

République Algérienne Démocratique et Populaire

Université Abdelhamid Ibn  
Badis-Mostaganem  
Faculté des Sciences de la  
Nature et de la Vie



جامعة عبد الحميد بن باديس  
مستغانم  
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MER ET DE L'AQUACULTURE

## MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

**BETTAHAR Sara**

Pour l'obtention du diplôme de

**MASTER EN HYDROBIOLOGIE MARINE ET CONTINENTALE**

**Spécialité: Ressources halieutiques**

THÈME

**Diminution de l'impact négatif de dessalement de l'eau  
de mer sur l'équilibre de l'écosystème marin**

Soutenue le 07 /07/2025

DEVANT LE JURY

Président	BOUGHERIRA Abdeldjalil	MCA	U. Mostaganem
Encadreur	BENMEDDAH Mohammed missoum	MCB	U. Mostaganem
Examineur	BILLAMI Malika	MAA	U. Mostaganem

*Année universitaire 2024/2025*

## Résumé

Cette étude examine l'impact des usines de dessalement de l'eau de mer sur l'équilibre écologique marin, à travers l'étude de cas de l'usine de Mostaganem. Elle met en évidence les dommages causés par le rejet d'eau salée et propose des solutions pour les minimiser, telles que l'amélioration des techniques de rejet et la surveillance de l'environnement. L'objectif est de parvenir à un équilibre entre la production d'eau et la protection de l'écosystème marin.

**Mots clés :** dessalement de l'eau de mer, écosystème marin, saumure, impact environnemental, solutions durables, osmose inverse, surveillance écologique.

### Abstract :

This research examines the impact of seawater desalination plants on the marine ecological balance, through a case study of the Mostaganem plant. It highlights the damages caused by the discharge of salt water and proposes solutions to minimize them, such as improving discharge techniques and environmental monitoring. The goal is to strike a balance between water production and marine ecosystem protection.

**Keywords :** Seawater desalination, marine ecosystem, brine, environmental impact, sustainable solutions, reverse osmosis, ecological monitoring.

### الملخص:

نتطرق من خلال هذا البحث إلى دراسة تأثير محطات تحليه مياه البحر على التوازن البيئي البحري، من خلال دراسة حالة محطة مستغانم. يسلط الضوء على الأضرار الناتجة عن تصريف المياه المالحة، و يقترح حلولاً للحد منها، مثل تحسين تقنيات التصريف والمراقبة البيئية. الهدف هو تحقيق التوازن بين إنتاج المياه و حماية النظام البيئي البحري.

**الكلمات المفتاحية :** تحليه مياه البحر، النظام البيئي البحري، المياه المالحة، الحلول المستدامة، التناضح العكسي، المراقبة البيئية.

# Remerciements

*Avant tout, je rends grâce à Dieu, le tout-puissant, pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, **Monsieur BENMEDDAH Mohammed Missoum**, pour son accompagnement, ses précieux conseils, sa bienveillance et sa disponibilité tout au long de ce mémoire. Son expertise et ses encouragements ont grandement enrichi cette expérience.*

*J'adresse également mes sincères remerciements à l'ensemble du corps enseignant de département de science de mer et de l'aquaculture pour la qualité de l'enseignement dispensé tout au long de mon parcours.*

*Je souhaite exprimer toute ma reconnaissance à l'équipe de la station de dessalement de l'eau de mer de Mostaganem Sonactar, pour leur accueil chaleureux, leur collaboration et les informations précieuses qu'ils m'ont fournies. Un remerciement tout particulier à **Monsieur l'ingénieur BELBACHIR Amine**, pour sa disponibilité, ses explications claires et son soutien tout au long de ma recherche sur le terrain.*

*Je n'oublie pas mes collègues, camarades et amis, qui ont su m'encourager, m'aider et partager avec moi cette aventure.*

*Enfin, je remercie du fond du cœur ma famille, en particulier mes parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur confiance indéfectible. Ce travail leur est dédié avec gratitude et tendresse.*

# Dédicaces

*Je dédie ce mémoire à :*

*A ma mère,*

*Ma lumière, ma force, ma vie.....*

*Merci pour ton amour inconditionnel, tes encouragements constants, et ton soutien dans chaque étape de mon parcours, tu es le cœur battant de ma réussite indéfectible. Ce travail est avant tout le fruit de ta patience et de tes prières.*

*A mon père,*

*Merci pour ta confiance, ta force tranquille. Ton exemple m'a appris la persévérance et la dignité.*

*A ma sœur KAWTAR*

*A mes frères ABDERAHMANE et REDA*

*A l'âme de mon grand-père,*

*Que dieu l'accueille en sa miséricorde. Tu es resté à jamais vivant dans ma mémoire et dans mon cœur. Ce mémoire est aussi un hommage à toi.*

*A ma famille,*

*Pour votre présence, vos encouragements et votre foi en moi.*

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : Capacité globale de dessalement en m <sup>3</sup> /j et % .....	3
<b>Figure 2</b> : Capacités cumulatives de MSF, MED et SWRO en Méditerranée en m <sup>3</sup> /j.....	4
<b>Figure 3</b> : Les divers procédés de dessalement .....	7
<b>Figure 4</b> : Distillation à simple effet .....	8
<b>Figure 5</b> : Distillation à multiples effets .....	8
<b>Figure 6</b> :Principe de fonctionnement d'un système par détente successives (MSF).....	9
<b>Figure 7</b> : Compression mécanique de vapeur .....	10
<b>Figure 8</b> : Procédé d'électrodialyse simplifié .....	11
<b>Figure 9</b> : Schéma expliquant le principe d'osmose inverse.....	12
<b>Figure 10</b> : Crevette Artemia franciscana .....	18
<b>Figure 11</b> : Coraux en mer rouge (Egypte) .....	20
<b>Figure 12</b> : Herbiers de posidonie (Méditerranée) .....	21
<b>Figure 13</b> :Néréide ; un polychète.....	21
<b>Figure 14</b> : Filtre rotatif.....	25
<b>Figure 15</b> : Les tubes de pression.....	27
<b>Figure 16</b> : Système de récupération d'énergie.....	27
<b>Figure 17</b> : La pompe BOOSTER.....	28
<b>Figure 18</b> : Le réservoir de stockage.....	29
<b>Figure 19</b> : Appareil multi paramètre (HACH, SL1000).....	30
<b>Figure 20</b> : Turbidimètre .....	31
<b>Figure 21</b> : Spectrophotomètre (HACH DR3900).....	33
<b>Figure 22</b> : Comparaissant de potentiel hydrogène (ph) d'eau brute et d'eau rejet.....	39

<b>Figure 23</b> : Comparaissant entre la conductivité d'au brute et d'eau rejet .....	39
<b>Figure 24</b> : Comparaissant entre température d'eau brute et eau rejet .....	40
<b>Figure 25</b> : Comparaissant entre turbidité de l'eau brute et eau rejet .....	40
<b>Figure 26</b> : Comparaissant entre TDS de l'eau brute et eau rejet .....	41
<b>Figure 27</b> : Comparaissant entre salinité de l'eau brute et eau rejet .....	41

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1 :</b> les Usines de dessalement de l'eau de mer en Algérie .....	5
<b>Tableau 2 :</b> comparatif des principaux types de rejets générés par les différentes techniques de dessalement .....	13
<b>Tableau 3 :</b> Les résultats d'analyses (EB) et (ER) de l'année 2019 .....	37
<b>Tableau 4 :</b> Les résultats d'analyses physico-chimiques de (EB) et (ER) de l'année 2025 .....	37
<b>Tableau 5 :</b> Evolution des paramètres physico-chimiques de (EB) et (ER) en 2019 et 2025 comparée aux normes de qualité de l'eau de mer .....	38

## Liste des abréviations

**OI** : osmose inverse

**IDA** : internationale de dessalement (International Desalination Association)

**MSF** : distillation multi-stage flash

**MED** : distillation à multiples effets

**SWRO** : seawater reverse osmosis

**EPA** : environmental protection agency

**HP** : haute pression

**ADE** : algérien des eaux

**TDS** : les sels totaux dissous

**MES** : matières en suspensions

**PH** : potentiel hydrogène

**NTU** : néphélobimétrie turbidité unit

**ER** : eau de rejet

**EB** : eau brute

# Sommaire

**Résumé**

**Remerciement**

**Dédicace**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Liste des abréviations**

## Table des matières

Introduction générale .....	1
Chapitre I : dessalement de l'eau de mer	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Le dessalement dans le monde : .....	3
I.3. Dessalement en Méditerranée : .....	4
I.4. Dessalement en Algérie : .....	4
Chapitre II: Les différentes techniques de dessalement de l'eau de mer	
II.1. Procédé thermique : .....	7
II.1.1 La distillation : .....	7
II.1.1.1 Distillation à simple effet : .....	8
II.1.1.2 Distillation à multiples effets (MED) : .....	8
II.1.1.3 Distillation flash (Multi-Stage Flash MSF) : .....	9
II.1.1.4 Distillation par compression de vapeur : .....	9
II.2. Procédés membranaires : .....	10
II.2.1. L'électrodialyse : .....	10
II.2.2. L'osmose inverse : .....	11
II.3. Les rejets de chaque méthode de dessalement : .....	12
Chapitre III: Impacts environnementaux des activités de dessalement	
III. Introduction : .....	16
III.1. Les avantages de dessalement : .....	16

III.2. Les impacts négatifs de dessalement :.....	16
III.2.1. Effets de prélèvement de l'eau de mer : .....	16
III.2.2. Effets des produits chimiques :.....	17
III.2.3. Les effets de la hausse de la salinité et la température sur l'écosystème marin :.....	20
III.2.3. Utilisation de l'énergie : .....	22
III.2.4. Émissions dans l'atmosphère : .....	22
Chapitre IV: Matériels et Méthodes	
IV. Dessalement en Mostaganem (cas d'étude) :.....	24
IV.1. Description de la station de Mostaganem : .....	24
IV.2. Le procédé de traitement d'eau de la station de Mostaganem : .....	24
IV.2.1. Le système de captage et pompage d'eau de mer : .....	24
IV.2.2. Le système de prétraitement de l'eau de mer par filtration et microfiltration :.....	25
IV.2.3. Le système de déminéralisation de l'eau micro-filtré par osmose inverse :.....	26
IV.2.4 Système de reminéralisations et conditionnement de l'eau osmose :.....	29
IV.3. Analyses dans laboratoire : .....	29
IV.4. Prélèvement : .....	30
IV.4.1 Procédures d'analyse :.....	30
Chapitre V: résultats et discussion	
V.1. Résultats d'analyses :.....	37
V.2. Interprétations des résultats :.....	38
V.3. Recommandations et Perspectives pour la gestion des rejets de saumures : .....	44
V.3.1. Recommandations .....	44
V.3.1.1. Techniques de dilution et de dispersion :.....	44
V.3.1.2. Réutilisation et Recyclage des saumures : .....	45
V.3.1.3. Surveillance Continue de l'environnement : .....	46
V.3.2. Perspectives Futures : .....	47
V.3.2.1. Économie Circulaire : .....	47
V.3.2.2 Intégration des Énergies Renouvelables : .....	49
V.3.2.3 Collaboration Internationale : .....	50
Conclusion : .....	52
1. La Nécessité de la Gérer les Rejets de Saumure .....	52
2. Impact Environnemental des Saumures .....	52
3. Solutions pour la Gestion des Saumures .....	52

4. Collaboration Internationale.....	52
Conclusion générale.....	54
Références bibliographique .....	56

# *Introduction*

## **Introduction général :**

---

L'eau a joué un rôle très essentiel dans le développement de la vie sur terre. Elle reste une ressource naturelle d'une importance capitale pour les êtres vivants, l'agriculture, activités économiques et loisirs, dans l'environnement et l'industrie. Cependant, 72% de la surface totale de la terre est recouverte d'eau, environ 97% de l'eau de la terre est de l'eau salée dans les océans, et 3% sont des eaux douces. Ce petit pourcentage de l'eau douce - qui fournit la plupart des besoins humains et animaux - existe dans les eaux souterraines, les lacs et les rivières. (ADE 2019)

Au cours de ces dernières années, les ressources en eau disponibles s'amenuisent partout dans le monde pour plusieurs raisons comme les activités humaines et les facteurs naturels, et cela pourrait entraîner un problème de sécheresse, se qui affectera ou future pour l'activité humaine.

En conséquence, nombreux pays côtiers se tournent vers le dessalement de l'eau de mer comme solution durable pour satisfaire leurs besoins en eau potable. Parmi les technologies utilisées pour dessaler l'eau de mer c'est le procédé membranaire l'osmose inverse (OI), cette technique génère des grandes quantités de saumure concentrée, souvent rejetée en mer sans traitement adéquat, ces déversements riches en sels et parfois en produits chimiques. (Fritzmann, C. et al 2007)

Cette technologie, bien que bénéfique sur le plan socio-économique, réduire le problème de sécheresse n'est pas sans conséquences sur l'environnement marin, elle peut dégrader l'écosystème marin, perturber l'équilibre écologique des zones côtières, la biodiversité marine et à endommager les habitats fragiles.

Dans un contexte de manque d'eau douce et de l'importance croissante du dessalement, la mémoire de fin de cycle s'articule autour de diminution de l'impact négative de dessalement de l'eau de mer sur l'équilibre de l'écosystème marin, il devient essentiel de mettre en œuvre des stratégies pour diminuer les impacts négatifs de cette activité sur l'écosystème marins.

# *Chapitre I*

## *Dessalement de l'eau de mer*

### I.1. Introduction :

Le dessalement c'est une méthode d'élimination des sels, et produire de l'eau douce à partir des eaux de mers ou des eaux saumâtres.

Les techniques de dessalement peuvent être utilisées pour plusieurs applications, mais leur principale utilisation de ces dernières années s'agit de la production de l'eau potable à partir des eaux de mers. L'eau douce produite par la méthode de dessalement peut aussi être utilisée dans l'agriculture ou l'industrie.

### I.2. Le dessalement dans le monde :

Pour mieux expliquer la situation globale du dessalement dans le monde, l'Association Internationale de Dessalement (IDA) présente les informations suivantes, en 2019 :

- 20 516 usines de dessalement présentes dans le monde entier ;
- environ de 122,32 millions de mètres cubes d'eau dessalée produit par jour ;
- plus de 300 millions de personnes dépendaient de l'eau douce produite par dessalement ;
- 175, le nombre de pays où le dessalement est pratiqué.

Tout comme la répartition des ressources en eau dans le monde, l'industrie du dessalement est aussi répartie de manière déséquilibrée. Environ de 48% de la production mondiale de dessalement se positionne au Moyen-Orient, principalement dans les pays du golfe. L'Amérique en représente 19%, l'Asie 14%, l'Europe juste de 6%, alors que l'Afrique est encore moins représentée (LATTEMANN.S, 2010).

La figure ci-dessous représente la capacité totale en m<sup>3</sup>/jr et en % et inclut tout les types d'eau dessalée (eau de mer, eaux saumâtres, eaux usées).

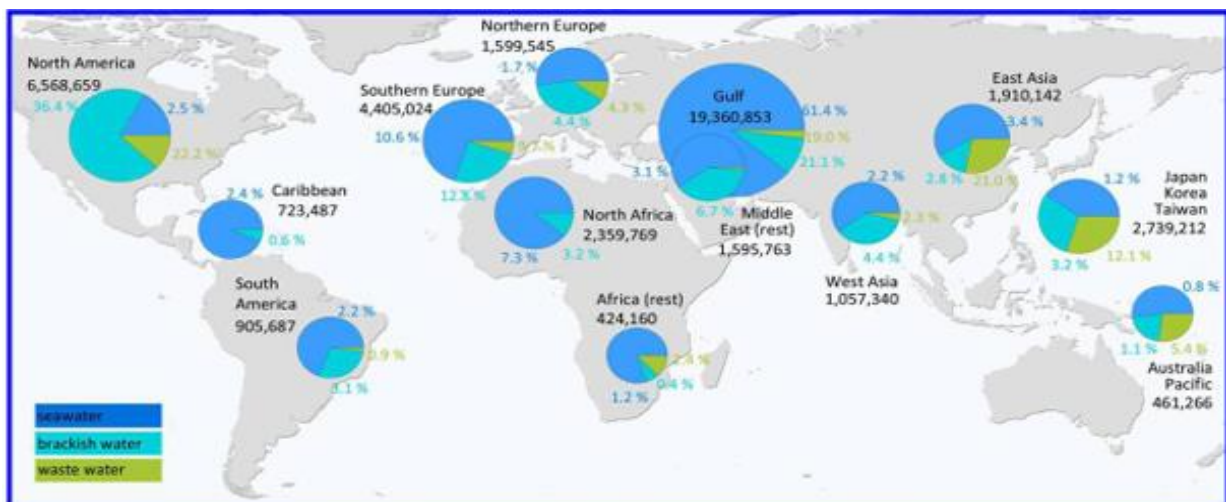
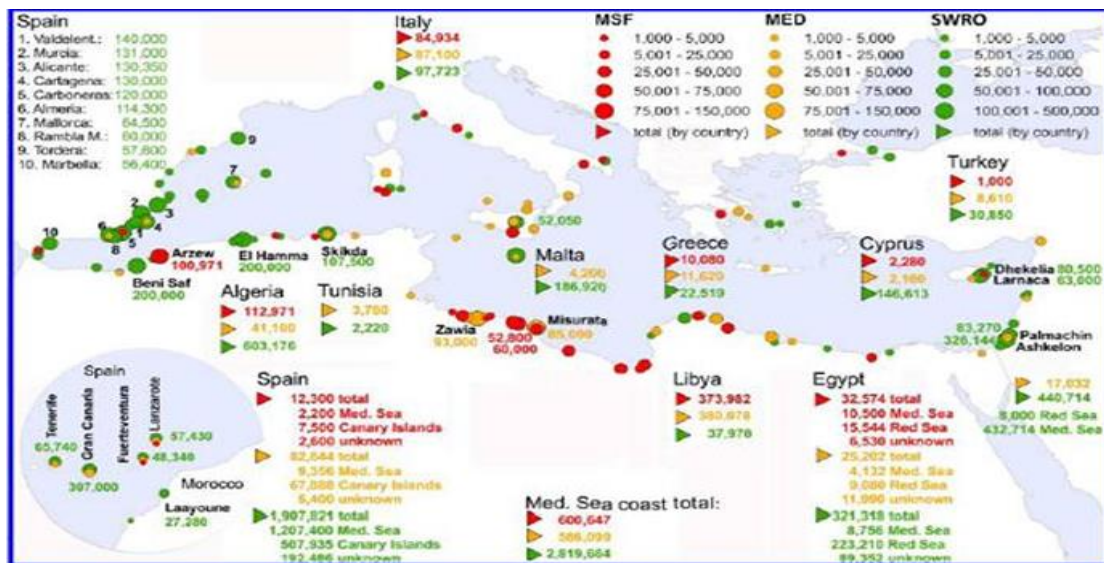


Figure 1. Capacité globale de dessalement en m<sup>3</sup>/j et %.

**I.3. Dessalement en Méditerranée :**

En Méditerranée, la production globale d'eau à travers des eaux de mer est d'environ 4.0 Millions m<sup>3</sup>/jour, (14% de la capacité mondiale), l'Espagne représente 8% de la production mondiale est le troisième pays producteur d'eau dessalée dans le monde et le premier en Méditerranée. Au moment où les procédés thermiques sont les supérieurs dans les pays de Golf et la mer rouge, le procédé le plus fréquent dans la Méditerranée est l'osmose inverse avec plus de 70% (LATTEMANN.S, 2010).

La figure ci-dessous représente la capacité du dessalement dans la région de la méditerranée avec les procédés utilisés.



**Figure 2.** Capacités cumulatives de MSF, MED et SWRO en Méditerranée en m<sup>3</sup>/j.

L'usine d'El Macta dans l'ouest de l'Algérie dans le littoral de la méditerranée représente la plus grande usine de dessalement par osmose inverse dans le monde, avec une capacité de production de 0.5 millions de m<sup>3</sup> par jour.

**I.4. Dessalement en Algérie :**

L'Algérie a connu ces dernières années un problème de sécheresse, les ressources en eau traditionnelles ne suffisant plus à répondre aux besoins de la population. Le ministère des ressources en eau a mené une étude approfondie efficace en adoptant un programme ambitieux axé sur le dessalement de l'eau de mer. Grâce à cette étude, la méthode de l'osmose inverse a été adoptée pour les stations implantées, car elle s'adapte aux conditions particulières de la mer méditerranée. Cette méthode est plus économique et offre de meilleurs rendements, grâce à des technologies améliorées, des membranes plus performantes et une durée de vie plus longue. Dans le cadre de ce programme,

## Chapitre I : Dessalement de l'eau de mer

dix-sept stations sont opérationnelles à partir de 2008, avec des capacités de production allant de 10 000 à 500 000 m<sup>3</sup> /jour, privilégiant principalement la technologie de l'osmose inverse, doté d'une capacité totale de 3.3 millions de m<sup>3</sup> /jour. D'autres projets sont en cours de construction (AEC, 2024)

**Tableau 1.** Représente les Usines de dessalement de l'eau de mer en Algérie.

Station	Localisation	Procédé	Capacité de production [m <sup>3</sup> /jour]	Date de mise en service
Ténès	Chleff	Osmose Inverse	200 000	Juin 2015
Souk tlata	Tlemcen	Osmose Inverse	200 000	Avril 2011
Skikda	Skikda	Osmose Inverse	100 000	Mars 2009
Mostaganem	Mostaganem	Osmose Inverse	200 000	Mars 2011
Macta	Oran	Osmose Inverse	500 000	Juillet 2016
Honaïne	Tlemcen	Osmose Inverse	200 000	Juillet 2012
Fouka I	Tipaza	Osmose Inverse	120 000	Juillet 2011
El Marsa	Alger	Osmose Inverse	60 000	Juillet 2022
El Hamma	Alger	Osmose Inverse	200 000	Juillet 2008
Corso	Boumerdes	Osmose Inverse	80 000	Janvier 2023
Cap Djinet I	Boumerdes	Osmose Inverse	100 000	Juillet 2012
Béni Saf	Ain T'émouchent	Osmose inverse	200 000	Mars 2010
Bateau Cassé	Alger	Osmose Inverse	10 000	Avril 2022
Fouka II	Tipaza	Osmose Inverse	300 000	Février 2025
El Taref	El Taraf	Osmose Inverse	300 000	Février 2025
Cap Blanc	Oran	Osmose Inverse	300 000	Février 2025
Cap Djanet II	Boumerdes	Osmose Inverse	300 000	Février 2025
Tighremt	Bejaïa	Osmose Inverse	300 000	En construction

# *Chapitre II*

*Les différentes techniques de  
dessalement de l'eau de mer*

### II. Divers procédés de dessalement :

Le dessalement consiste à éliminer les sels de l'eau salée ou saumâtre. Il existe plusieurs méthodes de dessalement sur le marché mondial, en fonction de la source d'énergie utilisée pour faire fonctionner l'équipement de dessalement.

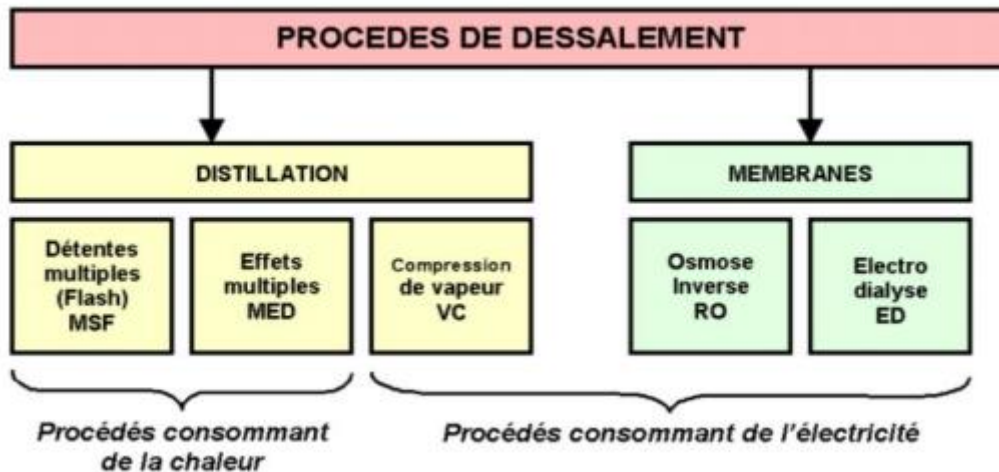


Figure 3. Les divers procédés de dessalement (Maurel, 2006).

Les deux principales techniques de dessalement sont :

1. Les procédés thermiques : basés sur le principe de l'évaporation et de la condensation successive.
2. Les techniques membranaires : qui exploitent la capacité de certaines membranes à retenir les particules dissoutes dans l'eau (Alain, 2006).

#### II.1. Procédé thermique :

##### II.1.1 La distillation :

La méthode la plus courante pour dessaler l'eau de mer est la distillation thermique. Elle consiste à chauffer l'eau de mer jusqu'à ce qu'elle s'évapore. Les sels et autres impuretés restent dans le réservoir, tandis que la vapeur est condensée pour produire de l'eau douce. Cette méthode repose sur un principe simple, utilisé depuis longtemps. Elle repose sur l'ébullition de l'eau à une température plus basse sous pression. En général, cette méthode utilise la distillation sous vide, ce qui permet de travailler à des températures inférieures à 120°C. (Méricq, 2009).

### II.1.1.1 Distillation à simple effet :

La plus ancienne méthode de dessalement de l'eau de mer consiste à la faire bouillir dans un récipient fermé. La vapeur produite se condense au contact d'un autre tuyau, refroidi par de l'eau de mer froide, et les gouttelettes d'eau sont recueillies dans un réservoir. Une pompe électrique récupère l'eau distillée, tandis qu'une autre pompe récupère la saumure (Danis, 2003).

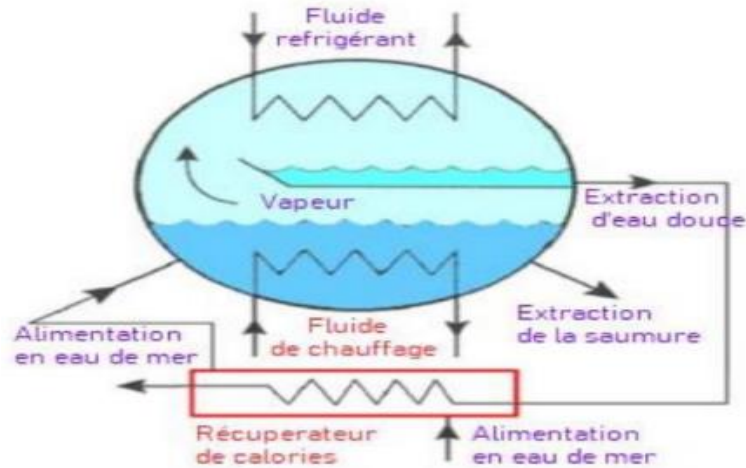


Figure 4. Distillation à simple effet (Danis, 2003).

### II.1.1.2 Distillation à multiples effets (MED) :

La distillation multi-effets (MED) reprend le principe de la distillation simple effet, la différence entre les deux technologies étant qu'il y a plusieurs unités (ou effets) installées en parallèle. Dans la première unité, la plus chaude, le fluide caloporteur chauffe l'eau de mer jusqu'à ce qu'elle s'évapore, produisant de la vapeur qui est ensuite utilisée pour chauffer l'eau. Cette vapeur est utilisée pour chauffer l'eau de mer dans la deuxième unité et est recyclée dans l'unité de refroidissement pour produire de l'eau douce. La saumure et le distillat sont collectés dans chaque bassin. La pression et la température sont progressivement réduites d'une unité à l'autre (Kuntz, 2012).

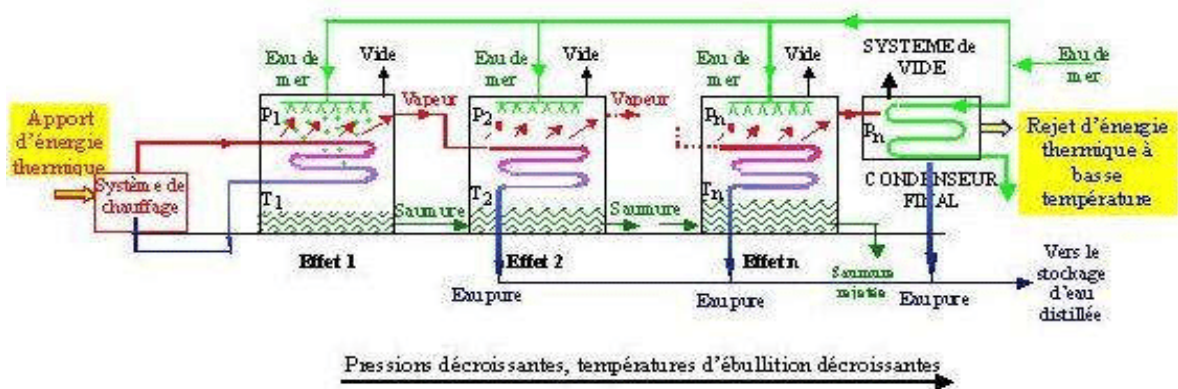
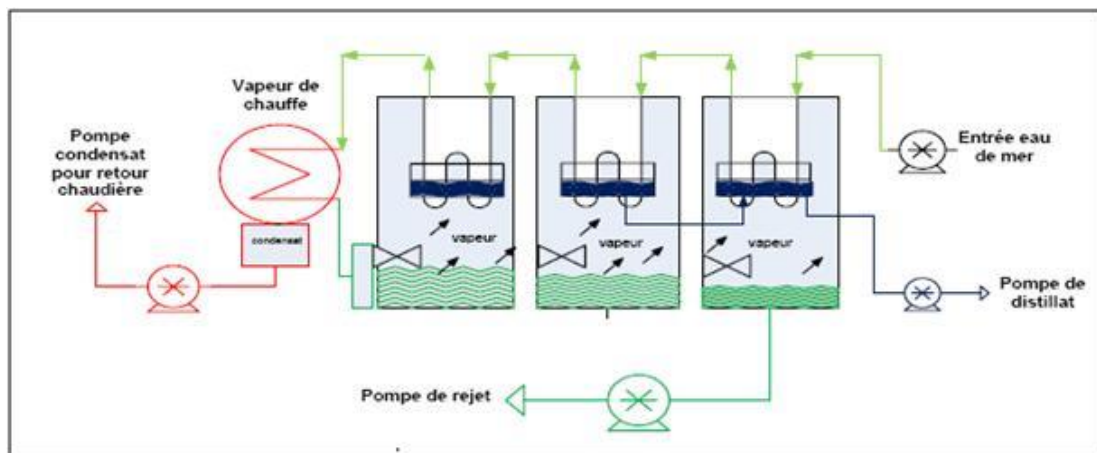


Figure 5. : Distillation à multiples effets (Danis, 2003)

### II.1.1.3 Distillation flash (Multi-Stage Flash MSF) :

Y compris le maintien de l'eau sous pression tout au long du processus. Après avoir été chauffée, lorsqu'elle atteint une température d'environ 120°C, elle est introduite dans une enceinte chambre (ou étage) de décompression. La vaporisation instantanée provoquée par la relaxation est appelée « flash ». Une partie de l'eau s'évapore, puis se condense sur le tube du condenseur situé au sommet de l'enceinte et l'eau liquide est recueillie dans le récipient situé sous le tube. (Maurel, 2006).



**Figure 6.** Principe de fonctionnement d'un système par décharges successives (MSF)  
(UNEP/MAP, 2003)

### II.1.1.4 Distillation par compression de vapeur :

La compression de vapeur est une méthode à faible consommation d'énergie pour obtenir de l'eau douce (Bandelier, 2016).

Elle consiste à chauffer de l'eau salée dans un environnement isolé, ce qui crée de la vapeur. Cette vapeur est ensuite aspirée par un compresseur qui la chauffe jusqu'à 138°C. Cette vapeur est ensuite refroidie et transformée en eau douce par ébullition de l'eau salée (Maurel, 2006).

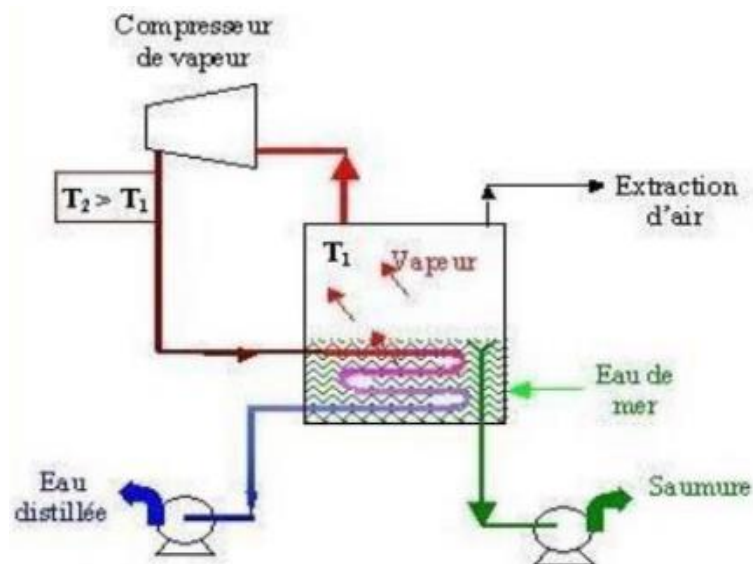


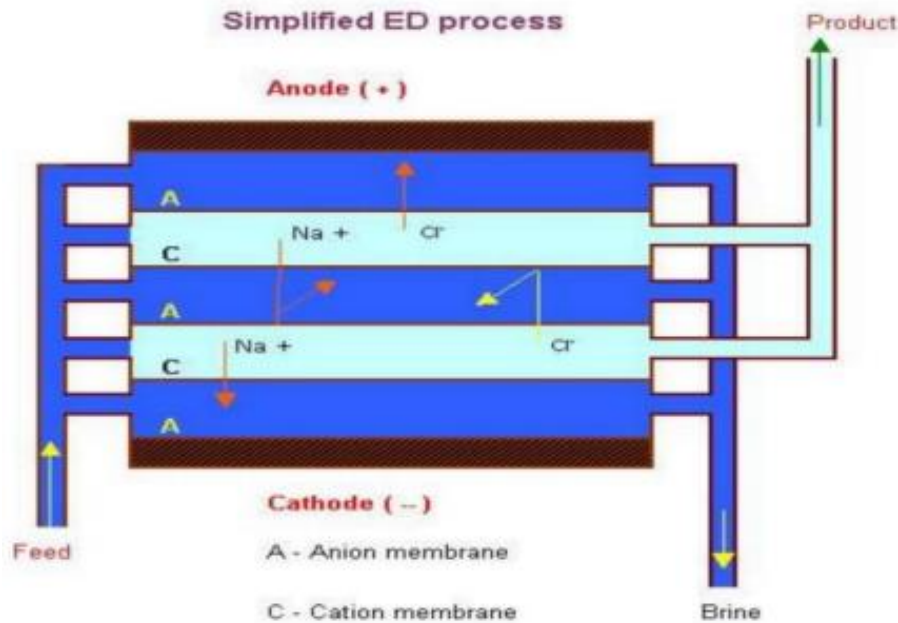
Figure 7. Compression mécanique de vapeur (Danis, 2003)

### II.2. Procédés membranaires :

Les membranes peuvent faire la distinction entre les sels et l'eau et les séparer efficacement. Deux méthodes de dessalement de l'eau ont ainsi été créées en utilisant cette capacité de différentes manières : l'électrodialyse et l'osmose inverse (Hanane, 2008).

#### II.2.1. L'électrodialyse :

L'électrodialyse utilise des membranes pour transférer les ions des sels dissous, grâce à un champ électrique qui attire les cations vers l'électrode négative et les anions vers l'électrode positive. Les usines sont constituées de compartiments empilés de membranes anioniques et cationiques, un compartiment sur deux contenant de la saumure concentrée et un compartiment sur deux de l'eau purifiée (Bruggen, 2003).



**Figure 8.** Procédé d'électrodialyse simplifié

### II.2.2. L'osmose inverse :

Ce procédé utilise une membrane hydrophile pour produire de l'eau douce à partir d'eau salée sans changement de phase. L'eau est forcée de traverser la membrane à une pression plus élevée que celle de l'eau de mer, laissant derrière elle les sels dissous et augmentant la concentration en sel. La pression de l'eau de mer est augmentée dans l'échangeur de pression, transférant l'énergie à la saumure résiduelle, ce qui réduit les coûts d'exploitation. La pression requise varie entre 50 bars pour l'eau de mer et 20 bars pour l'eau saumâtre (**Bruggen, 2003**).

La pression osmotique dépend de la quantité de nourriture. Un système de dessalement d'eau de mer se compose de quatre parties :

- Prétraitement de l'eau
- Pompes à membrane haute pression
- Séparation des membranes
- Post-traitement.

**Lafigure 9** illustre le fonctionnement du système de dessalement par osmose inverse. Le système de dessalement par osmose inverse est très coûteux. Sans récupération d'énergie, il peut consommer 6 à 8 kWh/m<sup>3</sup> mais avec la récupération d'énergie, la consommation peut être réduite à 4-5 kWh/m<sup>3</sup>. Cependant, le système d'osmose inverse peut rencontrer des problèmes dans la phase de

prétraitement, et les membranes peuvent être affectées par l'encrassement. En outre, la température ne doit pas dépasser 40°C pour éviter d'endommager les membranes (Moch, 2002).

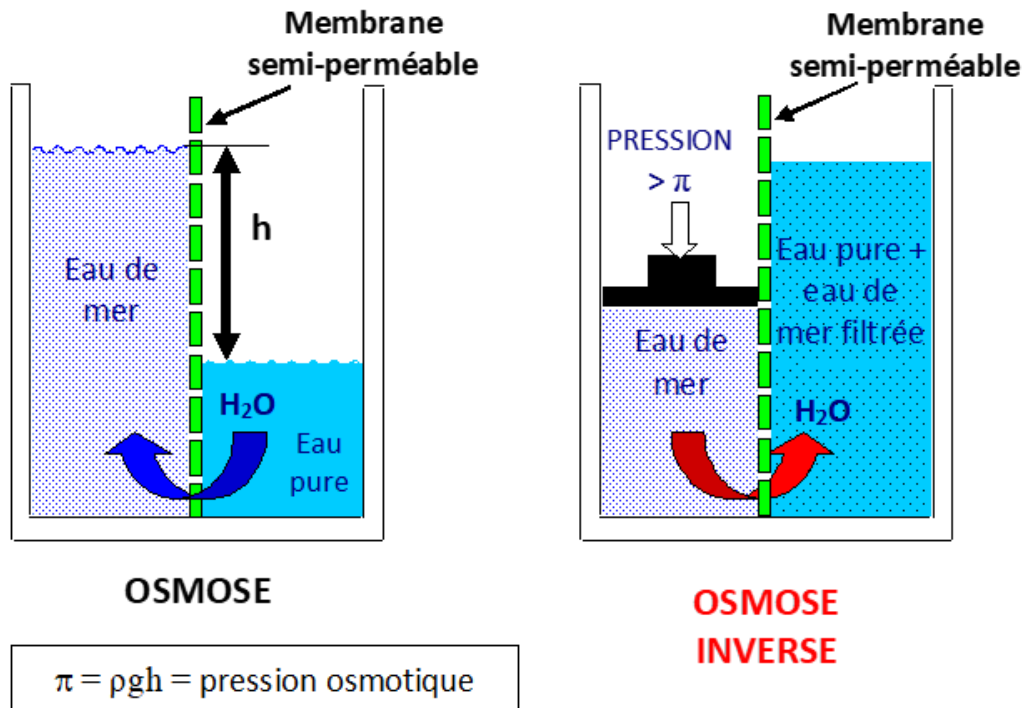


Figure 9. Schéma expliquant le principe d'osmose inverse (Bushnak, 2012).

### II.3. Les rejets de chaque méthode de dessalement :

Les procédés de dessalement de l'eau de mer engendrent des rejets aux caractéristiques physico-chimiques variables salons la technologie utilisée. La nature, la température et la composition chimique de ces rejets influencent fortement leur impact environnemental, notamment sur les écosystèmes marins côtiers.

**Tableau 2.** Ci-dessous présent un comparatif des principaux types de rejets générés par les différentes techniques de dessalement :

Technique	Type de rejet principal	Température du rejet	Salinité du rejet	Rejets chimiques notables
<b>Osmose inverse (RO)</b>	Saumure concentrée	~0,5 à 1°C au-dessus	1,3 à 1.7 fois l'eau de mer	Anti-scalants, biocides, nettoyeurs acides
<b>Distillation multi-effet (MED)</b>	Saumure chaude	40–60°C	~10 % plus salée que l'eau d'alimentation	Anti-scalants, acides pour nettoyage
<b>Vaporisation instantanée multi-étagée (MSF)</b>	Saumure chaude	45–55°C	1.1 fois plus salée que l'eau d'alimentation	Anti-scalants, acides pour nettoyage
<b>Électrodialyse (ED/EDI) Technique</b>	Concentrat ionique	Température ambiante	Variable selon l'eau d'entrée	Faible, dépend du prétraitement
<b>Distillation simple effet</b>	Saumure très chaude	70–90°C	+10–15 % vs eau de mer	Anti-scalants, acides
<b>VC (compression vapeur)</b>	Saumure chaude	35–45°C	Concentrée (selon récupération)	Peu d'additifs

### ➤ Définition du rejet de la saumure :

Après le processus de dessalement, l'eau est séparée en deux parties :

- Le perméat (la fraction de l'eau qui a été dessalée).
- Le concentré (concentration élevée, rejetée dans la mer).

Ce dernier contient une très forte concentration de sel, car il combine les quantités de sel présentes dans l'eau avant le processus de dessalement, ainsi que les produits chimiques utilisés pour le prétraitement et l'entretien de l'usine.

Bien que le nombre de publications scientifiques sur le sujet soit limité les rejets de saumures fortement chargées entraînent des variations de la composition chimique de l'eau de mer, altérant l'équilibre des écosystèmes et de l'environnement marin, en plus la réduction de la concentration en oxygène dissous a un impact sur la vie des espèces marines.

Les propriétés physico-chimiques de l'eau de mer, ainsi que sa fraction vivante L'entartrage et la corrosion des équipements des usines de dessalement ne sont que deux des problèmes rencontrés en cours d'exploitation.

## **Chapitre II : Les différentes techniques de dessalement de l'eau de mer**

---

Les solutions à trouver pour la production d'eau par dessalement sont le choix du bon procédé dans tous ses aspects économiques, technologiques et environnementaux, la neutralisation et le traitement de la saumure, les dosages précis dans les traitements de correction de l'eau à dessaler.

# *Chapitre III*

## *Impacts environnementaux des activités de dessalement*

### **III. Introduction :**

Les technologies de dessalement présentent à la fois des avantages et des inconvénients pour l'environnement. Le principal avantage réside dans la création de volumes supplémentaires d'eau douce pour répondre à la demande croissante en eau et atténuer la crise de l'eau. Cependant, quel que soit le type de dessalement utilisé, il existe un certain nombre d'impacts négatifs sur l'environnement qui touchent principalement le milieu marin ainsi que la faune et la flore aquatiques. Ces impacts proviennent des rejets (saumure) produits lors du dessalement, tels que les produits chimiques utilisés dans le nettoyage.

#### **III.1. Les avantages de dessalement :**

Le principal effet positif direct du dessalement est l'augmentation de la disponibilité de l'eau. En effet, il permet d'accéder à une ressource garantie et indépendante des aléas climatiques, contribuant ainsi à résoudre une situation de pénurie et de stress hydrique pour les populations. Grâce aux progrès réalisés dans la construction des stations de dessalement. La consommation moyenne d'eau en Algérie est passée à 185 l/j/habitant par rapport à l'année 2000, selon le ministère des ressources en eau.

L'autre effet positif du dessalement concerne l'aspect socio-économique au niveau local et régional. Pendant la période de construction, la main-d'œuvre proviendra certainement des environs immédiats.

Une part relativement importante des travaux est généralement réalisée par des entreprises locales ou régionales (terrassement, fourniture et livraison de matériaux, génie civil, voirie et réseaux divers, pose de canalisations, etc.)

#### **III.2. Les impacts négatifs de dessalement :**

##### **III.2.1. Effets de prélèvement de l'eau de mer :**

Les usines de dessalement d'eau de mer disposent de dispositifs de prise d'eau situés au large qui leur permettent de prélever de grandes quantités d'eau à proximité de certains habitats marins, Ce processus a des impacts potentiels sur la flore et la faune de la région, Par exemple, des tambours de dégrillage sont souvent placés entre le dispositif de prise d'eau et les pompes d'alimentation pour empêcher les débris flottants, les organismes marins encombrants et d'autres matières d'entrer dans le circuit de prétraitement, Cependant le prélèvement représente deux sources potentielles d'impact :

- L'impact des poissons et autres organismes marins sur les tambours, entraînant des dommages physiques tels que l'écaillage et des perturbations telles que la désorientation, l'augmentation de la mortalité due aux maladies et une vulnérabilité accrue à la prédation.

- L'introduction de biote dans le circuit d'eau d'alimentation, qui constitue une menace majeure pour le phytoplancton et le zooplancton.
- Les principaux impacts associés au passage dans les circuits de prétraitement et de dessalement sont liés à des activités telles que la chloration, les lésions de cisaillement et les changements rapides de pression dans le circuit. La conséquence générale de l'entraînement des organismes dans le circuit est une réduction du recrutement pour les habitats existants et une baisse de la productivité de l'écosystème.

### III.2.2. Effets des produits chimiques :

Toutes les usines de dessalement utilisent des produits chimiques pour le prétraitement de l'eau d'alimentation et le post-traitement de l'eau produite. La plupart des produits sont utilisés principalement comme biocides, antitartres (Anti-scalants), Coagulants et agents anti-mousse, Produits de lavage des membranes, et ils finissent par modifier la composition de la saumure concentrée. Ces produits chimiques peuvent différer en fonction des principaux procédés de dessalement, à savoir MSF et l'osmose inverse.

\*Les produits chimiques rejetés dans le milieu marin se répartissent entre les catégories suivantes :

#### **Biocides :**

Dans la plupart des usines de dessalement, le chlore est ajouté à l'eau de capture pour réduire l'encrassement biologique, ce qui entraîne la formation d'hypochlorite et principalement d'hypobromite dans l'eau de mer. Des niveaux de chlore résiduel (libre et combiné) de 200 à 500µg/L ont été rapportés pour les flux de rejet des usines de distillation, soit environ 10 à 25 % de la concentration de dosage.

Dans les installations d'OI, l'eau du robinet est également chlorée, mais est à nouveau décolorée avec du bisulfite de sodium avant que l'eau n'entre dans les unités d'OI afin d'éviter d'endommager la membrane.

Le chlore est un biocide très efficace et sa toxicité a été confirmée par de nombreuses études toxicologiques sur le site sur la base des données toxicologiques d'un large éventail d'espèces marines, l'EPA recommande un critère de qualité de l'eau à long terme pour le chlore dans l'eau de mer de 7,5 µg / L et un critère à court terme de 13 µg / L.

Les impacts potentiels résultent également de la formation de sous-produits organiques halogénés. En raison des nombreuses réactions possibles de l'hypochlorite et de l'hypobromite avec les constituants organiques de l'eau de mer, la diversité des sous-produits est élevée, y compris les trihalométhanes (THM) tels que le bromoforme ou les acides halogénoacétiques.

Les augmentations des niveaux de THM près des installations de distillation allant jusqu'à 9,5 µg / L et jusqu'à 83 µg / L ont été signalées. Étant donné que seuls quelques pour cent du chlore total ajouté sont récupérés sous forme de sous-produits halogénés, et que la diversité des sous-produits sont élevés, on peut s'attendre à ce que la concentration environnementale de chaque substance soit relativement faible. Une évaluation des risques n'a pas pour but d'obtenir des données sur la toxicité de toutes les espèces chlorées et bromées.

#### **Métaux lourds :**

Les rejets de saumure des usines d'osmose inverse ne contenant que des traces de certains métaux lourds (comme les traces de fer, de nickel, de chrome et de molybdène), la contamination environnementale induite est généralement insignifiante et n'a donc pas d'effet sur la faune et la flore locales (Dawoud et Al Mulla, 2012). En revanche, les quantités de métaux lourds (comme le cuivre) rejetées par les installations de distillation sont plus importantes et peuvent donc affecter les organismes situés dans la zone de rejet, car ils se retrouvent dans les matières en suspension dont se nourrissent les micro-organismes planctoniques. Une augmentation des teneurs en cadmium a été observée chez la crevette *Artemia franciscana* dans les zones de rejet de saumure (PNUE, 2008). Au-delà de certains seuils de concentration, ces substances sont toxiques, voire mortelles, et peuvent déstabiliser certains niveaux du réseau trophique et l'équilibre de l'écosystème.



**Figure 10.** Crevette *Artemia franciscana* (Aquaportail, 2014)

#### **Anti-scalants :**

Des agents antitartre sont ajoutés à l'eau d'alimentation des centrales thermiques et des installations à membrane pour empêcher la formation de tartre.

Le terme se réfère à des substances polymères ayant différentes structures chimiques, en particulier acides poli-carboniques (par exemple l'acide poly-maléique) et phosphorâtes. Les poly-phosphates et l'acide sulfurique sont également utilisés pour empêcher la formation de tartre, mais à une échelle limitée. La toxicité de tous les antitartres pour la vie aquatique est très faible.

D'autre part, les acides polycarbonates et les phosphorâtes sont des substances stables avec de faibles taux de biodégradation, ce qui se traduit par des durées de vie relativement longues dans les eaux côtières.

#### **Coagulants :**

Des coagulants (tels que le chlorure ferrique) et des adjuvants coagulants (tels que des composés organiques de poids moléculaire élevé comme le polyacrylamide) sont ajoutés à l'eau d'alimentation pour la coagulation et la filtration des matières en suspension.

L'eau de lavage des filtres contenant des matières en suspension et des coagulants est généralement rejetée dans l'océan sans avoir été traitée. Les produits chimiques eux-mêmes ont un potentiel toxique très faible. Toutefois, leur rejet peut entraîner une coloration intense du flux de décharge si des sels ferriques sont utilisés (saumures rouges), ce qui peut augmenter la turbidité et réduire la pénétration de la lumière, ou peut ensevelir des organismes sur le site de décharge.

#### **Agents anti-mousse :**

Pour réduire la formation de mousse dans les centrales thermiques, des agents anti-mousses tels que le polyéthylène et le polypropylène glycol peuvent être ajoutés à l'eau d'alimentation.

Les poly-glycols ne sont pas toxiques, mais peuvent être assez persistants dans l'environnement en raison de leur faible biodégradabilité.

#### **Produits de nettoyage des membranes :**

La procédure de nettoyage dépend du type d'encrassement. Dans les installations d'OI, des solutions alcalines (pH 11-12) sont utilisées pour éliminer les dépôts calcaires et les biofilms des membranes, tandis que des solutions acides (pH 2-3) sont appliquées pour dissoudre les oxydes ou les écailles métalliques.

Ces solutions contiennent souvent des produits chimiques supplémentaires pour améliorer le processus de nettoyage, tels que des détergents (par exemple, sulfate de dodécyle, sulfonates de dodécylbenzène) ou des oxydants (par exemple, perborate de sodium, hypochlorite de sodium).

Après le nettoyage ou avant le stockage, les membranes sont généralement désinfectées. À cette fin, des biocides oxydants (tels que le chlore et le peroxyde d'hydrogène) ou des biocides non oxydants (tels que le formaldéhyde, le glutaraldéhyde ou l'isothiazole) peuvent être appliqués.

Les installations de distillation sont généralement lavées avec de l'eau de mer acide et chaude afin d'éliminer le tartre alcalin des surfaces des échangeurs de chaleur, qui peuvent contenir des inhibiteurs de corrosion (par exemple, des dérivés du benzotriazole).

Les solutions de nettoyage, en particulier leurs additifs, peuvent nuire à la vie aquatique si elles sont déversées dans les eaux de surface sans traitement.

### III.2.3. Les effets de la hausse de la salinité et la température sur l'écosystème marin :

La plupart des organismes peuvent s'adapter à de faibles variations de température et de salinité, et même tolérer temporairement des conditions extrêmes ; ils ne peuvent cependant pas résister à des conditions défavorables permanentes. Le rejet continu d'eau à forte salinité et haute température, induisant une réduction de la teneur en oxygène, peut être fatal pour certains organismes et induire un changement durable de la diversité et de l'abondance des espèces dans la zone impactée. (Dawoud et Al Mulla, 2012)

Une étude de (Mabrouk, 1994) a ainsi mis en évidence une disparition des coraux et des organismes planctoniques et une réduction des populations de poissons à proximité du rejet de l'usine de dessalement égyptienne d'Hurghada, en Mer Rouge. Les récifs coralliens constituent l'un des milieux les plus riches des océans et des mers, mais ils sont très sensibles aux changements des conditions environnementales, tels que l'augmentation de la température de l'eau et de la salinité locale. Le même phénomène a été observé dans d'autres zones de déversement, comme le long de la côte de Palestine colonisée d'Aqaba-Eilat. (Elimelech et Phillip, 2011).



**Figure 11.** Coraux en mer rouge (Egypte) ;(plongeur.com, 2011)

Par ailleurs nous avons Les herbiers de posidonies, un habitat riche où une grande variété d'espèces vivent et se reproduisent en Méditerranée, sont également très sensibles aux variations de salinité et sont donc menacés par les rejets de saumure. Ces rejets peuvent entraîner une nécrose des tissus et une chute accrue des feuilles des posidonies méditerranéennes. Les niveaux de salinité qui affectent ces plantes varient considérablement d'une espèce à l'autre : La posidonie méditerranéenne ne peut tolérer que des augmentations d'environ 1 mg/l, alors que d'autres espèces de plantes peuvent supporter des augmentations allant jusqu'à 20 mg/l.



**Figure 12.** Herbiers de posidonie (Méditerranée) (Cambridge et al, 2019)

D'autres études ont également révélé que ces augmentations de température et de salinité peuvent également entraîner une réduction de la diversité et de l'abondance de la macrofaune benthique (= organismes vivant sur le fond) : c'est le cas, par exemple, dans la zone de rejet de l'usine de dessalement de Dhekelia (Chypre). Avant la mise en service de l'usine, une répartition équilibrée de la faune a été observée : 27% de polychètes 27% d'échinodermes (dont étoiles de mer, oursins, etc.), 26% de scaphopodes et 20% de gastéropodes (mollusques). Trois ans d'exploitation plus tard, la population de polychètes avait explosé (80% de la faune benthique), alors que les populations des autres groupes animaux avaient drastiquement diminué (UNEP, 2003). Cette étude montre également que les populations d'algues macroscopiques (observables à l'œil nu) de type *Cystoseira barbata* ont diminué, tandis que les algues microscopiques ont complètement disparu dans un rayon de 100 mètres autour de la décharge.



**Figure 13.** Néréide ; un polychète (ecosociosystemes.fr, 2011)

### **III.2.3. Utilisation de l'énergie :**

Les usines de dessalement nécessitent des quantités importantes d'énergie thermique et/ou électrique, en fonction du processus : pour un mètre cube d'eau produite, 12 kWh d'énergie thermique et 3,5 kW h d'énergie électrique sont nécessaires dans les usines MSF, qui ont une température de fonctionnement maximale de 120 °C. Ces chiffres sont inférieurs pour les usines MED, qui fonctionnent à des températures plus basses (<70 °C) et nécessitent 6 kWh de chaleur et 1,5 kWh d'énergie électrique par mètre cube. Ces chiffres sont inférieurs pour les usines MED, qui fonctionnent à des températures plus basses (<70°C) et nécessitent 6 kWh de chaleur et 1,5 kWh d'énergie électrique par mètre cube.

Le processus d'OI nécessite entre 4 et 7 kW h / m<sup>3</sup> en fonction de la taille de l'usine et des systèmes de récupération d'énergie installés pour illustrer ces chiffres, une usine d'osmose inverse de taille moyenne d'une capacité d'environ 25 000 m<sup>3</sup> /m<sup>3</sup> est considérée comme un exemple. Une usine d'OI de taille moyenne avec une capacité d'environ 25 000 m<sup>3</sup> /jour et une demande d'énergie de 5 kW h / m<sup>3</sup> consomme environ 125 000 kW h /jour. L'usine peut fournir de l'eau à environ 48 000 ménages de quatre personnes, tandis que l'énergie utilisée pour le processus de dessalement peut fournir de l'électricité à environ 10 300 ménages de quatre personnes.

Les problèmes environnementaux associés à la demande d'énergie et indirectement associés au processus de dessalement sont l'émission de polluants atmosphériques et la production d'énergie, la source de carburant et le transport de carburant. (C. Fritzmann, J. Löwenberg, T. Wintgens, T. 2007).

### **III.2.4. Émissions dans l'atmosphère :**

En général, les émissions atmosphériques des usines de dessalement se composent uniquement d'azote et d'oxygène. uniquement d'azote et d'oxygène provenant des usines de distillation utilisant des procédés de désaération pour réduire la corrosion, et des émissions provenant des dégazeurs (usines d'osmose inverse).

En outre, la production d'énergie destinée aux usines de dessalement augmente les émissions atmosphériques. Des augmentations substantielles des émissions atmosphériques peuvent également se produire si une centrale thermique ou une installation de production couplée est construite dans le cadre d'un projet de dessalement. Une méthode de calcul de l'énergie nécessaire au dessalement, présentée par Wade et Fletcher (1995), donne les apports de chaleur pour des usines typiques, par kilogramme d'eau produite.

# *Chapitre IV*

## *Matériels et Méthodes*

### IV. Dessalement en Mostaganem (cas d'étude) :

#### IV.1. Description de la station de Mostaganem :

Une station de dessalement d'eau de mer a été créée à Mostaganem (plage de Cheliff), a une capacité de production d'eau potable de 200.000m<sup>3</sup> /j. L'usine de dessalement de Mostaganem est conçue pour fournir l'eau potable répondant aux exigences de qualité prescrites, tout en visant une consommation spécifique d'énergie électrique inférieure à celle garantie contractuellement (3.40 kWh/m<sup>3</sup>). GS INIMA et AQUALIA sont des sociétés espagnoles spécialisées dans des activités associées au traitement de l'eau avancée. En partenariat avec l'Union Temporaire des Entreprises Opération & Maintenance Mostaganem UTE O&M MTM, ils ont créé une station de dessalement des eaux en 2005 qui se trouve à SONCTAR dans la ville de Mostaganem. Son mise en service en 2011.

Le projet de la station de dessalement de l'eau de mer de wilaya de Mostaganem fait partie du grand programme mis en place par le gouvernement Algérien pour la construction de stations de dessalement, dans le but de fournir de l'eau douce aux populations par une autre source et de permettre le renouvellement des nappes phréatiques.

#### IV.2. Le procédé de traitement d'eau de la station de Mostaganem :

La méthode de dessalement utilisé dans la station de Mostaganem se fait par quatre systèmes principaux :

- ❖ Un système de captage et pompage d'eau de mer.
- ❖ Un système de prétraitement de l'eau de mer par filtration et microfiltration.
- ❖ Un système de déminéralisation de l'eau micro-filtré par osmose inverse.
- ❖ Un système de reminéralisations et conditionnement de l'eau déminéralisé.

##### IV.2.1. Le système de captage et pompage d'eau de mer :

La première opération se déroule au niveau de « la tour de captage de l'eau de mer » à partir deux émissaires de captage dont le diamètre nominal est de 1800 mm, placé à une profondeur de 16 m sur une longueur de 2500 m, l'écoulement vers le réservoir d'eau de mer est gravitaire.

La figure ci-dessous représente les filtres rotatifs qui suppriment les grosses impuretés.



**Figure 14.** Filtre rotatif.

Ensuite, cette eau est pompée à l'aide de 8+1 pompes centrifuges horizontales dont une de réserve (veille), au débit de 9000 m<sup>3</sup>/h.

### **IV.2.2. Le système de prétraitement de l'eau de mer par filtration et microfiltration :**

L'objet du système destiné à éliminer fondamentalement les éléments solides, les algues et la matière organique pour protéger et maximiser la performance du système d'osmose inverse. Le système de prétraitement comprend deux sous-systèmes : Sous-système de filtration et Sous-système de microfiltration.

**a. Sous- système de filtration :** L'usine est équipée avec deux étapes de filtration, une première étape avec des filtres mixtes à sable - anthracite et une seconde étape avec des filtres à sable.

#### **a.1. Filtration de première étape :**

L'usine est équipée de deux lignes de filtration de premier niveau avec douze (12) filtres horizontaux sous pression chacune, fonctionnant à une vitesse de 8,45 m/h/ et à une vitesse maximale de 9,46 m/h.

Lors du lavage d'un des filtres, la quantité d'eau filtrée est divisée par les autres filtres.

Chaque filtre a une surface de filtration moyenne de 91,39 m<sup>2</sup>, un diamètre de 4,00 m et une longueur totale de 24,04 m.

#### **a.2. Filtration de deuxième étape :**

Il y a deux batteries de huit (8) filtres horizontaux à pression chacune, travaillant à une vitesse de 12,87 m/h avec un maximum de 15,09 m/h/, lorsqu'une batterie est en train de nettoyer, l'autre prend le relais.

Chaque filtre a une surface moyenne de 90,04 m<sup>2</sup> et ses dimensions et caractéristiques sont les mêmes que celles des filtres à sable du premier étage.

### **b. Sous- Système de microfiltration :**

La fonction du système de microfiltration est de protéger le système d'osmose inverse empêchant ainsi le pompage à haute pression. La microfiltration ne permet de passer que des particules de taille inférieure à 5 microns.

Le système de microfiltration consiste à deux lignes équipées avec neuf filtres chacune. Chaque filtre est muni 365 cartouches de 1250 mm de longueur. Le débit unitaire par cartouche est de 2,85m<sup>3</sup>/h, lorsque les neuf seront en activité il atteindra celui de 3,2m<sup>3</sup>/h. Les cartouches sont logées dans une carasse en PREV. Les cartouches sont fabriqués en polypropylène de 1250 mm de longueur.

### **IV.2.3. Le système de déminéralisation de l'eau micro-filtré par osmose inverse :**

Le système d'osmose inverse est le cœur de l'usine et sa fonction est réduire la teneur en sels de l'eau micro-filtrée. L'osmose inverse est un procédé de purification de l'eau inspiré du phénomène chimique appelé l'osmose en inverse. Pour mettre place le principe de l'Osmose, on sépare 2 solutions aqueuses de concentrations différentes par une membrane semi-perméable qui ne laisse passer que l'eau pure. La solution dont la concentration est la plus basse va alors chercher à équilibrer les concentrations des 2 solutions en faisant passer de l'eau pure (H<sub>2</sub>O) dans le compartiment de la solution dont la concentration est la plus élevée. L'eau micro filtrée arrive au système de pompage de haute pression puis envoyée vers les membranes d'osmose inverse.

#### **a. Pompe à haute pression :**

Avant d'entrée dans les membranes d'OI, l'eau prétraitée arrive au système de pompage de haute pression généralement 2,5 bars. Les pompes se trouvant dans notre cas sont en nombre de 9 dont 8 sont fonctionnelles et une de secours, en fournissant une pression totale de l'ordre de 62 bars.

#### **b. Systèmes de membranes d'osmose inverse :**

L'installation se compose de huit unités, chaque unité est répartie en deux châssis. Chacun de ses derniers comporte 152 tubes de pressions. Les tubes de pression sont disposés pour avoir un taux de conversion de 45%, Dans chaque tube sont placées 7 membranes spirales en polyamide aromatique avec un diamètre de 200 mm.



Figure 15. Les tubes de pression.

### IV.2.3.1 Récupération d'énergie :

#### a. Présentation du système :

La récupération de l'énergie contenue dans la saumure en sortie des membranes est assurée à l'aide de chambres à haute pression. Cette opération est effectuée via le système PX-220 (Pressure Echanger) de la marque ERI, permettant de récupérer jusqu'à 97 % de l'énergie issue du rejet de la saumure.

Les effluents sous pression provenant des membranes sont dirigés vers l'échangeur PX, qui transfère cette pression à l'eau de mer prétraitée. Cette dernière est ensuite renvoyée vers les membranes, alimentée par l'énergie récupérée du concentrât.

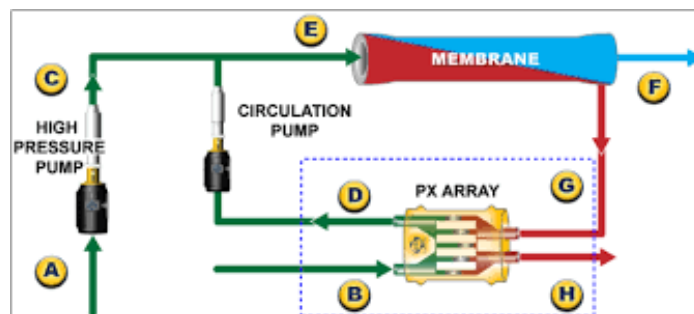
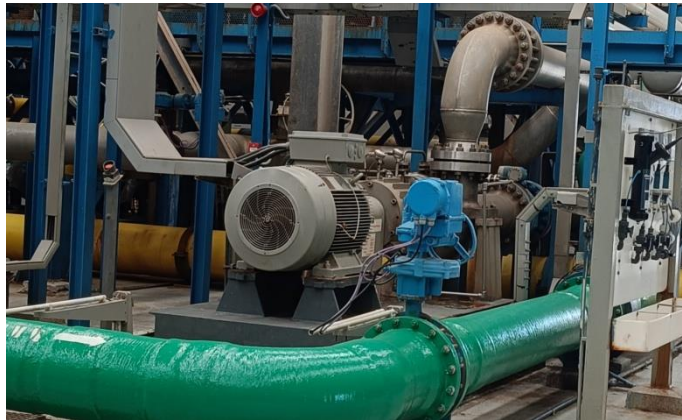


Figure 16. Système de récupération d'énergie .

#### b. Pompes BOOSTER :

Chaque unité d'osmose inverse est équipée d'une pompe haute pression (HP), de deux châssis de membranes d'osmose inverse, ainsi que de deux pompes BOOSTER, toutes reliées à la pompe HP par un même axe de rotation.

Les pompes BOOSTER ont pour rôle principal de compenser les pertes de charge générées par les membranes et les échangeurs de pression (PX). Le concentrât, sous pression, alimente les pompes BOOSTER afin d'assister la pompe haute pression dans son fonctionnement.



**Figure 17.** La pompe BOOSTER.

### IV.2.3.2 Nettoyage chimique :

Par son usage les membranes d'osmose inverse sont obstruées lentement diminuant ainsi le débit produit par les mêmes. L'encrassement peut être dû aux matériaux colloïdaux, aux petites précipitations, etc. Dans le but de maintenir sous contrôle ces encrassements et restituer aux membranes une partie des propriétés perdues, il est nécessaire de les laver périodiquement.

Le lavage doit être fait obligatoirement dans le cas où :

- La perte de pression des membranes s'accroît de plus de 20% par rapport à la valeur initiale.
- Le passage des sels du module dépasse 30% de la valeur initiale.
- Le débit produit est inférieur à 15% du débit initial.

La fréquence des nettoyages dépend de la nature de l'eau. Il est recommandable de laver les membranes une fois tous les six mois, en moyenne.

Ce système a été conçu pour pouvoir laver les tuyaux d'un châssis complet à chaque fois, pour ainsi diminuer les opérations de nettoyage.

Ce système se compose de: un réservoir de 80 m<sup>3</sup> de capacité où se prépare la solution pour le nettoyage; des résistances pour chauffer la solution si nécessaire ; des interrupteurs de niveau d'un thermomètre et d'un transmetteur de température.

Il est équipé aussi d'un système d'agitation constitué à son tour par des éjecteurs et des pompes de refoulement avec un débit unitaire de 31 m<sup>3</sup>/h.

### IV.2.4 Système de reminéralisations et conditionnement de l'eau osmose :

L'eau issue du traitement de l'osmose inverse est débarrassée de tous les minéraux, c'est à- dire non consommable, une reminéralisations est nécessaire pour rendre cette eau potable.

L'injection automatique avec une dose de 25 ppm de CO<sub>2</sub> pour réduire le pH à une valeur proche de 5 qui permet de rendre plus efficace le processus de reminéralisations. Ce dernier est réalisé dans la chambre CO<sub>2</sub>.

L'eau est ensuite acheminée vers la tour de reminéralisations qui comporte à l'intérieur 32 lits de calcite (carbonate de calcium) de 2 m de hauteur, équipés par des tuyaux de distribution.

A travers ces lits de calcite l'eau traitée passe et s'enrichit du carbonate de calcium qui se dissout dans l'eau pour atteindre le fond (réservoir) par un canal à l'intérieur de la tour.

Après et à l'aide d'un doseur automatique, il y aura un ajout d'hypochlorite de sodium (15 l/h) à partir d'un tank (citerne) de capacité de 20 000 L.

A l'aide des pompes l'eau traitée est pompée vers le réservoir de stockage afin de la distribuer par l'ADE.



**Figure 18.** Le réservoir de stockage.

### IV.3. Analyses dans laboratoire :

Dans le cadre de cette étude, deux points de prélèvement ont été identifiés afin d'évaluer l'impact du processus de dessalement sur les caractéristiques physico-chimiques de l'eau :

1. A l'entrée de la station, correspondant à l'eau de mer brute.
2. A la sortie de la station, correspondant à l'eau de rejet (saumure).

Donc nous avons mesuré les paramètres physico chimique suivants : ph, conductivité, turbidité, température, salinité, TDS, calcium, chlorures, nitrate, nitrite, MES, fer, sulfate.

Ces analyses seront réalisées au niveau du laboratoire de control de qualité de la station, laboratoire de l'ADE et laboratoire de biochimie de l'université (LITA).

### IV.4. Prélèvement :

Les échantillons d'eau ont été prélevés pour analyse physico-chimique. L'échantillonnage doit être réalisé comme suit :

- Le récipient doit être propre, mais pas nécessairement stérilisé. Nous avons utilisé des bouteilles en plastique de 500 ml et 1 litre, et parfois des bouteilles en verre, qui sont préalablement rincées au moins trois fois avec de l'eau distillée.
- Laisser couler l'eau à débit maximal pendant 5 à 10 secondes, puis 2 à 5 minutes à débit moyen avant de prélever un échantillon.
- Ouvrir l'emballage, le remplir et le refermer immédiatement.

### IV.4.1 Procédures d'analyse :

#### 1. Mesure de ph :

Le PH permet de mesurer l'acidité d'une solution, cette mesure est faite avec un appareil multi paramètre à sonde (HACH, SL1000).



**Figure 19.** Appareil multi paramètre (HACH, SL1000)

#### ➤ Mode opératoire :

Mettre l'appareil en marche ; étalonner le avec de l'eau distillée ; plonger ensuite la sonde tout en agitant légèrement dans un bécher qui comporte environ 100 ml de notre échantillon ; laisser stabiliser et lire ensuite le taux de ph.

Il faut également rincer la sonde après chaque mesure.

#### 2. Mesure de température :

Pour des raisons de connaître la différence entre la température de l'eau de mer brute et l'eau rejet, Cette mesure de T° est effectuée sur les échantillons à l'aide d'un appareil multi paramètres (HACH, SL1000) au niveau du laboratoire.

### 3. Mesure de la conductivité :

La conductivité correspond à l'aptitude d'un milieu à transporter une courante électrique grâce aux ions qu'il contient.

La mesure de la conductivité se fait à l'aide d'un appareil multi-paramètres à sonde (HACH, SL1000), en suivant le même mode opératoire que le pH.

### 4. Mesure de TDS :

Les sels totaux dissous représentent une évaluation totale des sels minéraux contenus dans l'eau (en solution)

#### ➤ Mode opératoire :

Il s'agit de prélever 100ml de l'eau à analyser dans un bécher. L'eau est placée dans une étuve à 180°C pendant 24 heures.

Le bécher est ensuite placé dans un dessiccateur pour protéger l'eau de l'humidité, Peser immédiatement le contenu. (Le bécher vide n'est pas pesé avant l'expérience)

La masse obtenue est la différence entre la masse du bécher rempli d'eau  $m_1$  et celle du bécher vide  $m_0$ .

$$\text{TDS} = (m_1 - m_0) \times 100$$

### 5. Mesure de la turbidité :

La turbidité est due à la présence dans l'eau de particules minérales ou organiques en suspension, qu'elles soient vivantes ou détritiques. Ainsi, plus une eau contient de biomasse de phytoplancton ou de particules sédimentaires, plus elle est turbide.

La turbidité est mesurée à l'aide d'un turbidimètre (HACH, 2100P) qui est pré-calibré à 0,02 NTU. L'échantillon est analysé à l'aide de capsules de verre bien nettoyées et séchées, remplies avec l'eau à analyser et le résultat est affiché en NTU (Nephelometric Turbidity Unit).



**Figure 20.** Turbidimètre

### 6. Mesure de salinité :

La salinité est la mesure de la quantité de sels dissous dans l'eau, principalement du chlorure de sodium, mais aussi les autres sels.

La mesure de la salinité se fait à l'aide d'un appareil multi-paramètres à sonde (HACH, SL1000), en suivant le même mode opératoire que le pH et conductivité.

### 7. Détermination du taux de Calcium :

Cette manipulation consiste à la détermination de la teneur en calcium et en magnésium présentes dans l'échantillon par la méthode complexométrique. Le TH du calcium est déterminé à l'aide d'une solution aqueuse d'E.D.T.A (Ethyle-Diamine-Tétra-Acétique). (En présence d'une solution tampon et de rouge muréxide comme indicateur spécifique à un pH élevé (12-13). Il réagit d'abord avec les ions calcium libres, puis avec les ions combinés avec l'indicateur passant du rose au violet.

#### ➤ Réactifs :

- Solution titrée d'E.D.T.A à (0.02N).
- Solution tampon (pH= 9,2).
- Indicateur rouge de muréxide.

#### ➤ Mode opératoire :

- On prend 100 ml de l'eau à analyser dans un bicher de 250 ml, puis on ajoute 4 ml solution Hydroxyde de sodium à (2N), après ajouté 0.2 g de poudre de l'indicateur rouge Muréxide.
- On titre avec une solution EDTA (0.02N) goutte à goutte jusqu'au de virage de l'indicateur.

Les résultats sont donnés par l'expression suivante (mg/l):

$$[Ca^{2+}] = T_{Ca^{2+}} * 4.008$$

Avec : 40.08 g/mol= c'est la masse molaire du calcium

### 8. Mesure des Nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) :

#### ➤ Matériel nécessaire :

- Kit LCK339 (25 cuvettes avec réactifs) ;
- Pipettes (1 ml et 0,2 ml) ;
- Minuteur ;
- Spectrophotomètre HACH (DR 3900).

#### ➤ Mode opératoire :

- Prélever 1,0 ml de l'échantillon d'eau à analyser avec une pipette propre ;
- L'introduire lentement dans la cuvette LCK339 contenant le réactif ;

## Chapitre IV : Matériels et Méthodes

---

- Ajouter 0,2 ml de acide sulfurique concentré ( $H_2SO_4$ ) ;
- Fermer la cuvette et mélanger doucement en retournant la cuvette 2 à 3 fois ;
- Laisser réagir pendant 15 min a température ambiante ;
- Après 15 min, insérer la cuvette dans le spectromètre (HACH DR 3900) et lire la concentration de nitrate.

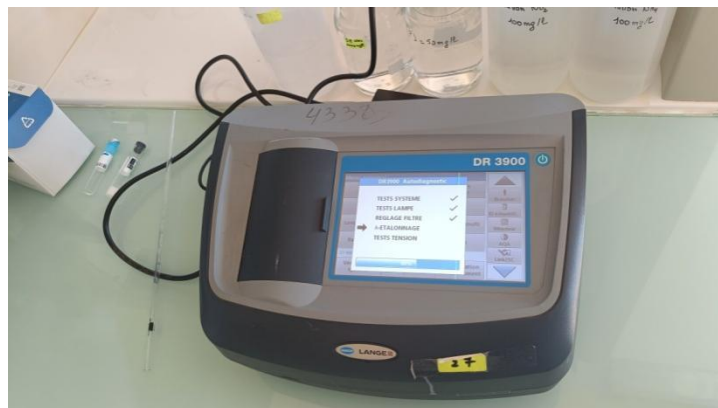
### 9. Mesure des nitrites ( $NO_2^-$ ) :

#### ➤ Matériel utilisée :

- Kit LCK341 (réactifs déjà intégrés dans les cuvettes) ;
- Pipettes (pour 2,0 ml) ;
- Minuteur ;
- Spectrophotomètre HACH (DR 3900).

#### ➤ Mode opératoire

- A l'aide d'une pipette, remplir une cuvette avec 2,0 ml d'échantillon ;
- Ajouter le contenu d'une gélule de réactif NitritiVer3 à la cuvette ;
- Boucher et agiter pour dissoudre la poudre ;
- Laisser un temps de réaction de 10 minutes ;
- Lire les résultats par spectrophotomètre (HACH DR 3900).



**Figure 21.** Spectrophotomètre (HACH DR3900)

### 10. Matières en suspensions (MES):

#### ➤ Matériels utilisée :

- -Eprouvette et fiole ;

- Etuve à 105°C ;
- Balance analytique ;
- Filtre en microfibrilles de verre wattman ;
- Pince plate ;
- Entonnoir.
- Une pompe.

➤ **Mode opératoire :**

- Peser le papier filtre (m0) à l'aide d'une balance analytique, puis poser dans un entonnoir dans une fiole ;
- Filtrer un volume de 500ml à travers le filtre en microfibre ;
- Sécher le filtre à 105°C pendant 1 heure ;
- Peser à nouveau le filtre (m1);
- Calculer la masse des MES par différence de poids.

$$MES (mg/l) = 1000(M1 - M0)/v$$

Avec :

V : volume de l'échantillon de l'eau de saline (ml)

M0 : la masse de membrane filtrante avant utilisation (mg)

M1 : la masse de la membrane filtrante après utilisation ou étuvage à 105°C

### 11. Dosage du fer :

➤ **Matériels utilisés :**

- Cuve test LCK321 ;
- Pipette (pour 2,0ml) ;
- Minuterie ;
- Spectrophotomètre HACH DR3900 ;

➤ **mode opératoire :**

- Ouvrir la cuve LCK321 (elle contient déjà les réactifs secs) ;
- A l'aide d'une pipette, introduire 0,2 ml d'échantillon;
- Agiter la cuve doucement jusqu'à dissolution complète des réactifs (la cuve devient colorée) ;
- Laisser réagir pendant 10 min.

- lire le résultat affiché en mg/l de fer total.

### 12. Les sulfates :

#### ➤ Matériels utilisée :

- Kit de cuvette LCK 153 (réactifs pré-dosés) ;
- Spectrophotomètre Hach DR3900 ;
- Pipette et points stériles ;

#### ➤ Mode opératoire :

- Prélever 0,5 ml de l'échantillon d'eau ;
- L'introduire dans la cuvette LCK153 contenant la réactif ;
- Fermer la cuvette et agiter environ de 30sec ;
- Laisser réagir 10 min, puis insérer la cuvette dans le spectrophotomètre ;
- Lire directement les résultats exprimés en mg/l.

### 13. Les chlorures :

#### ➤ Matériel utilisée :

- Solution de nitrate d'argent ( $\text{AgNO}_3$ ) 0,0141 N ;
- Indicateur de chromate de potassium ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ) 5% ;
- Burette, pipettes, béchers ;
- Agitateur magnétique.

#### ➤ Mode opératoire :

- Prélever 14 ml d'échantillon d'eau ;
- Ajouter quelques gouttes d'indicateur chromate ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ )(L'échantillon devient jaune clair) ;
- Remplir la burette avec  $\text{AgNO}_3$  (0,0141 N) ;
- Titrer lentement en agitant jusqu'à apparition d'une coloration rouge brique persistante (formation de  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$ ) ;
- Noter le volume d' $\text{AgNO}_3$  consommé au point final.

# *Chapitre V*

## *Résultats et discussions*

## Chapitre V : Résultats et discussions

### V.1. Résultats d'analyses :

Les résultats mensuels d'analyses physiques des échantillons de l'eau de mer brute (EB), l'eau rejet (ER) sont présentés dans le tableau ci-dessous :

**Tableau 3.** Les résultats d'analyses de l'eau de mer brute (EB) et l'eau de rejet (ER) de l'année 2019 (LARBIN & SAADAOUIS, 2019)

Date & Élément	27/3/2019		30/3/2019		2/4/2019		5/4/2019	
	EB	ER	EB	ER	EB	ER	EB	ER
<b>pH</b>	8,05	7,95	8,05	7,98	8,08	7,98	8,07	7,93
<b>Conductivité (ms/cm)</b>	56,83	95,1	56,49	94,53	56,18	94,07	56,05	94,73
<b>Température (°C)</b>	16,04	16,9	15,85	16,97	16,81	17,43	16,81	17,6
<b>Turbidité (NTU)</b>	5,33	0,32	3,75	0,22	2,49	0,28	1,73	0,25
<b>TDS (mg/l)</b>	39,772	69,601	39,55	69,007	39,326	68,278	39,235	68,776
<b>Salinité (g/l)</b>	36,37	60,86	36,15	60,59	35,95	60,20	35,88	60,63

**Tableau 4.** Les résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau brute et l'eau de rejet de l'année 2025

Paramètre	Eau de mer (brute)	Eau de rejet (saumure)
<b>pH</b>	8,16	8,13
<b>Conductivité (ms/cm)</b>	56,74	135,2
<b>Température (°C)</b>	19,01	21,9
<b>Turbidité (NTU)</b>	4,8	0,89
<b>TDS (mg/l)</b>	39 720	67 300
<b>Salinité (g/l)</b>	36,31	67
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (nitrate) (mg/l)</b>	0,00	1,65
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup> (nitrite) (mg/l)</b>	0,021	0,045
<b>MES (mg/l)</b>	11	8,63

<b>Fe (Fer) (mg/l)</b>	0,01	0,26
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Sulfates) (mg/l)</b>	2610	5360
<b>Ca<sup>2+</sup> (Calcium) (mg/l)</b>	600	801,6
<b>Cl<sup>-</sup> (Chlorures) (mg/l)</b>	22 440	38 340

**Tableau 5.** Evolution des paramètres physico-chimiques de l'eau de mer brute (EB) et de l'eau de rejet (ER) en 2019 et 2025, comparée aux normes de qualité de l'eau de mer ;

Paramètres	2019		2025		Normes (eau de mer)
	EB	ER	EB	ER	
<b>pH</b>	~8,0	~7,9	8,16	8,13	7,5 – 8,4
<b>Conductivité</b>	~56,8 ms/cm	~95 ms/cm	56,74 ms/cm	135,2 ms/cm	50_60 ms/cm
<b>TDS</b>	~39 700 mg/L	~68 000 mg/L	39 720 mg/L	67 300 mg/l	35000– 40000 mg/l
<b>Température</b>	~16–18 °C	~17–18 °C	19,01 °C	21,9°C	18_25 °C
<b>Turbidité</b>	2–5 NTU	0,2–0,7 NTU	4,8 NTU	0,89 NTU	< 5 NTU
<b>Salinité</b>	~36 g/L	~60 g/L	36,31 g/L	67 g/l	35–38 g/l

## V.2. Interprétations des résultats :

**L'analyse comparative des paramètres physico-chimiques révèle des différences significatives entre l'eau de mer brute et l'eau rejet du processus de dessalement de l'année 2019 ;**

### ❖ pH :

Le pH de l'eau rejetée est inférieur à celui de l'eau brute, passant d'une moyenne de 8,06 (EB) à environ 7,96 (ER). Cette acidification peut s'expliquer par l'utilisation de produits chimiques lors du traitement, tels que des antitartres ou des coagulants. Toutefois, cette variation reste dans des limites acceptables pour la plupart des écosystèmes marins.

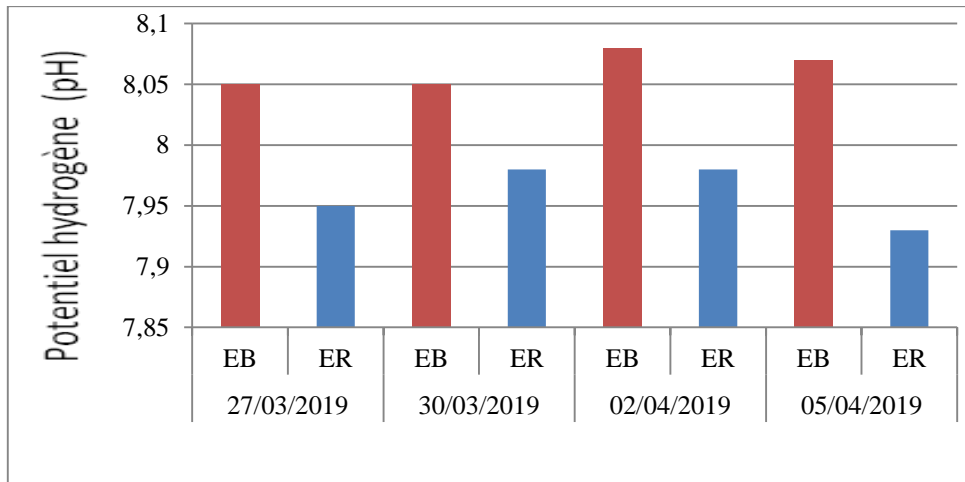


Figure 22. Comparaissant de potentiel hydrogène (ph) d'eau brute et d'eau rejet

❖ **Conductivité :**

Elle est nettement plus élevée dans l'eau rejetée, atteignant environ 94-95 ms/cm contre 56 ms/cm pour l'eau brute. Cela indique une forte concentration de sels dissous dans la saumure rejetée, caractéristique des processus de dessalement. Ce paramètre est critique, car une salinité excessive peut perturber les écosystèmes marins, en particulier la faune benthique.

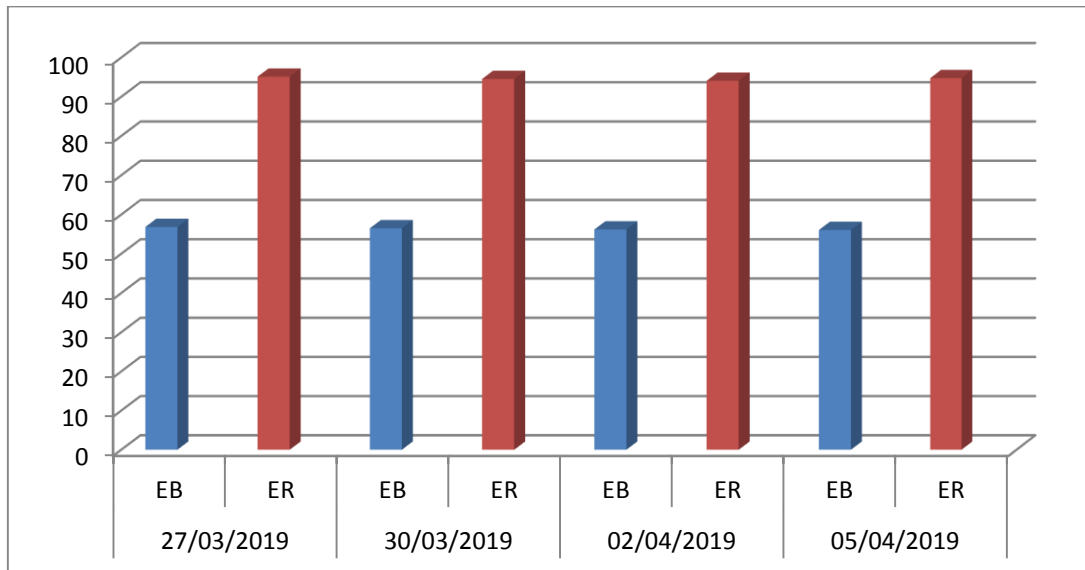
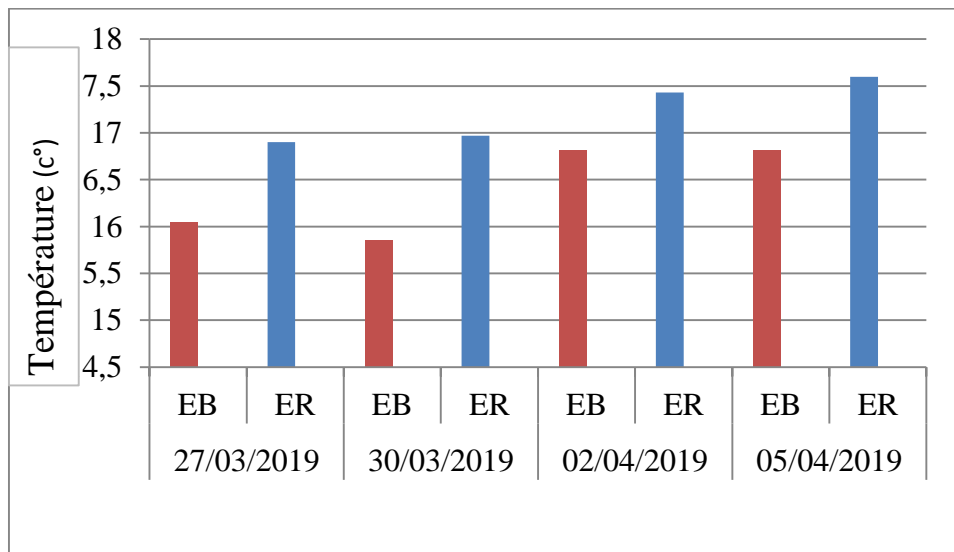


Figure 23. Comparaissant entre la conductivité d'au brute et d'eau rejet

❖ **Température :**

L'eau rejetée est en moyenne 1 à 1,5°C plus chaude que l'eau de mer brute. Cette augmentation de température est probablement due à la chaleur résiduelle des usines de

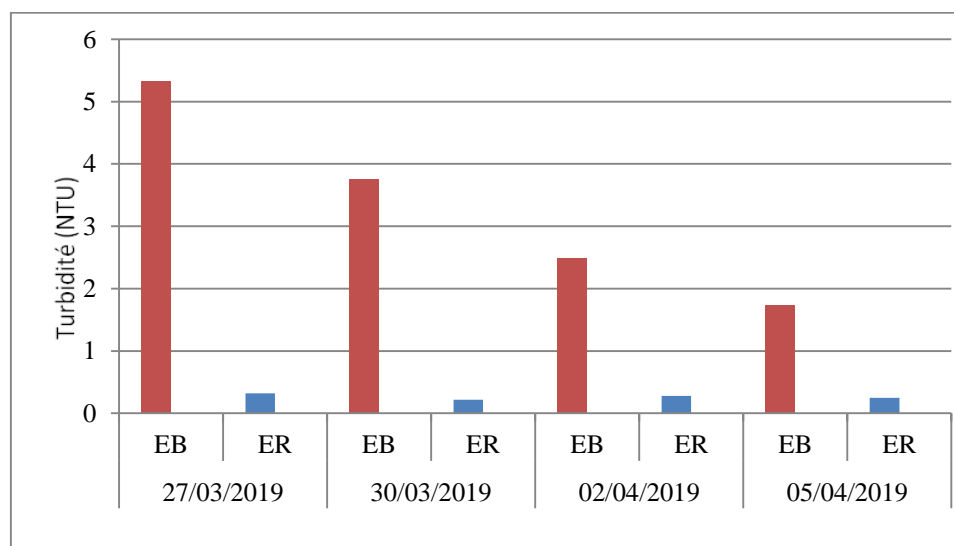
dessalement. Même si la variation reste modérée, le rejet prolongé de grands volumes d'eau chaude peut avoir un effet cumulatif sur la biodiversité locale.



**Figure 24.** Comparaissant entre température d'eau brute et eau rejet

### ❖ Turbidité :

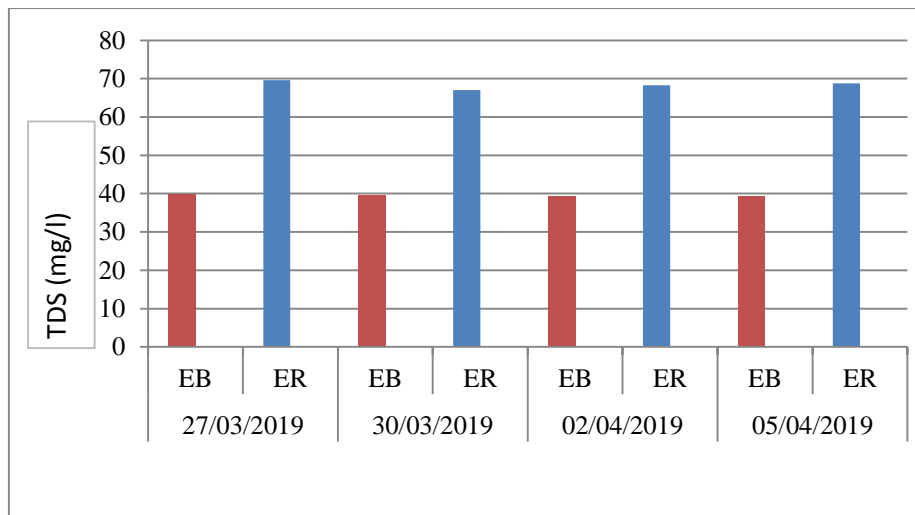
La turbidité est fortement réduite dans l'eau rejetée. Alors que l'eau brute a une turbidité allant jusqu'à 5,33 NTU, les valeurs dans l'eau rejetée sont inférieures à 0,35 NTU. Cela indique une efficacité de filtration élevée dans le processus, contribuant à une meilleure qualité visuelle de l'eau rejetée.



**Figure 25.** Comparaissant entre turbidité de l'eau brute et eau rejet

### ❖ TDS (Solides dissous totaux) :

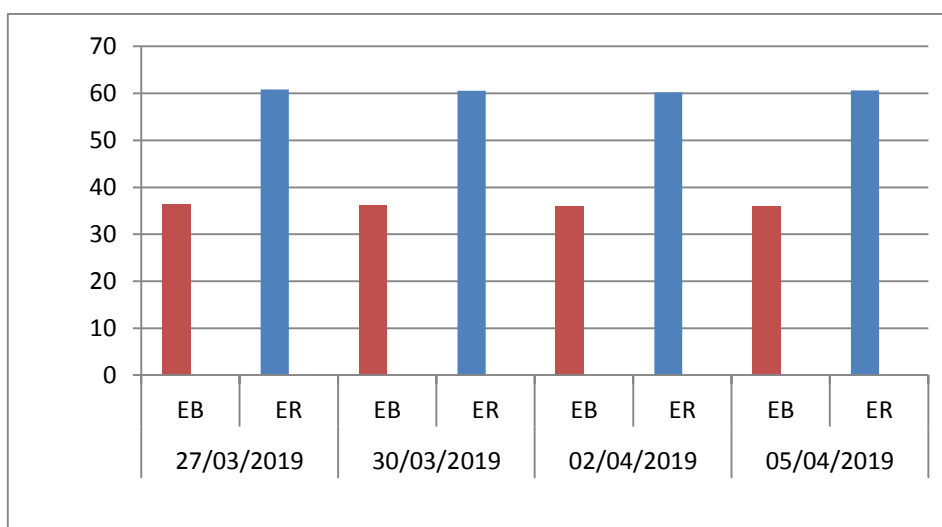
Comme pour la conductivité, les niveaux de TDS sont presque doublés dans l'eau rejetée, atteignant jusqu'à 69 601 mg/l contre environ 39 000 mg/l dans l'eau brute. Ce résultat confirme l'hyper-salinité de la saumure, nécessitant des précautions pour éviter son accumulation dans les zones côtières fermées ou peu profondes.



**Figure 26.** Comparaisant entre TDS d'eau brute et eau rejet

### ❖ Salinité :

La salinité de l'eau de rejet est trop élevée par rapport la salinité naturelle de la mer brute presque le double de concertation, ce qui peut provoquer un stress osmotique chez les organismes marins.



**Figure 27.** Comparaisant entre salinité d'eau brute et eau rejet

### **L'analyse comparative des paramètres physico-chimiques révèle des différences significatives entre l'eau de mer brute et l'eau rejet du processus de dessalement de l'année 2025 ;**

Les analyses montrent des variations importantes, principalement liées au processus d'osmose inverse. Le pH reste relativement stable, passant de 8,16 à 8,13, ce qui indique que l'eau est encore légèrement basique. Cependant, une forte augmentation de la conductivité (de 56,74 à 135,2 ms/cm), du TDS (de 39 720 à 67 300 mg/L) et de la salinité (de 36,31 à 67 g/L) est observée dans l'eau rejetée, reflétant une forte concentration de sels due à la séparation de l'eau douce et de la saumure. Ces niveaux élevés dépassent de loin les valeurs naturelles de l'eau de mer, ce qui suscite des inquiétudes quant à l'impact écologique du rejet, en particulier sur la flore et la faune marines.

D'un point de vue qualitatif, la turbidité est passée de 4,8 NTU à 0,89 NTU et les matières en suspension (MES) de 11 à 8,63 mg/L, soulignant l'efficacité du traitement dans l'élimination des particules.

Cependant, des augmentations notables ont été détectées pour certains éléments chimiques dans l'eau de rejet ;

**Les sulfates** (de 2610 à 5360 mg/L), presque le double dans la saumure, bien que les milieux marins tolèrent mieux les sulfates, une telle augmentation peut modifier l'équilibre osmotique de certaines espèces, nuisant à leur survie.

**Les chlorures** (de 22 440 à 38 340 mg/L), sont augmentés de plus de 70%, ce qui est préoccupant. Cela montre que la saumure est très concentrée. Une fois la salinité augmentée peut avoir des effets létaux sur la faune benthique et perturber les écosystèmes marins proches de l'émissaire de rejet.

**Le calcium** (de 600 à 801,6 mg/L), l'augmentation de la teneur en calcium peut entraîner la précipitation de carbonates ou de sulfates dans les zones de déversement. Ce phénomène peut encrasser les équipements et perturber les substrats marins.

**Le fer** (0,26 mg/L), l'eau rejetée contient une quantité de fer nettement plus élevée que l'eau de mer brute, mais reste inférieure à la limite. Cette concentration peut toutefois affecter le plancton et les invertébrés, en particulier à proximité immédiate des zones de rejet.

**Les nitrates** (1,65 mg/L), la concentration initiale est nulle dans l'eau brute, ce qui est typique d'une eau peu polluée. En revanche, l'augmentation à 1,65 mg/l dans la saumure dépasse le seuil recommandé. Cela peut entraîner une eutrophisation locale et une prolifération d'algues, menaçant les écosystèmes marins côtiers.

**Les nitrites** (de 0,021 à 0,045 mg/l), bien que la concentration ait doublé, elle reste dans la limite acceptable. Cependant, les nitrites sont très toxiques pour la faune marine à faible dose, en particulier pour les poissons et les invertébrés. Leur accumulation prolongée dans l'environnement reste préoccupante.

**L'analyse des paramètres physico-chimiques de l'eau de mer brute (EB) et de l'eau rejetée (ER) pour les années 2019 et 2025 révèle des tendances contrastées ;**

**Le pH** reste globalement stable et conforme aux normes (7,5–8,4), avec une légère augmentation en 2025, reflétant un bon équilibre acido-basique sans signe d'acidification.

**La température**, également conforme aux recommandations (18–25 °C), montre néanmoins une augmentation dans les deux types d'échantillons, particulièrement dans les rejets (de 17,8 °C en 2019 à 21,9 °C en 2025), ce qui pourrait contribuer à un déséquilibre thermique local dans le milieu marin.

**La turbidité**, bien que toujours à la limite maximale autorisée ( $\leq 5$  NTU), augmente de manière significative dans l'eau brute (de 2,5 à 4,8 NTU), ce qui suggère une augmentation des matières en suspension, peut-être liée à des perturbations anthropiques ou naturelles.

Les indicateurs de **salinité**, de **conductivité électrique** et de **TDS** (Total Dissolved Solids) mettent en évidence des préoccupations majeures en termes d'impact environnemental. La salinité de l'eau rejetée, déjà élevée en 2019 (60 g/L), atteint un niveau critique en 2025 (67 g/L), bien au-delà des normes fixées (35–38 g/L). Cette hyper salinité est accompagnée d'une forte augmentation de la conductivité électrique des rejets, qui passe de 95,0 ms/cm en 2019 à 135,2 ms/cm en 2025, alors que la norme ne doit pas excéder 60 ms/cm. De même, les niveaux de TDS dans les rejets restent extrêmement élevés sur les deux années (68 000 mg/L en 2019 contre 67 300 mg/L en 2025), bien au-delà de la limite de 40 000 mg/L, ce qui indique une charge minérale excessive et persistante. Ces niveaux élevés représentent un risque direct pour la biodiversité marine, notamment en affectant l'osmose des organismes aquatiques et en modifiant les équilibres écologiques.

En résumé, si la qualité de l'eau brute reste relativement stable et conforme aux exigences environnementales, les rejets montrent une dégradation importante entre 2019 et 2025, en particulier en ce qui concerne la salinité, la conductivité et les solides dissous.

Ces résultats soulignent la nécessité de mesures de gestion des rejets, telles que la dilution, le rejet en profondeur ou le traitement secondaire, afin de minimiser les impacts sur l'écosystème marin côtier. Le respect des normes environnementales appropriées est également essentiel pour assurer le fonctionnement durable de l'usine de dessalement.

### V.3. Recommandations et Perspectives pour la gestion des rejets de saumures :

#### V.3.1. Recommandations :

##### V.3.1.1. Techniques de dilution et de dispersion :

Une approche courante de la gestion des rejets de saumure consiste à utiliser des techniques de dilution et de dispersion. Il s'agit de mélanger soigneusement la saumure rejetée avec de grandes quantités d'eau de mer afin de réduire la concentration des sels dissous. Les études hydrodynamiques et les modèles de dispersion sont souvent utilisés pour déterminer les meilleurs emplacements de rejet et les taux de dilution nécessaires pour minimiser l'impact sur l'environnement marin (BOUTIBA.A, 2024).

#### Avantages de l'utilisation de Méthodes de Dilution et de Dispersion :

- **Réduction de la concentration en sel :** L'objectif principal de cette méthode est de réduire la concentration en sel (salinité) des saumures avant qu'elles ne soient déversées dans l'océan. En diluant la saumure avec de grandes quantités d'eau de mer, la concentration en sel est rapidement ramenée à des niveaux proches de ceux que l'on trouve dans la mer. La concentration en sel est ainsi ramenée à des niveaux proches de ceux de l'eau de mer naturelle.
- **Minimiser l'impact sur l'environnement :** En réduisant la salinité des saumures rejetées, cette approche vise à minimiser les effets négatifs sur l'environnement. Cette approche vise à minimiser les effets négatifs sur les organismes marins, y compris les coraux, les poissons et les plantes marines. Cela permet de maintenir l'équilibre des écosystèmes côtiers.
- **Utilisation des courants marins :** Les courants marins peuvent être exploités pour faciliter la dispersion rapide des saumures dans l'océan, ce qui permet d'éloigner les saumures des zones sensibles et de les mélanger plus efficacement. éloigner les saumures des zones sensibles et de les mélanger plus efficacement.

#### Aspects à prendre en compte dans la conception :

- **Emplacement de la décharge :** Le lieu de déversement de la saumure est crucial. Les courants marins, la profondeur de l'eau et la proximité des écosystèmes marins doivent être pris en compte lors du choix de l'emplacement optimal.
- **Surveillance de l'environnement :** La surveillance continue de l'environnement est essentielle pour évaluer l'efficacité de la dilution et de la dispersion et pour détecter tout impact potentiel sur les écosystèmes marins. Des ajustements peuvent être effectués sur la base des données de surveillance.
- **Modélisation numérique :** La modélisation numérique de la dispersion de la saumure peut être utilisée pour prédire les trajectoires et la dilution de la saumure dans l'océan, ce qui

aide à concevoir des systèmes de décharge plus efficaces. L'utilisation de méthodes de dilution et de dispersion devrait être considérée comme une approche standard de la gestion des rejets de saumure. Il est essentiel de s'assurer que ces méthodes respectent les normes environnementales locales et qu'elles sont adaptées aux caractéristiques spécifiques de l'installation de dessalement.

### V.3.1.2. Réutilisation et Recyclage des saumures :

La réutilisation et le recyclage de la saumure sont des stratégies innovantes qui permettent de maximiser l'utilisation des ressources et de réduire l'impact environnemental des rejets de saumure. Voici plus de détails sur cette recommandation, accompagnés de citations d'exemples réels d'usines de dessalement à travers le monde :

Exemples d'usines de dessalement appliquant la réutilisation et le recyclage :

**1. Tampa Bay, Floride, États-Unis :** Cette usine de dessalement est un exemple réussi de réutilisation et de recyclage de la saumure. Elle utilise la saumure pour alimenter des réservoirs d'eau salée, créant ainsi des écosystèmes uniques adaptés à des espèces marines spécifiques. Cette approche permet de réutiliser la saumure au lieu de la rejeter directement dans l'océan.

**2. Perth, Australie :** À Perth, une partie de la saumure est traitée pour en extraire du sel et de l'eau douce, créant ainsi deux produits utiles. L'eau douce récupérée est réutilisée pour l'irrigation, tandis que le sel est commercialisé. (Radcliffe & Page, 2020).

#### Avantage :

- **Optimisation des Ressources :** La réutilisation et le recyclage de la saumure optimisent l'utilisation des ressources, en transformant un sous-produit en une ressource utile.
- **Réduction de la Quantité de Saumures Rejetées :** la réutilisation d'une partie de la saumure permet de réduire la quantité de saumure rejetée dans l'océan, ce qui contribue à minimiser l'impact sur l'environnement.
- **Diversification des Applications :** Les saumures réutilisées peuvent être utilisées pour diverses applications, telles que l'irrigation, le contrôle de la salinité dans les écosystèmes marins artificiels ou la récupération des minéraux.

#### Considérations Environnementales :

- La réutilisation et le recyclage nécessitent des installations de traitement supplémentaires pour traiter les saumures en vue de les rendre adaptées à de nouvelles utilisations.
- Les normes environnementales locales et les réglementations gouvernementales doivent être respectées afin de garantir que la réutilisation des saumures n'ait pas d'impacts négatifs sur l'environnement. La réutilisation et le recyclage des saumures représentent des stratégies

prometteuses pour transformer un déchet potentiel en une ressource utile. Ces exemples concrets d'usines de dessalement montrent comment ces approches sont mises en œuvre avec succès dans le monde entier, apportant des avantages environnementaux et économiques significatifs.

### V.3.1.3. Surveillance Continue de l'environnement :

La surveillance continue de l'environnement est un élément essentiel de la gestion des rejets de saumure. Elle permet de surveiller en permanence l'impact des rejets sur les écosystèmes marins et de prendre des mesures correctives si nécessaire. Voici plus de détails sur cette recommandation :

#### Avantage :

- **Détection Précoce des Problèmes** : La surveillance continue permet de détecter rapidement tout changement dans les conditions environnementales ou tout impact sur les écosystèmes marins. Cela permet d'agir rapidement pour minimiser les dommages.
- **Conformité aux Normes** : La surveillance permet de s'assurer que les rejets de saumures sont conformes aux normes environnementales locales et aux réglementations gouvernementales. Cela évite les problèmes juridiques et environnementaux.
- **Collecte de Données à Long Terme** : La surveillance continue génère des données à long terme, qui sont précieuses pour comprendre l'effet cumulatif des rejets de saumures sur les écosystèmes marins.
- **Adaptation en Temps Réel** : Sur la base des données de surveillance, des ajustements peuvent être apportés aux procédures de gestion de la saumure afin de minimiser l'impact sur l'environnement.

#### Composants de la Surveillance Environnementale :

- **Paramètres Environnementaux** : Les paramètres contrôlés peuvent être la salinité, la température de l'eau, le pH, la turbidité, la qualité de l'eau, la biodiversité marine, etc.
- **Échantillonnage Régulier** : Des échantillons d'eau et des données environnementales sont régulièrement collectés à proximité des points de déversement de saumure.
- **Analyse de Données** : les données sont analysées afin d'évaluer l'impact des rejets sur les écosystèmes marins et de prendre des décisions éclairées.
- **Rapports Environnementaux** : Les résultats de la surveillance sont souvent consignés dans des rapports environnementaux réguliers, qui peuvent être communiqués aux autorités de réglementation et au public.

La surveillance environnementale continue assure une transparence totale dans la gestion des rejets de saumures, garantissant que les usines de dessalement respectent les normes environnementales et

réagissent de manière proactive aux changements environnementaux. Elle contribue également à la collecte de données à long terme pour une gestion plus durable de ces rejets.

### V.3.2. Perspectives Futures :

#### L'approche de l'économie circulaire consiste à maximiser

##### V.3.2.1. Économie Circulaire :

er l'utilisation des ressources, à réduire les déchets et à recycler les sous-produits des opérations de dessalement, y compris la saumure. Cette section détaille cette recommandation :

#### Avantage :

- **Réduction des Déchets** : L'économie circulaire vise à minimiser les déchets, y compris la saumure, en identifiant des utilisations alternatives ou des méthodes de récupération.
- **Création de Valeur Ajoutée** : L'économie circulaire encourage la transformation des sous-produits en ressources utiles, ce qui peut générer une valeur économique supplémentaire.
- **Durabilité Environnementale** : En réduisant les rejets de saumures et en recyclant certains composants, l'économie circulaire contribue à une gestion plus durable des ressources en eau et à la préservation des écosystèmes marins.

#### Stratégies de l'Économie Circulaire dans le Dessalement :

- **Réutilisation de la Saumure** : Les saumures peuvent être réutilisées pour diverses applications, telles que l'irrigation agricole, la production de sel, la régénération de résines échangeuses d'ions, la production d'énergie osmotique, etc.
- **Récupération des Minéraux** : Les saumures contiennent souvent des minéraux précieux tels que le magnésium, le lithium ou le brome. Ces minéraux peuvent être extraits et commercialisés.
- **Intégration à d'Autres Processus** : L'économie circulaire peut impliquer l'intégration du processus de dessalement avec d'autres procédés, tels que la culture de micro-algues qui utilisent les saumures comme nutriments.

#### Défis de l'Économie Circulaire dans le domaine de Dessalement :

- **Coûts de Traitement Supplémentaires** : La mise en œuvre de stratégies d'économie circulaire peut nécessiter des coûts de traitement supplémentaires pour adapter les saumures à de nouvelles utilisations.
- **Réglementations et Normes** : Il peut être nécessaire de respecter les réglementations environnementales et les normes de qualité de l'eau pour garantir la sécurité des nouvelles utilisations de la saumure.

- **Recherche et Innovation** : L'innovation est souvent nécessaire pour développer de nouvelles technologies de récupération des saumures et pour explorer de nouvelles opportunités économiques.

L'adoption de l'économie circulaire dans le domaine de dessalement est une approche innovante qui peut contribuer à une gestion plus durable des ressources en eau et à une réduction de l'impact environnemental des rejets de saumures. Elle ouvre également des opportunités économiques en transformant la saumure en une ressource précieuse.

Quelques exemples réels d'initiatives d'économie circulaire dans le domaine du dessalement à l'échelle internationale :

**1. Projet d'Énergie Osmotique - Norvège** : En Norvège, le projet "Salinity Power" explore l'utilisation de l'énergie osmotique générée par la différence de salinité entre l'eau douce des rivières et l'eau salée de la mer. Cette énergie osmotique est créée en utilisant les saumures produites par une usine de dessalement qui sont mélangées avec de l'eau douce. Cette énergie est ensuite convertie en électricité.

**2. Réutilisation des Saumures pour l'Irrigation - États-Unis** : Dans certaines régions des États-Unis, les saumures provenant des usines de dessalement sont réutilisées pour l'irrigation agricole. Cette approche permet de conserver l'eau douce pour les usages domestiques et industriels, tout en réduisant les rejets de saumures dans l'environnement.

**3. Extraction de Minéraux à partir des Saumures - Australie** : En Australie, des projets pilotes ont été mis en place pour extraire des minéraux précieux, tels que le lithium, de la saumure de dessalement. Ces minéraux peuvent ensuite être utilisés dans des applications industrielles ou vendus sur le marché.

**4. Culture de Micro-algues – Palestine** : En Palestine, les saumures d'usines de dessalement sont utilisées pour cultiver des micro-algues. Ces micro-algues peuvent être utilisées pour la production de biocarburants, des produits chimiques ou comme compléments alimentaires.

Ces exemples montrent que les saumures, autrefois considérées comme des déchets, sont de plus en plus considérées comme des ressources précieuses grâce à des stratégies d'économie circulaire. Ils illustrent comment les saumures peuvent être valorisées de manière rentable et durable.

### V.3.2.2 Intégration des Énergies Renouvelables :

L'intégration des énergies renouvelables dans les opérations de dessalement est une approche clé pour réduire l'empreinte environnementale des installations de dessalement tout en contribuant à la durabilité énergétique. Voici plus de détails sur cette recommandation :

#### Avantage :

- **Réduction des Émissions de Carbone** : Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne, sont des sources d'énergie propres qui réduisent les émissions de gaz à effet de serre associées aux opérations de dessalement.
- **Réduction des Coûts d'Exploitation** : Les énergies renouvelables peuvent réduire les coûts d'exploitation en fournissant de l'électricité à un coût inférieur à celui des combustibles fossiles.
- **Stabilité Énergétique** : L'intégration d'énergies renouvelables peut réduire la dépendance aux combustibles fossiles, assurant ainsi une stabilité énergétique à long terme.

#### Stratégies d'Intégration des Énergies Renouvelables dans le Dessalement :

- **Énergie Solaire** : Les usines de dessalement peuvent être alimentées par énergie solaire, soit directement par des panneaux solaires, soit par des systèmes de concentration l'énergie solaire.
- **Énergie Éolienne** : L'énergie éolienne peut être utilisée pour alimenter les opérations de dessalement. Les éoliennes terrestres ou marines sont des options possibles.
- **Hybrides et Stockage** : Les systèmes hybrides, qui combinent plusieurs sources d'énergie renouvelable, ainsi que le stockage de l'énergie, peuvent garantir un approvisionnement continu.

#### Défis de l'Intégration des Énergies Renouvelables dans le Dessalement :

- **Variabilité des Ressources** : Les énergies renouvelables sont souvent variables, ce qui nécessite des systèmes de stockage et une gestion de l'énergie sophistiqués pour garantir un approvisionnement continu.
- **Coûts Initiaux** : Les coûts initiaux d'installation d'équipements d'énergie renouvelable peuvent être élevés, bien que les coûts d'exploitation soient généralement inférieurs.
- **Planification et Conception** : Une planification et une conception soignées des systèmes d'énergie renouvelable sont essentielles pour garantir une intégration réussie.

L'intégration des énergies renouvelables dans les opérations de dessalement offre de nombreux avantages en termes de durabilité, de réduction des coûts et de diminution des émissions de carbone. Cependant, elle nécessite une planification minutieuse et une technologie appropriée pour

surmonter les défis de la variabilité et des coûts initiaux. Elle joue un rôle clé dans la transition vers des opérations de dessalement plus respectueuses de l'environnement.

Exemples concrets d'intégration des énergies renouvelables dans les usines de dessalement du monde entier :

**1. Masdar City, Émirats Arabes Unis** : L'usine de dessalement de Masdar City, aux Émirats arabes unis, est alimentée en grande partie par l'énergie solaire photovoltaïque. Les panneaux solaires fournissent l'électricité nécessaire au processus de dessalement, contribuant ainsi à réduire les émissions de carbone.

**2. Kuraymat, Égypte** : L'Égypte a développé l'usine de dessalement de Kuraymat, qui utilise de l'énergie solaire thermique pour alimenter le processus de dessalement. Les miroirs solaires concentrent la chaleur pour évaporer l'eau de mer, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles.

**3. Windhoek, Namibie** : En Namibie, l'usine de dessalement de Windhoek utilise l'énergie éolienne pour alimenter une partie de ses opérations de dessalement. L'énergie éolienne est stockée sous forme d'hydrogène pour garantir un approvisionnement continu en électricité.

**4. L'Énergie Solaire en Californie, États-Unis** : la Californie étudie un projet de dessalement qui utilise l'énergie solaire pour produire de l'eau douce. Cette approche associe des panneaux solaires à des technologies de dessalement avancées.

**5. Wonthaggi, Australie** : L'usine de dessalement de Wonthaggi, en Australie, intègre l'énergie renouvelable sous forme d'énergie éolienne dans son processus de dessalement. Cela permet de réduire les coûts énergétiques et les émissions de carbone.

Ces exemples illustrent comment l'intégration des énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne, dans les opérations de dessalement peut contribuer à la durabilité et à la réduction de l'impact environnemental de ces installations. Ils montrent également que les technologies propres sont de plus en plus utilisées pour alimenter les usines de dessalement dans le monde entier.

### V.3.2.3 Collaboration Internationale :

La collaboration internationale dans le domaine de la gestion des rejets de saumures et du dessalement de l'eau de mer joue un rôle décisif dans la recherche de solutions durables et efficaces à l'échelle mondiale. Elle permet de mutualiser les efforts, d'accélérer l'innovation technologique et d'optimiser les ressources disponibles. Voici plus de détails sur cette recommandation :

### **Avantages de la Collaboration Internationale :**

- **Partage des Connaissances** : La collaboration internationale permet le partage des meilleures pratiques, des recherches, des technologies et des leçons apprises entre différents pays et régions.
- **Accès à l'Expertise** : Elle offre un accès à l'expertise internationale, ce qui peut être particulièrement utile pour résoudre des problèmes complexes liés au dessalement et à la gestion des saumures.
- **Réduction des Coûts** : En facilitant le partage des infrastructures, des données et des ressources humaines, la collaboration permet de limiter les doublons, de rationaliser les investissements et de bénéficier d'économies d'échelle.

### **Stratégies de Collaboration Internationale dans le Dessalement :**

- **Partenariats de Recherche** : Les pays peuvent collaborer sur des projets de recherche communs visant à développer des technologies de dessalement plus efficaces, à étudier les impacts environnementaux et à proposer des cadres réglementaires appropriés.
- **Échange de Technologies** : La coopération internationale peut permettre le transfert de technologies de dessalement avancées entre les pays, favorisant ainsi l'adoption de solutions plus respectueuses de l'environnement.
- **Partage des Ressources et des infrastructures** : Dans les régions confrontées à une pénurie d'eau, le partage d'installations de dessalement et de traitement des saumures constitue une approche pragmatique qui permet d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles et réduire les coûts d'investissement.

### **Défis de la Collaboration Internationale dans le Dessalement :**

- **Aspects Politiques et Juridiques** : Les partenariats internationaux peuvent être complexes en raison de différences politiques, juridiques et réglementaires entre les pays.
- **Gestion des impacts environnementaux Transfrontalières** : Les activités de dessalement dans un pays peuvent avoir un impact sur l'environnement d'un autre pays, ce qui nécessite une coordination étroite.
- **Protéger les Intérêts Nationaux** : Les pays doivent trouver un équilibre entre la coopération internationale et la défense de priorités nationales en terme de sécurité de l'eau, de souveraineté technologique et de protection environnementale.

La collaboration internationale est un levier fondamental pour relever les défis mondiaux du dessalement de l'eau de mer et de la gestion des saumures. Elle permet un échange dynamique de

connaissances, de ressources et d'expertise, qui peut déboucher sur des solutions plus efficaces et plus durables. Toutefois, elle nécessite une planification et une coordination minutieuses pour surmonter les obstacles politiques et juridiques.

### **Conclusion :**

La gestion des rejets de saumures dans le cadre du dessalement de l'eau de mer a permis d'approfondir l'importance cruciale de cette question environnementale et technologique. Voici un résumé des principaux points abordés :

**1. La Nécessité de la Gérer les Rejets de Saumure:** La désalinisation de l'eau de mer est devenue une source essentielle d'eau douce dans de nombreuses régions du monde. Cependant, ce processus génère des saumures, des rejets salins concentrés qui nécessitent une gestion appropriée afin de minimiser leur impact sur l'environnement marin.

**2. Impact Environnemental des Saumures:** Les rejets de saumure peuvent avoir des effets importants sur la qualité de l'eau et la biodiversité des écosystèmes marins et côtiers. Il est essentiel de comprendre ces effets pour concevoir des stratégies de gestion appropriées.

**3. Solutions pour la Gestion des Saumures :** Le chapitre a exploré différentes stratégies de gestion des saumures, notamment la dilution, la dispersion, la réutilisation, le recyclage, la surveillance continue de l'environnement et l'intégration des énergies renouvelables. Ces approches visent à réduire l'impact des saumures sur l'environnement.

**4. Collaboration Internationale :** La collaboration internationale a été soulignée comme un moyen essentiel de partager les connaissances, les technologies et les ressources pour relever les défis de la gestion des rejets de saumure.

La gestion des rejets de saumure est un élément clé de la durabilité du dessalement de l'eau de mer. Elle nécessite une planification minutieuse, une réglementation appropriée et l'adoption de technologies de pointe. La poursuite de la recherche et de l'innovation dans ce domaine est essentielle pour minimiser l'impact sur l'environnement tout en répondant aux besoins croissants en eau douce. Cette partie jette les bases de la section suivante, qui examine des études de cas spécifiques sur la gestion des rejets de saumure.

# *Conclusion général*

## **Conclusion générale :**

---

Face à la demande sans cesse croissante d'eau douce, le dessalement de l'eau de mer devient une solution incontournable, notamment dans les régions arides et semi-arides. Cependant, cette technologie, bien que bénéfique pour l'approvisionnement en eau potable, n'est pas sans conséquence sur l'environnement marin.

Dans cette mémoire, nous avons analysé les principaux impacts environnementaux générés par les usines de dessalement, en particulier ceux liés aux rejets de saumure concentrée et de produits chimiques dans le milieu marin. Ces rejets peuvent provoquer des déséquilibres importants dans l'écosystème, affectant la biodiversité, la qualité de l'eau et les habitats côtiers.

L'étude de cas menée sur l'usine de dessalement de Mostaganem a mis en évidence l'importance d'un suivi environnemental rigoureux et de l'intégration de solutions techniques et écologiques pour limiter ces effets. Les mesures proposées comprennent le prétraitement écologique, la dilution contrôlée de la saumure, l'utilisation d'énergies renouvelables et l'implantation des rejets dans des zones marines appropriées.

Ainsi, concilier les besoins en eau et la préservation de l'environnement marin nécessite une gestion durable, une volonté politique et une innovation technologique constante. Il est impératif que les projets de dessalement s'accompagnent d'études d'impact environnemental approfondies et que la recherche continue à jouer un rôle central dans le développement d'alternatives plus respectueuses des écosystèmes.

# *Références bibliographique*

## Références bibliographique :

---

**Algerian Energy Company SPA.** Data on seawater desalination stations. 2024.

**ALGERIENNE DES EAUX (ADE),** 2019.

**ALGERIENNE DES EAUX (ADE),** 2024.

**BOUTIBA, Abdelghani.,** « Gestion et valorisation rationnelles des rejets de saumure des usines de dessalement de l'eau de mer. Cas de l'Algérie », thèse de doctorat, université de Hassiba Benbouali de Chlef, 2024.

**CHEKROUD, Mohamed Reda.,** « ETUDE DES PERFORMANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE LA Wilaya de SKIKDA », mémoire fin d'étude, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'HYDRAULIQUE-ARBAOUI Abdellah

**Danis P.** (2003) Dessalement de l'eau de mer. Techniques de l'Ingénieur, j2700, p.4.

**Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., & Melin, T.** (2007). State-of-the-art reverse osmosis desalination. Desalination, 216(1-3), 1-76.

**GreenFacts.** (2007). Water, A shared Responsibility, The United Nations Water Development report 2.

**journal national officiel,** EL-Watan, 2025.

**J-Pierre Méricq(2009)** : « Approche intégrée du dessalement d'eau de mer : Distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilités de couplage avec l'énergie solaire ». Thèse en vue de l'obtention du DOCTORAT de l'université de TOULOUSE France.

**la station.** «UTE», desalodra Ténès Opération et Maiteniments O &M », juin 2016.

**LARBI, N., & SAADAOU, S.,** « Impact environnemental de la station de Dessalement de l'eau de mer de Sonachter (wilaya de Mostaganem) », mémoire de master, université de Mostaganem, 2019, P 40\_44.

MANUEL D'exploitation et d'entretien, Usine de dessalement de Mostaganem 02/02/2011.

**MAUREL.,2006** « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres », 2ème édition, TEC doc. 286p, 2006.

## Références bibliographique :

---

**Miller, S., Shemer, H., & Semiat, R.** (2015). Energy and environmental issues in desalination. *Desalination*, 366.

**Panagopoulos, A., & Haralambous, K.-J.** (2020). Environmental impacts of desalination and brine treatment - Challenges and mitigation measures. *Marine Pollution Bulletin*, 161(Pt B), 111773.

**Sabin, Lattemann.**, « development of an environmental impact assessment and decision support system for seawater desalination plants », these de doctorat, university of technology and of the academic board of the unesco-ihe institute for water education.

**UNEP** « Programme des Nations Unies pour l'Environnement »,07 mai 2001.

**UNEP/MAP**, « Dessalement de l'eau de mer en méditerranée évaluation et lignes Directrices », MAP Technical Reports Series No. 139, Athens, 2003.

**Webmaster 2** International Desalination Association <http://idadesal.org/desalination101/desalination-by-the-numbers/>.

**Webmaster 1** Desalination – a critical element of water solutions for the 21st century Lisa Henthorne, President, The International Desalination Association.

**YOUSFI, A., & CHEDIK, L.**, « Étude des rejets de saumures des usines de dessalement de l'eau de mer en utilisant l'imagerie satellite », mémoire de master, université TIZI-OUZOU, 2024, P