,00 g** d'hydroxyde de sodium **200 ml** = 0,200 L.

Masse molaire = 40,00 g/mol , masse utilisée = 8,00 g et volume (V) = 0,200 L

$C = 1 \text{ mol/L}$

### 4.3 Préparation des solutions:

Pour préparer les différentes dilutions 5 et 10 et 20 fois pour les acides(HCL,H2SO4,H3PO4) pour les volume finaux de 50 ml,100 ml et 200 ml

- Prélever 10 ml d'acide sulfurique concentré à l'aide d'une pipette
  - Dans un bécher, verser la quantité d'eau distillée nécessaire pour atteindre le volume final correspondant à chaque dilution
  - Agiter doucement chaque solution pour homogénéiser.
  - Étiqueter les solutions obtenues pour usage ultérieur
- Pour préparer acide citrique peser 6,4g d'acide citrique solide a laide de la balance électronique puis Verser environ 70 à 80 ml d'eau distillée dans un bécher propre.(voir photos 1,2)
- Apres on Ajoute l'acide citrique au bécher, Agiter à l'aide d'un agitateur magnétique ou d'une spatulejusqu'à dissolution complète. Ensuite Transférer la solution dans une fiole jaugée de 100 ml, puis compléter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jaugée.et homogénéiser la solution en retournant doucement la fiole
- Pour préparer NAOH on peser 8,00 g de NaOHen pastilles à l'aide de la balance. Verser environ150 ml d'eau distillée dans un bécher. puis ajouterprogressivement les pastilles de NaOH dansl'eau (jamais l'inverse), en agitant lentement.  
Apres Laisser refroidir si un dégagement de chaleur se produit (réaction exothermique)  
Ensuite Transférer la solution dans une fiole jaugée de 200 ml. Et Compléter avec de l'eau distilléejusqu'au trait de jauge, puis homogénéiser.(voir photo3)



(1)



(2)



(3)

**Figure 11: préparation d'acide citrique et NAOH**

**Concentration des acides après dilution :**

On a la formule  $C1 \times V1 = C2 \times V2$

$$C2 = \frac{C1 \times V1}{V2}$$

**C1** : concentration de solution mère

**V1** : volume d'acide avant dilution

**C2** : concentration des acides après dilution

**V2** : volume après dilution ( $\times 5, \times 10, \times 20$ )

Tableau suivant représenté les concentrations des acides et bases utilisés dans le traitement du calcaire

**Tableau 4: Les concentrations des acides après dilution**

| <b>Acides</b> | <b>C1(mol/l)</b> | <b>V1(ml)</b> | <b>Facteur de dilution</b> | <b>C2(mol/l)</b> |
|---------------|------------------|---------------|----------------------------|------------------|
| <b>HCL</b>    | 12.08            | 10            | 5x                         | 2.41             |
|               |                  |               | 10x                        | 1.20             |
|               |                  |               | 20x                        | 0.60             |
| <b>H2SO4</b>  | 18.38            | 10            | 5x                         | 3.67             |
|               |                  |               | 10x                        | 1.83             |
|               |                  |               | 20x                        | 0.90             |
| <b>H3PO4</b>  | 14.61            | 10            | 5x                         | 2.92             |
|               |                  |               | 10x                        | 1.46             |
|               |                  |               | 20x                        | 0.73             |
| <b>C6H8O7</b> | 0.333            | 10            | 5x                         | 0.66             |
|               |                  |               | 10x                        | 0.033            |
|               |                  |               | 20x                        | 0.016            |

## Partie experimental

|      |   |    |     |     |
|------|---|----|-----|-----|
| NAOH | 1 | 10 | 5x  | 0.2 |
|      |   |    | 10x | 0.1 |

### 4.4 Etapes expérimentale :

- 1- Peser environ 2 g de tartre ( $M1=2g$ ) pour chaque essai. (voir photo4,5)
- 2- Ajouter le tartre dans l'erenmeyer contenant 25ml de l'acide dilué.(voir photo 6,7)
- 3- Démarrer le chronomètre et agiter doucement alaide d'un agitateur magnétique la solution pendant 20 min pour meilleure dissolution complète. (voir photo 8)
- 4- Observer les réactions (dégagement gazeux, effervescence).
- 5- Filtrer et décanter le reste solide, après sécher dans une étuve à  $45,5^{\circ}C$  puis peser les résidus.(voir photos 9, 10)



(4)



(5)



(6)



(7)



(8)



(9)



(10)

**Figure 12: les étapes expérimentales**

-Ces mêmes étapes étaient répétées avec chaque acide

**Les masses après dégradation :**

- La masse initiale = **2g**

| Acide        | Facteur de dilution | m finale (g) |
|--------------|---------------------|--------------|
| <b>HCL</b>   | 5                   | 0.89         |
|              | 10                  | 1.50         |
|              | 20                  | 1.21         |
| <b>H2SO4</b> | 5                   | 1.14         |
|              | 10                  | 0.79         |
|              | 20                  | 1.37         |
| <b>H3PO4</b> | 5                   | 1.01         |
|              | 10                  | 1.34         |
|              | 20                  | 1.56         |

|               |    |      |
|---------------|----|------|
| <b>C6H8O7</b> | 5  | 1.68 |
|               | 10 | 1.95 |
|               | 20 | 1.84 |
| <b>NAOH</b>   | 5  | 1.94 |
|               | 10 | 1.85 |

**Tableau 5 : les masses après dégradation**

### 5. Taux de dégradation :

La formule de taux de dégradation du tartre :=  $\frac{m_{initial} - m_{final}}{m_{initial}} \times 100$

Calcule :  $m_{initial} = 2g$

HCL :

1. Acide diluée 5fois =  $\frac{2-0.89}{2} \times 100 = 55.5\%$
2. Acide diluée 10fois =  $\frac{2-1.50}{2} \times 100 = 25\%$
3. Acide diluée 20fois =  $\frac{2-1.21}{2} \times 100 = 39.5\%$

**Tableau 6: taux de dégradation**

| <b>Acide/base</b> | <b>C2(mol/l)</b> | <b>Taux de dégradatin(%)</b> |
|-------------------|------------------|------------------------------|
| <b>HCL</b>        | 2.41             | 55.5 %                       |
|                   | 1.20             | 25 %                         |
|                   | 0.60             | 39.5%                        |
| <b>H2SO4</b>      | 3.67             | 43%                          |
|                   | 1.83             | 60.5%                        |
|                   | 0.90             | 31.5%                        |
| <b>H3PO4</b>      | 2.92             | 49.5%                        |
|                   | 1.46             | 33%                          |
|                   | 0.73             | 22%                          |
| <b>C6H8O7</b>     | 0.66             | 16%                          |
|                   |                  |                              |

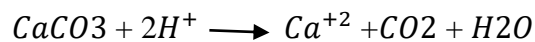
|             |       |      |
|-------------|-------|------|
|             | 0.033 | 2.5% |
|             | 0.016 | 8%   |
| <b>NAOH</b> | 0.2   | 3%   |
|             | 0.1   | 7.5% |

**6-Interprétation du tableau :**

Le tableau présente les taux de dégradation (%) du calcaire en fonction de différents acides et de leur concentrations. On observe que certains acides comme H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et HCL ont une capacité élevée de dégradation surtout à forte concentration et H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> a un effet plus modéré. tandis que d'autres comme C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> montre un comportement inverse à forte concentration, la précipitation de sels complexes freine la réaction, alors qu'à faible dose, la dissolution est plus progressive mais plus efficace.

La base NaOH, quant à elle, s'est révélée peu efficace dans ce contexte.

Le calcaire (CaCO<sub>3</sub>) réagit avec les acides pour produire du dioxyde de carbone, de l'eau et un sel:



Plus la solution est concentrée en ions H<sup>+</sup>, plus la réaction est rapide donc dégradation élevée. Quand on dilue l'acide, la concentration en H<sup>+</sup> diminue alors taux de dégradation diminue. Le facteur de dilution reflète l'effet de la concentration sur la capacité d'un acide à dissoudre le calcaire. Plus l'acide est dilué, moins il est efficace, sauf dans certains cas particuliers où un optimum peut être observé (ex. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 10 fois).

Les bases, quant à elles, ne sont pas adaptées pour cette dégradation.

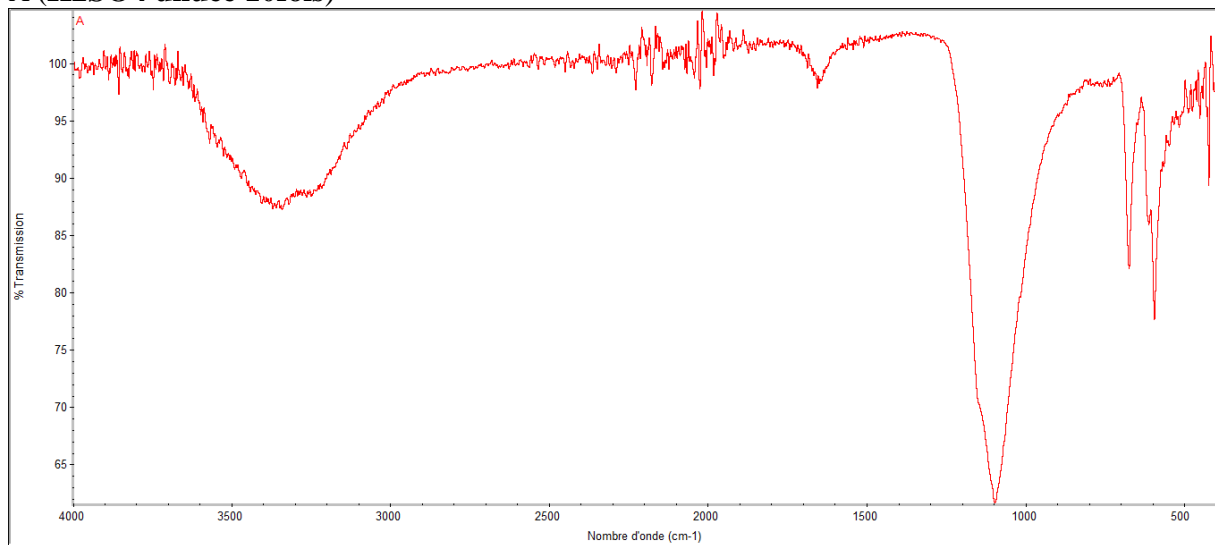
Pour H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> La dégradation augmente (de 43 % à 60.5 %). Cela peut s'expliquer par le fait qu'à dilution 10x, la solution reste suffisamment acide pour dissoudre efficacement le calcaire, sans provoquer les effets indésirables d'une trop forte concentration, comme : la formation rapide de CO<sub>2</sub> qui limite le contact prolongé entre l'acide et le calcaire ; une augmentation locale de la température due à une réaction exothermique rapide (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pur libère beaucoup de chaleur en solution) ; la possible formation d'un gel ou d'une couche

visqueuse due à l'hygroscopicité du  $H_2SO_4$ , ce qui empêche la pénétration de l'acide.

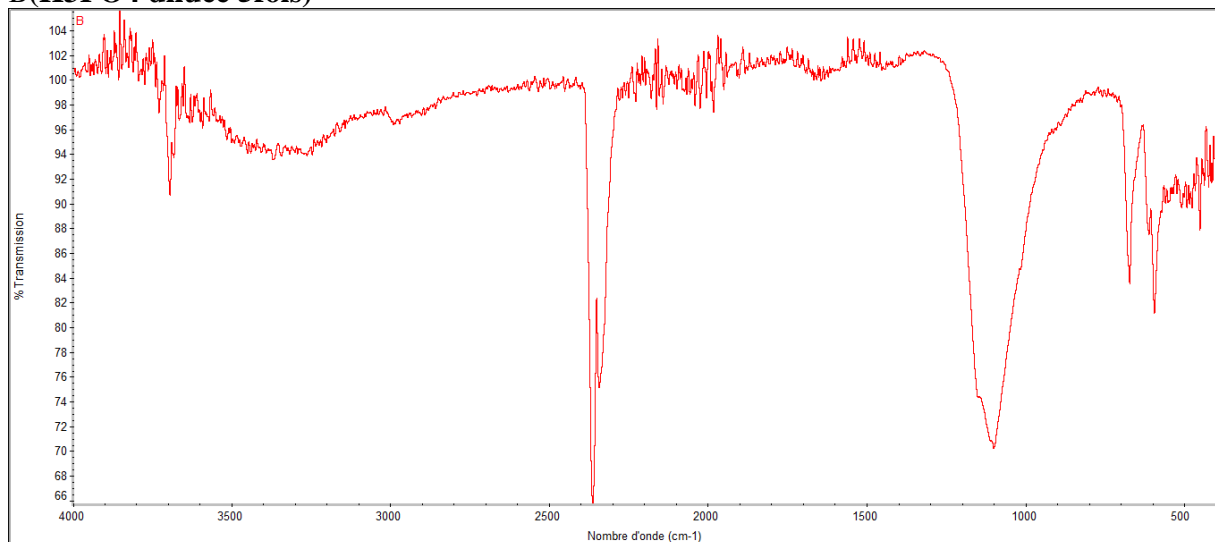
### 7- Spectres Infrarouge des échantillons :

Les figures suivantes représente les spectres Infrarouges des échantillons A( $H_2SO_4$  diluée 10fois), B( $H_3PO_4$  diluée 5fois), C(Acide citrique diluée 5fois), D(HCL diluée 5fois), E(Tartre brute),

**A ( $H_2SO_4$  diluée 10fois)**

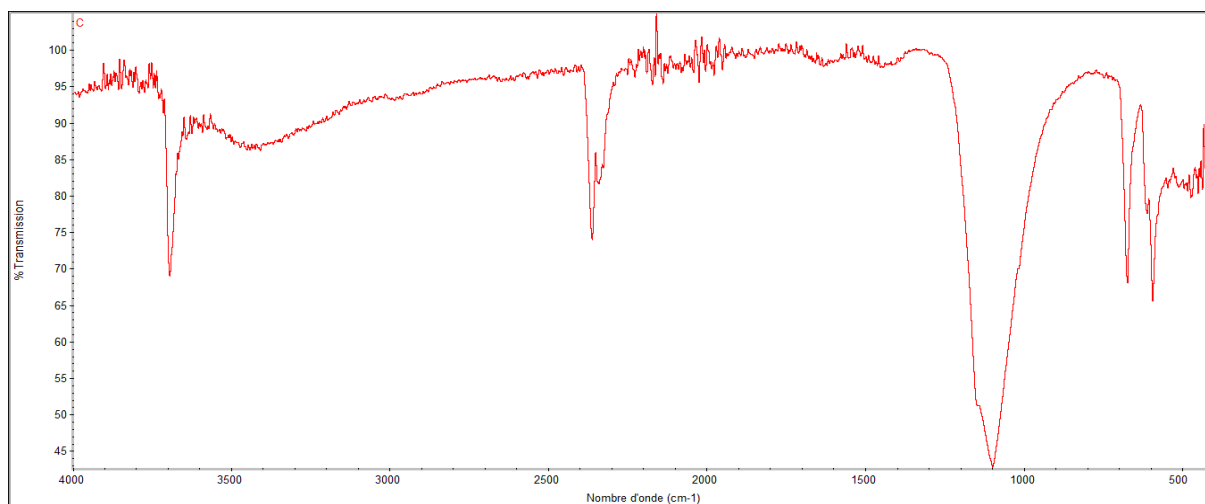


**B ( $H_3PO_4$  diluée 5fois)**

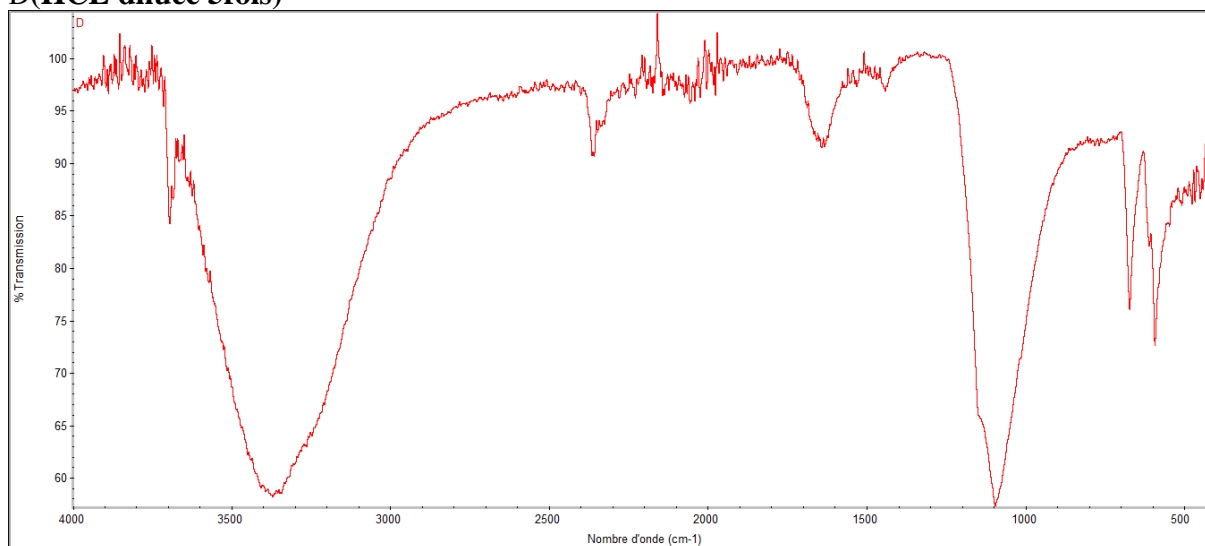


**C (Acide citrique diluée 5fois)**

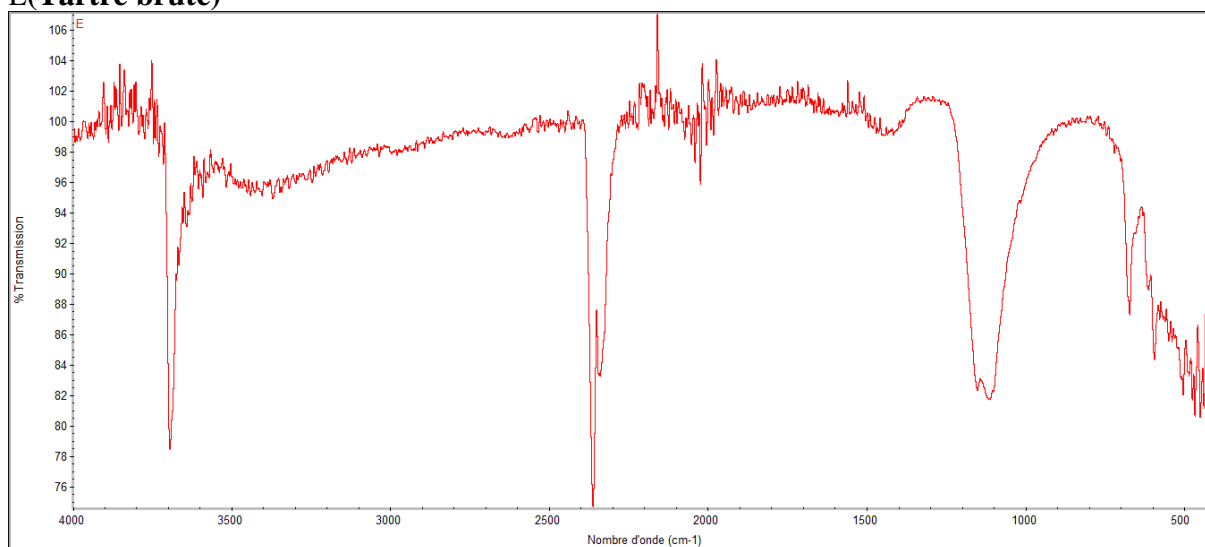
## Partie experimental



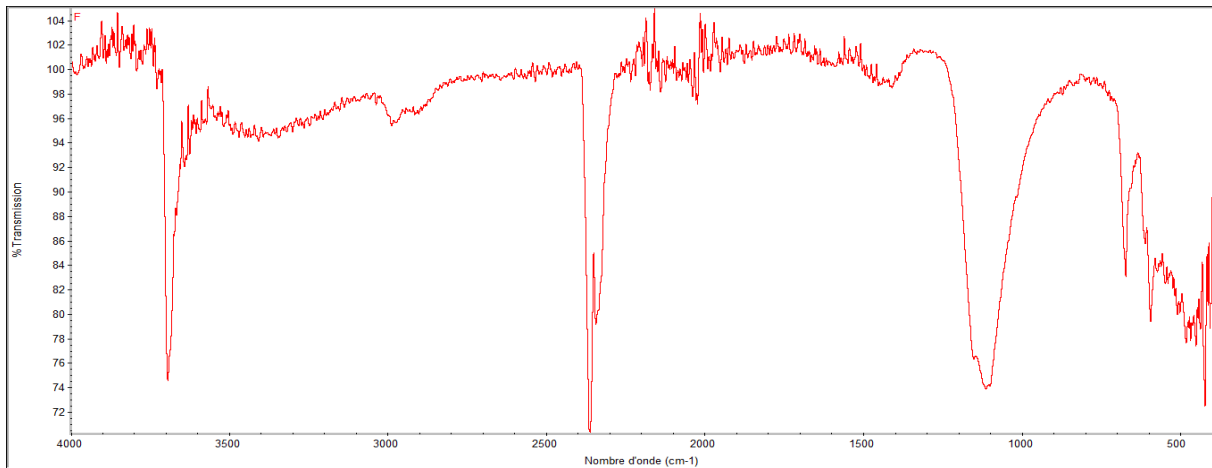
**D(HCL diluée 5fois)**



**E(Tartre brute)**



**F(NaOH diluée 10fois)**



**Figure 13: les spectres Infrarouges des echantillons A(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> diluée 10fois), B(H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> diluée 5fois), C(Acide citrique diluée 5fois), D(HCL diluée 5fois), E(Tartre brute), F(NaOH diluée 10fois)**

**-Interprétation :**

Les six spectres (A à F) du tartre traité par différents réactifs, destinée à comparer l'efficacité des traitements utilisés pour limiter le colmatage des canalisations et des membranes dans les stations de dessalement.

Analyse comparative des spectres FTIR :

Spectre E — Tartre brut (référence)Présence claire de bandes vers :

~1450 et 875 cm<sup>-1</sup> : vibrations du carbonate (CaCO<sub>3</sub>).

~3400 cm<sup>-1</sup> : bande O–H large (eau ou OH<sup>-</sup>).

~1650 cm<sup>-1</sup> : H–O–H (eau adsorbée).

Ces bandes sont la signature typique du tartre calcaire (carbonate de calcium).

**1- Spectre A (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (10x))**

Diminution nette des bandes ~1450 et 875 cm<sup>-1</sup>, signe d'une dissolution du carbonate de calcium, Nouvelle bande vers 1100–1200 cm<sup>-1</sup> (groupes S=O) → sulfates formés.

Bande O–H plus faible → moins d'humidité résiduelle. Très efficace pour dissoudre le tartre, mais formation possible de dépôts de sulfate de calcium.

### **2- Spectre B ( $H_3PO_4$ (5x))**

Réduction partielle des bandes carbonates. Apparition de bandes larges vers  $1000-1100\text{ cm}^{-1}$  (groupes P–O) : phosphates formés.

Bande O–H encore visible. Moins agressif, mais risque de précipitation de phosphates de calcium, difficiles à éliminer.

### **3- Spectre C (Acide citrique (5x))**

Bandes carbonates encore bien visibles → efficacité faible à modérée.

Pas de pics caractéristiques de nouveaux sels. Traitement doux, non agressif, probablement chélatant (formation complexes Ca-citrate). Peu efficace pour un détartrage profond, mais bon pour entretien doux et régulier.

### **4- Spectre D (HCL (5x))**

Forte atténuation des bandes carbonates, similaire au spectre A.

O–H et H–O–H également diminuées. Quelques pics mineurs vers  $1000-1100\text{ cm}^{-1}$  → potentielle action acide ou agent complexant. Très bon effet détartrant, comparable au  $H_2SO_4$ , sans indication claire de précipitation secondaire. Si HTL est stable, c'est un très bon candidat.

### **5- Spectre F (NaOH (10x))**

Bandes carbonates toujours présentes, même si légèrement modifiées.

En milieu basique, le  $CaCO_3$  est peu soluble, donc le traitement est inefficace. Ne convient pas au détartrage chimique, peut même favoriser des dépôts de silicates ou hydroxydes.

Conclusion — Classement des traitements selon leur efficacité

1 HCL (D) Très bon détartrant, sans effets secondaires visibles

2  $H_2SO_4$  (A) Très efficace, mais cause la formation de sulfates

3  $H_3PO_4$  (B) Moyennement efficace, précipitation possible

4 Acide citrique (C) Faible effet, mais traitement doux

5 NaOH (F) Inefficace, colmatage

Les spectres infrarouge ont permis d'évaluer l'efficacité de différents traitements chimiques sur le tartre issu des conduites de dessalement d'eau de mer. Le tartre brut (spectre E) présente des bandes caractéristiques des carbonates de calcium ( $\sim 1450$  et  $875\text{ cm}^{-1}$ ) ainsi que des groupes hydroxyles ( $\sim 3400\text{ cm}^{-1}$ ). Après traitement par l'acide sulfurique (A) ou HCL (D), ces bandes sont significativement atténuées, indiquant une dissolution efficace du tartre. Le traitement au HCL, bien que de nature non précisée, montre un excellent effet détartrant, comparable voire supérieur à celui de l'acide sulfurique, sans formation apparente de sous-produits. L'acide phosphorique (B) entraîne la formation probable de phosphates, tandis que l'acide citrique (C) présente une action plus douce, avec faible dissolution. Enfin, la soude (F) se révèle inefficace. En conclusion, les traitements HCL et  $\text{H}_2\text{SO}_4$  apparaissent comme les plus adaptés pour réduire le colmatage dans les installations de dessalement de l'eau de mer

## *Conclusion Générale*

---

Le dessalement de l'eau est devenu une solution cruciale pour faire face à la pénurie croissante de ressources en eau douce, surtout dans les zones arides et semi-arides. Cependant, l'efficacité et la durabilité des installations de dessalement, en particulier celles qui utilisent des procédés membranaires comme l'osmose inverse, sont souvent entravées par des problèmes d'encrassement, avec le colmatage par le tartre qui réduit l'efficacité des installations et augmentent le coût d'entretien étant l'un des défis majeurs.

Dans ce travail, nous avons exploré les principaux procédés de dessalement, en mettant en lumière leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et leurs inconvénients. Nous avons porté une attention particulière aux mécanismes de formation des dépôts minéraux, notamment ceux liés à la précipitation de carbonates, sulfates et silicates, qui sont responsables du colmatage des membranes. Ce phénomène ne se contente pas de réduire le rendement, il entraîne également une hausse des coûts d'exploitation et une diminution de la durée de vie des équipements.

Dans ce contexte l'utilisation d'acides comme l'acide chlorhydrique ou sulfurique s'est révélée particulièrement efficace pour le traitement du calcaire. Nos résultats ont mis en évidence une efficacité remarquable pour la dissolution des dépôts calcaire présent dans les conduites des unités de dessalement.

Nous avons également examiné diverses stratégies pour prévenir et traiter le colmatage, telles que le prétraitement de l'eau d'alimentation, l'utilisation d'anti-scalants, l'optimisation des paramètres d'exploitation, ainsi que les techniques de nettoyage chimique. L'intégration de ces solutions dans une approche globale de gestion des installations aide à atténuer les effets du tartre et à assurer la durabilité du système de dessalement.

*Référence bibliographique*

---

- [1] Complexe KAHRAMA , volume1 descriptions de systèmes . Fournie par l'entreprise dans le cadre du PFE, **2005**
- [2]B. Kettab les ressources en eau en Algérie: stratégies, enjeux et vision", Desalination, (136), 25-33,**2001**.
- [3]A. Maurel, Dessalement de l'Eau de Mer et des Eaux Saumâtres , Technique & Documentation, Revue Paralia ,Paris, France, p. 226, **2001**.
- [4]P. Benoit, le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres: Les techniques d'hier et d'aujourd'hui, contexte économique et perspectives", Février, **1998**
- [5]V. Renaudin, le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, CNRS, Nancy, **2003**
- [6]Dessouky, H.T., & Ettouney, H.M, *Fundamentals of Salt Water Desalination*, **2002**
- [7] A. Maurel. *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce*. Lavoisier Tec&Doc. **2001**.  
J. Matricon. *Vive l'eau*. Découvertes Gallimard. **2000**.
- [8]P.Bacchin Enseignant Chercheur, Procédés de Séparation et Membranes Université Paul Sabatier du Laboratoire de génie Chimique.**28 Janvier ,2016**
- [10]Pure Aqua. (s. d.). *Qu'est-ce que l'osmose inverse ?* Pure Aqua, Inc
- [11]Dr.M.Metaiche, Maître de Conférences de Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées, Université de Bouira, Technologie Membranaire, Juin, **2014**.
- [12]Al-Amshawee, S., Yunus, M.Y.B.M., Azoddein, A.A.M., Hassell, D.G., Dakhil, I.H., and Hasan, H.A. (2020). Electrodialysis desalination for water and wastewater: A review. *Chemical Engineering Journal* 380, 122231
- [13] Banasiak, L.J., Kruttschnitt, T.W., and Schäfer, A.I Desalination using electrodialysis as a function of voltage and salt concentration. *Desalination* 205, 38–46, **2007**
- [14] Mathioulakis, E., Belessiotis, V, and Delyannis, E. Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art. *Desalination* 203, 346–365,**2007**

[15] Al-Karaghoul, A., and Kazmerski, L.L. Comparisons of technical and economic performance of the main desalination processes with and without renewable energy coupling. 8

[16] Elimelech, M. & Phillip, W. A. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science*, 333(6043), 712–717, **2011**

[17] Anses. Évaluation de l'innocuité et de l'efficacité de procédés anti-tartre « non conventionnels » dans les réseaux de distribution d'eau destinée à la consommation humaine – Procédés catalytiques et électrolytiques, **2019**

[18] Tansakul, C. Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse [Thèse de doctorat, INSA Toulouse, Université de Toulouse], **2009**

[19] Benahmed, S. Étude d'une station de dessalement (Projet de fin d'études d'ingénieur, École Nationale Polytechnique), **2006**

[20] Sigma DAF Clarifiers. DAF para la desalinización del agua de mar, s.d

[21] Kurita America. Membrane CIP (Clean-In-Place): A Complete Guide. Kurita America, **2023, August 7**

Site de la société [Alfa Laval](#) qui commercialise des systèmes de dessalement thermiques

[22] P. Danis. *Dessalement de l'eau de mer*. Techniques de l'Ingénieur, J 2700. **Juin 2003**.

[23] Numéro spécial de Science et Vie sur l'eau, N°211, **Juin 2000**.

[24] C. Galus, *Les techniques de dessalement de l'eau de mer prennent de l'essor*, extrait du Monde, **12 Janvier 2000**, p.24.

[25] *Usine Nouvelle*, Septembre **1999**.

[26] M. Chartier, *Les prix du dessalement, Marée d'eau douce*, Hydroplus, 121, **Mars 2002**, p.24 à 39.

[27] Greenlee, L. F., et al. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*, 43(9), 2317–2348, **2009**.

- [28] Zhao, J.; Wang, M.; Lababidi, H.M.S.; Al-Adwani, H. and Gleason, K.K.: A review of heterogeneous nucleation of calcium carbonate and control strategies for scale formation in multistage flash (MSF) desalination plants, *Desalination*, 442 (2018), pp. 75–88.
- [29] Al-Othman, A.; Darwish, N.N.; Qasim, M.; Tawalbeh, M.; Darwish, N.A. and Hilal, N.: Nuclear desalination: A state-of-the-art review, *Desalination*, 457 (2019), pp. 39–61.
- [30] Al-Shammiri, M. and Safar, M.: Multi-effect distillation plants: state of the art, *Desalination*, 126 (1999), no. 1, pp. 45–59.
- [31] Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N. N., Darwish, N. A., & Hilal, N. Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*, 459, 59-104. (2019).
- [32] Amy, G., Ghaffour, N., Li, Z., Francis, L., Linares, R. V., Missimer, T., & Lattemann, S. Membrane-based seawater desalination: Present and future prospects. *Desalination*, 401, 16-21. (2017).
- [33] Lee, S., Lee, C.-H., & Hong, S. Comparison of membrane fouling in direct seawater and brackish water desalination processes. *Desalination*, 178(1-3), 251-262. (2005).
- [34] Hasson, D., Semiat, R., & Shemer, H. Scale control in saline and wastewater desalination. In *Pretreatment for Membrane Filtration*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. (2011).
- [35] Kim, Y., Choi, Y., & Kim, J. Fouling and cleaning of reverse osmosis membranes: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 7, 1-12. (2015).
- [36] Rahardianto, A., Gao, J., Gabelich, C. J., Williams, M. D., & Cohen, Y. High recovery membrane desalting of low-salinity brackish water: Integration of accelerated precipitation softening with membrane RO. *Journal of Membrane Science*, 289(1-2), 123-137. (2007).
- [37] Zhou, J., & Qian, X. Advances in multi-effect distillation (MED) systems. *Desalination and Water Treatment*, 5(1-3), 207-215. (2008).

*Référence bibliographique*

---

[38] Lattemann, S., & Höpner, T. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220(1-3), 1-15. (2008).

[39] Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. L. Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination*, 309, 197-207. (2013).

[40] Turek, M. Cost-effective electrodialysis desalination system for medium salinity brackish water. *Desalination*, 153(1-3), 375-380. (2003).

[41] Al-Rawajfeh, A. E., & Glade, H. Analysis of carbonate scaling in seawater thermal desalination processes. *Desalination and Water Treatment*, 27(1-3), 114-121. (2011).