



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique

Option : REUTILISATION DES EAUX NON CONVENTIONNELLES

THEME :

**CONCEPTION D'UN OUVRAGE DE DILUTION DES
REJETS DE SAUMURE DES USINES DE DESSALEMENT
D'EAU DE MER CAS D'EL MARSA Alger**

Présenté par :

DRAI Amira

Devant les membres du jury

Nom et Prénoms	Grade	Qualité
ZEROUAL Ayoub	MCA	Président
KHALED HOULI Samia	MAA	Examineur
KHEDIMALLAH Abderrahmane	MAA	Examineur
TAFAT Leila	MAA	Examineur
REMINI Boualem	Professeur	Promoteur

Session octobre 2023

ملخص

إن تحلية المياه، كحل فعال للنقص الحاد في المياه الذي يجتاح الجزائر، يتم اعتمادها على نطاق واسع. ومع ذلك، فإن لهذه الطريقة عدة عيوب رئيسية، من بينها بشكل خاص إنتاج المحلول الملحي، وهو محلول ملحي يتجاوز ملوحة مياه البحر، مما يؤثر سلبيًا على البيئة البحرية. وهذا يؤكد الحاجة إلى التسيير السليم وتعزيز المحلول الملحي. وفي هذا السياق، كانت دراستنا استكشاف طرق مختلفة لتسيير المحلول الملحي في محطة تحلية المياه المرسي بسعة $60000 \text{ م}^3/\text{ث}$ وتصريف محلول ملحي $73333 \text{ م}^3/\text{ث}$ بمعدل تحويل 45%-55%. ونفضل التخفيف لأنها الطريقة الأقل تكلفة مقارنة بالتقنيات الحالية الأخرى.

كجزء من مذكرتنا، عملنا على تعميق الدراسة لنوعين مختلفين من هذا الحل. يتكون الأول من تصميم قناة سطحية حرة، بينما يتضمن الثاني تصميم حوض التخفيف بنظام هيدروليكي متكامل يعزز الخلط الفعال للمحلول. ويصاحب كلا البديلين نظام ضخ لضمان التنفيذ العملي والفعال.

كلمات مفتاحية : تحلية المياه، محلول ملحي، المرسي، تخفيف.

Résumé

Le dessalement de l'eau, en tant que solution efficace pour lutter contre la grave pénurie d'eau qui sévit à travers l'Algérie, est largement adopté. Toutefois, cette approche présente plusieurs inconvénients majeurs, parmi lesquels se distingue particulièrement la production de saumure, une solution saline dépassant même la salinité de l'eau de mer, ayant un impact négatif sur l'environnement marin. Cela souligne l'impératif de mettre en place une gestion adéquate et une valorisation de la saumure.

Dans ce contexte, notre étude vise à explorer diverses méthodes de gestion de la saumure dans la station de dessalement d'El Marsa avec une capacité de $60000 \text{ m}^3/\text{s}$ et une décharge de saumure s'élevant à $73333 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un taux de conversion de 45%-55%. On privilégiera la dilution qui se révèle être l'approche la moins coûteuse comparée aux autres techniques de gestion existantes. Dans étude, nous avons approfondi deux variantes de cette démarche. La première consiste en la conception d'un canal à surface libre, tandis que la seconde implique le dimensionnement d'un bassin de dilution doté d'un système hydraulique intégré favorisant le mélange efficace de la saumure. Les deux variantes sont accompagnées d'un système de pompage pour garantir une mise en œuvre pratique et efficiente.

Mots clés : Dessalement, Saumure, El Marsa, Dilution.

Abstract

Water desalination has been widely adopted as an effective solution to the serious water shortages that are plaguing Algeria. However, this approach has several major drawbacks, most notably the production of brine, a saline solution exceeding even the salinity of seawater, with a negative impact on the marine environment. This underlines the imperative need to properly manage and valorize the brine.

In this context, our study aims to explore various brine management methods in the El Marsa desalination plant with a capacity of $60000m^3/s$, and a brine discharge amounting to $73333m^3/s$ with a conversion rate of 45%-55%. We focused on dilution as the least costly approach compared to other existing techniques. As part of our thesis, we explored two variants of this approach. The first involves the design of a free-surface channel, while the second involves the sizing of a dilution basin with an integrated hydraulic system for efficient brine mixing. Both variants are accompanied by a pumping system to ensure practical and efficient implementation.

Keys words: Desalination, Brine, El Marsa, Dilution.



Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents

A mes sœurs et frères

A ma famille et mes amis

A oscar



Remercîments

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour finir ce modeste travail

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers les personnes qui ont joué un rôle essentiel dans la réalisation de ce mémoire.

Je commence par remercier chaleureusement mes parents, pour leur soutien inconditionnel, l'encouragement constant.

J'adresse mes sincères remerciements à mes promoteurs, Mr. Amitouche et Mr. Remini, pour leur expertise, leur patience et leurs conseils avisés tout au long de ce projet.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance envers les ingénieurs de la station d'El Marsa Mr Ladraa et Mr Djadi pour leur aide et leur disponibilité.

Je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué à rendre ce travail possible.

TABLE DE MATIERES

DEDICACE

REMERCIEMENT

LISTE DE FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES PLANCHES

INTRODUCTION GÉNÉRALE 13

Chapitre I : Le dessalement en Algérie

INTRODUCTION 16

DESSALEMENT ET PERSPECTIVE DE DESSALEMENT EN ALGÉRIE 16

LA DÉFINITION DE DESSALEMENT 17

LES DIFFÉRENTES TECHNOLOGIES DE DESSALEMENT 18

I.3.1 Distillation thermique 18

I.3.1.1 Multiple Stage Flash (MFS) (La distillation éclair multiétage)..... 18

I.3.1.2 Multiple Effect Distillation (MED) (La distillation à effets multiples)..... 19

I.3.1.3 Vapor Compression Distillation (VCD) (La distillation par compression de vapeur)19

I.3.2 Les technologies membranaires 20

I.3.2.1 Osmose Inverse..... 20

I.3.2.2 Nanofiltration..... 21

I.3.2.3 Electrodialyse 21

CHOIX DE PROCÉDÉ DE DESSALEMENT 22

I.4.1 Choix de procédé en Algérie..... 22

CONCLUSION..... 23

Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

INTRODUCTION 25

II.1 DÉFINITION DE LA SAUMURE 25

II.2 COMPOSITION DE LA SAUMURE 25

II.3 IMPACT DE DESSALEMENT 26

II.4 IMPACT ENVIRONNEMENTAL DÛ À LA SAUMURE 26

II.5 TECHNIQUES DE GESTION DE LA SAUMURE..... 27

II.5.1 Rejet dans les eaux de surface 27

II.5.2 Déversement dans les égouts sanitaires 28

II.5.3	Injection en puits profond	28
II.5.4	Bassin d'évaporation.....	29
II.5.5	Irrigation par aspersion	30
II.5.6	Rejet sans liquide (Zero Liquid Discharge ZLD)	30
II.5.6.1	Concentrateurs	31
II.5.6.2	Cristallisateurs	31
II.6	APPLICATIONS BÉNÉFIQUES DE LA SAUMURE	31
II.7	RÉCUPÉRATION DE L'ÉNERGIE À PARTIR DE LA SAUMURE.....	32
II.7.1	Osmose directe.....	32
II.7.2	Electrodialyse.....	33
II.8	RÉCUPÉRATION DES MINÉRAUX DANS LA SAUMURE	34
II.9	CONCLUSION.....	36

Chapitre III : Rejet direct dans la mer

	INTRODUCTION	38
--	--------------------	----

III.1	REJET DIRECT DANS LA MER	38
-------	--------------------------------	----

III.2	REJET DIRECT DE SAUMURE DANS LA MER À L'ÉCHELLE INTERNATIONALE	
-------	--	--

39

III.2.1	L'Arabie-Saoudite	39
---------	-------------------------	----

III.2.2	Les Émirats arabes unis.....	39
---------	------------------------------	----

III.2.3	Le Qatar.....	40
---------	---------------	----

III.3	LE REJET DIRECT DANS LA MER EN ALGÉRIE	40
-------	--	----

III.4	LES EFFETS DE LA DÉCHARGE DE SAUMURE DANS LE CHAMP PROCHE ET LOINTAIN	42
-------	---	----

III.4.1	Le champ proche	43
---------	-----------------------	----

III.4.2	Le champ lointain.....	43
---------	------------------------	----

III.5	LE DÉFI DE LA SALINITÉ ÉLEVÉE : CONSÉQUENCES DU REJET DE SAUMURE DANS LES ÉCOSYSTÈMES MARINS	45
-------	--	----

III.6	CONCLUSION.....	46
-------	-----------------	----

Chapitre IV : Présentation de zone d'étude

	INTRODUCTION	48
--	--------------------	----

IV.1	DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT D'EL MARSA.....	48
------	--	----

1.1.1	Situation géographique	48
-------	------------------------------	----

1.1.2	Processus et fonctionnement de la station d'El Marsa	49
-------	--	----

IV.1.2.1	Captage de l'eau de mer	50
----------	-------------------------------	----

IV.1.2.2	Etape de prétraitement	51
----------	------------------------------	----

IV.1.2.3	Etape de traitement.....	59
----------	--------------------------	----

IV.2	CONCLUSION.....	67
------	-----------------	----

Chapitre V : Dimensionnement des ouvrages de dilution

	INTRODUCTION	70
--	--------------------	----

V.1	DIMENSIONNEMENT DU CANAL TRAPÉZOÏDAL À SURFACE LIBRE.....	70
-----	---	----

V.1.1 Le dimensionnement du canal.....	71
V.1.2 Système de pompage.....	74
V.1.2.1 Choix des pompes	78
2.2 DIMENSIONNEMENT DU BASSIN DE DILUTION	79
2.2.1 Dimensionnement du bassin	81
2.2.2 Dimensionnement du déversoir	82
V.2.3 Système de pompage.....	83
V.2.3.1 Choix des pompes.....	84
V.3 CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE.....	85
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	88

LISTE DES FIGURES

Figure I- 1 Schéma des procédés de dessalement	18
Figure I- 2 Schéma de distillation éclair multiétage	19
Figure I- 3 Schéma de distillation a effets multiples	19
Figure I- 4 Schéma de distillation par compression de vapeur	20
Figure I- 5 Principe de l'osmose inverse	20
Figure I- 6 Schéma de l'électrodialyse	21
Figure II- 1 Rejet de saumure dans la mer	27
Figure II- 2 Injection de saumure en puits profond	28
Figure II- 3 Bassin d'évaporation	29
Figure II- 4 Schéma de bassin d'évaporation.....	30
Figure II- 5 Schema d'osmose direct.....	32
Figure II- 6 Schéma de l'électrodialyse	33
Figure III- 2 Diffuseur de rejet de saumure	39
Figure III- 1 Système de décharge	39
Figure III- 3 Principales stations de dessalement dans le golfe Arabo-Persique	40
Figure III- 4 Situation du rejet de saumure d'El Hamma	41
Figure III- 5 représentation spatiale de la distribution de la salinité au fond de la mer pour les deux sites.....	41
Figure III- 6 Répartition des champs issus des rejets en mer.....	42
Figure III- 7 Schéma des émissaires marins.	43
Figure III- 8 champ proche et lointain	44
Figure III- 9 Impacts dans le champ proche	44
Figure III- 10 Impacts dans le champ lointain	44
Figure III- 11 La posidonie de Méditerranée	45
Figure IV- 1 Situation géographique d'El Marsa	48
Figure IV- 2 La station de dessalement de l'eau de mer El Marsa	49
Figure IV- 3 La conduite de captage.....	50
Figure IV- 4 Dégrilleur grossiers d'El Marsa.....	52
Figure IV- 5 (A, B, C) Degrilleurs fin	53
Figure IV- 6 Station de relevage	54
Figure IV- 7 Capteurs T, Conductivité et HC.....	55
Figure IV- 8 Capteur chlorophylle, MES et PH.....	55
Figure IV- 9 Les mélangeurs statiques de coagulation-floculation	55
Figure IV- 10 Jar Test du laboratoire d'El Marsa.....	56
Figure IV- 11 Les pompes doseuses	57

Figure IV- 12 Décanteur Lamellaire.....	57
Figure IV- 13 L'appareil de mesure de SDI.....	59
Figure IV- 14 Les capteurs PH, T°C, Conductivité, turbidité et l'ORP.....	59
Figure IV- 15 Pompe haute pression HPRO.....	60
Figure IV- 16 Pompe Booster.....	61
Figure IV- 17 Echangeur de pression.....	61
Figure IV- 18 Unité d'osmose inverse.....	62
Figure IV- 19 Le système de nettoyage des membranes unité CIP.....	63
Figure IV- 20 Le système de stockage de CO2.....	64
Figure IV- 21 le réservoir de reminéralisation LEOPOLD.....	65
Figure IV- 22 Bassin de Calcite.....	66
Figure IV- 23 Station de pompage d'eau traitée.....	67
Figure IV- 24 Le schéma de fonctionnement d'El Marsa.....	68
Figure V- 1 Courbe caractéristiques de la pompe KWP.....	79
Figure V- 2 Schéma simplifié du déversoir.....	82
Figure V- 3 Courbe caractéristiques de la pompe.....	85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I- 1 Les grandes stations en Algérie.....	17
Tableau II- 1 Technologies de récupération des minéraux.....	35
Tableau IV- 1 Caractéristiques de la conduite.....	47
Tableau IV- 2 Caractéristiques de l'eau de mer.....	50
Tableau IV- 3 Processus d'acidification et pré-chloration.....	51
Tableau IV- 4 Les concentrations de coagulant dans chaque tube.....	56
Tableau IV- 5 Caractéristiques des coagulants-floculant.....	56
Tableau IV- 6 Caractéristiques des lignes de distribution.....	66
Tableau V- 1 Calcul itératif.....	73
Tableau V- 2 Calcul du canal.....	73
Tableau V- 3 Calcul du canal II.....	74
Tableau V- 4 Données du choix de la pompe.....	77
Tableau V- 5 Caractéristique de la pompe.....	78
Tableau V- 6 Caractéristique du bassin.....	81
Tableau V- 7 Caractéristique du deversoir.....	83
Tableau V- 8 Caractéristiques du choix de la pompe.....	84
Tableau V- 9 Caractéristiques de la pompe KWP K.....	84
Tableau V- 10 Frais annuel d'exploitation de pompage.....	85
Tableau V- 11 Frais d'exploitation par m ³	86

Liste des planches

1. Plan de masse de la station El Marsa
2. Plan de l'ouvrage « canal trapézoïdal a surface libre »
3. Plan de l'ouvrage « bassin de dilution»

Symbole et abréviation

AEP : Alimentation en Eau Potable

CIP : Cleaning In Place

ED: Electrodialyse

Hg : Hauteur géométrique

HMT : Hauteur Manométrique Totale

HPRO : Pompe haute pression d'osmose inverse

kWh : Kilowattheure

MED: Multi Effects Distillation

MENA : Middle East and North Africa

MES : Matières En Suspension

MSF: Multi Stage Flash

NTU : Nephelometric Turbidity Unit

OD: Osmose Direct

OI : Osmose Inverse

ORP : Potentiel d'oxydo-réduction

PEHD : polyéthylène en haute densité

PH : Potentiel hydrogène

Ppm : partie par million

PX : Echangeur de pression

SDI : Indice de colmatage

TDS : Total Dissolved Solids

VCD: Vapor Compression Distillation

ZLD: Zero Liquid Discharge

Introduction générale

L'Algérie est un pays qui connaît plusieurs climats, allant du climat méditerranéen au nord au climat désertique et aride du Sahara. Avec le changement climatique, le monde a connu et continue de connaître une pénurie d'eau cruciale, et l'Algérie ne fait pas exception, notamment en raison de son climat. Pour lutter contre ce problème d'origine à la fois naturelle et humaine, l'Algérie a opté pour le dessalement, d'autant plus que la croissance démographique de ces dernières années a dépassé les 45 millions d'habitants.

Le dessalement a débuté en Algérie dans les années 2000 avec un projet d'installation de 23 stations de dessalement monobloc et la programmation de grandes stations conventionnelles. Aujourd'hui, il existe 12 stations de dessalement pleinement opérationnelles avec une capacité totale de 2170000 m³/s. L'objectif est d'assurer 40 % de l'eau potable par dessalement d'ici la fin 2024 et 60 % d'ici 2030. Pour l'instant, ces 12 usines fournissent 18 % de la consommation nationale d'eau potable.

Les deux technologies de dessalement sont la distillation et la technologie membranaire. En Algérie, toutes les stations utilisent la technologie membranaire (osmose inverse), à l'exception de la station de Kahrama à Oran, qui utilise la distillation (Multi Stage Flash).

Bien que le dessalement soit l'une des solutions à la pénurie d'eau, il s'agit d'une lame à double tranchant. Tout au long du processus, il y a de la saumure, qui est un sous-produit du dessalement avec une forte concentration de sel voir deux à trois fois la concentration de la mer parmi d'autres substances chimiques. Cette dernière, si elle n'est pas bien gérée, a un impact négatif sur le milieu aquatique, contribuant ainsi au changement climatique.

Il existe différentes méthodes de gestion de la saumure, telles que le rejet direct en mer, le déversement dans les égouts sanitaires, les bassins d'évaporation, etc. La plupart des stations de dessalement utilisent le rejet direct en mer, il en va de même pour les stations de dessalement algériennes qui rejettent toutes la saumure directement dans la mer. Le rejet direct dans la mer représente un danger pour la vie marine, de nombreux organismes marins sont sensibles à la forte salinité, c'est pourquoi d'autres alternatives doivent être trouvées.

Notre travail de mémoire consiste à trouver une solution pour cette saumure afin de réduire l'impact négatif avant qu'il ne soit trop tard. On travaillera sur la nouvelle station d'El Marsa qui est d'une capacité de 60000 m³/j. Cette station rejette sa saumure directement dans la mer Méditerranée par l'intermédiaire d'un émissaire en mer. Dans notre étude, on cherche à exploiter la possibilité de la dilution de saumure à l'aide des ouvrages annexes.

Dans la première partie, on abordera plus particulièrement la situation du dessalement en Algérie et les technologies utilisées dans ce processus en détail voir les technologies membranaires et la distillation thermique.

Par la suite, on évoquera la gestion et la valorisation de saumure, ou on présentera les différentes méthodes de gestion, leurs avantages et inconvénients. On mentionnera également la valorisation de la saumure par la récupération des minéraux qu'elle contient.

Dans la troisième partie, Dans la troisième partie, on traitera le rejet direct dans la mer sur le plan international et national, ainsi que ses impacts et ses conséquences sur l'environnement.

Ensuite, on présentera la station d'El Marsa et son fonctionnement, puis on terminera notre travail par les ouvrages de dilution et une conclusion générale.

Chapitre I

Le dessalement en Algérie

Introduction

Le dessalement est le processus d'élimination du sel et d'autres minéraux de l'eau de mer, de l'eau saumâtre ou d'autres types d'eau impropres à la consommation humaine ou à l'usage agricole. Le dessalement est devenu de plus en plus important ces dernières années en raison de l'augmentation de la population mondiale, du changement climatique et de la pénurie d'eau dans de nombreuses régions du monde. Outre la production d'eau potable, le dessalement peut également être utilisé pour produire de l'eau destinée à des processus industriels, tels que le refroidissement ou l'irrigation. Il existe aujourd'hui plusieurs technologies de dessalement différentes, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients. Parmi les technologies les plus courantes figurent l'osmose inverse, la distillation et l'électrodialyse.

I.1 Dessalement et perspective de dessalement en Algérie

L'Algérie est un pays situé en Afrique du Nord, qui est confronté à un problème de pénurie d'eau en raison de son climat sec et de ses ressources en eau limitées. Pour résoudre ce problème, l'Algérie a investi dans la technologie du dessalement afin de produire de l'eau douce à partir de la mer. Le dessalement a commencé dans les années 2000 où l'Algérie avait connu la sécheresse. Des stations de dessalement mobiles monoblocs ont été utilisées pour satisfaire les besoins en eau. On peut dire qu'il s'agissait d'une solution d'urgence. Par la suite, on a commencé à mettre en place des usines de dessalement ayant une grande capacité de production. En Algérie, le dessalement est principalement utilisé pour produire de l'eau à usage domestique et industriel. Selon un rapport de l'International Desalination Association, l'Algérie dispose de 12 usines de dessalement opérationnelles d'une capacité totale de 2170000 mètres cubes par jour. La plus grande usine de dessalement d'Algérie est située à Oran (Mactaa), avec une capacité de 500 000 mètres cubes par jour. Le gouvernement algérien a encouragé l'utilisation du dessalement comme solution durable pour résoudre le problème de la pénurie d'eau. En 2018, l'Algérie a lancé une nouvelle stratégie pour que 60% de l'eau potable soit assurée par le dessalement d'ici 2030. Malgré ces efforts, le dessalement en Algérie reste confronté à des défis. L'un des principaux est le coût élevé du dessalement, qui peut rendre difficile l'accès à l'eau douce pour les ménages à faibles revenus. En outre, les usines de dessalement nécessitent une quantité importante d'énergie, ce qui peut contribuer aux émissions de gaz à effet de serre et au changement climatique. Dans l'ensemble, le dessalement est devenu un élément important de la stratégie d'approvisionnement en eau de l'Algérie, et le gouvernement continue d'investir dans cette technologie pour s'assurer que sa population a accès à une eau propre et sûre. Les stations de dessalement sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau I- 1 Les grandes stations en Algérie

WILAYA	STATION	MISE EN SERVICE	CAPACITE DE PRODUCTION (m ³ /j)
Alger	El hamma	2008	200 000
	El marsa	2022	60 000
Oran	Mactaa	2015	500 000
	Kahrma Arzew	2005	90 000
Tlemecen	Honaine	2010	200 000
	Souk Tlata	2010	200 000
Boumerdes	Cap djenet	2010	100 000
Skikda	Skikda	2009	100 000
Ain Tmouchent	Benisaf	2009	200 000
Chelef	Tenes	2010	200 000
Mostaganem	Mostaganem	2010	200 000
Tipaza	Fouka	2010	120 000
	TOTAL		2 170 000

Ajoutant à ces stations, 05 stations qui sont prévus pour l'an 2024, afin d'assurer au moins 40% de l'eau potable. Ces usines de dessalement jouent un rôle important dans la résolution des problèmes de pénurie d'eau en Algérie en produisant de l'eau douce à partir d'eau de mer ou d'eau saumâtre.

I.2 La définition de dessalement

Le dessalement, également connu sous le nom de dessalage ou de désalinisation, est le processus d'élimination du sel et d'autres minéraux de l'eau de mer ou d'autres sources d'eau salée telles que les eaux saumâtres, afin de produire de l'eau douce adaptée à la consommation humaine ou à d'autres usages. Le dessalement est réalisé par diverses méthodes telles que l'osmose inverse, la distillation, l'électrodialyse et d'autres, et devient de plus en plus une technologie importante dans le monde entier dans les régions où l'accès à l'eau douce est limité en raison de facteurs naturels ou artificiels tels que la sécheresse, la croissance démographique ou la contamination des sources d'eau douce.

I.3 Les différentes technologies de dessalement

Les deux principales technologies utilisées pour le dessalement sont : les technologies membranaires et la distillation thermique.

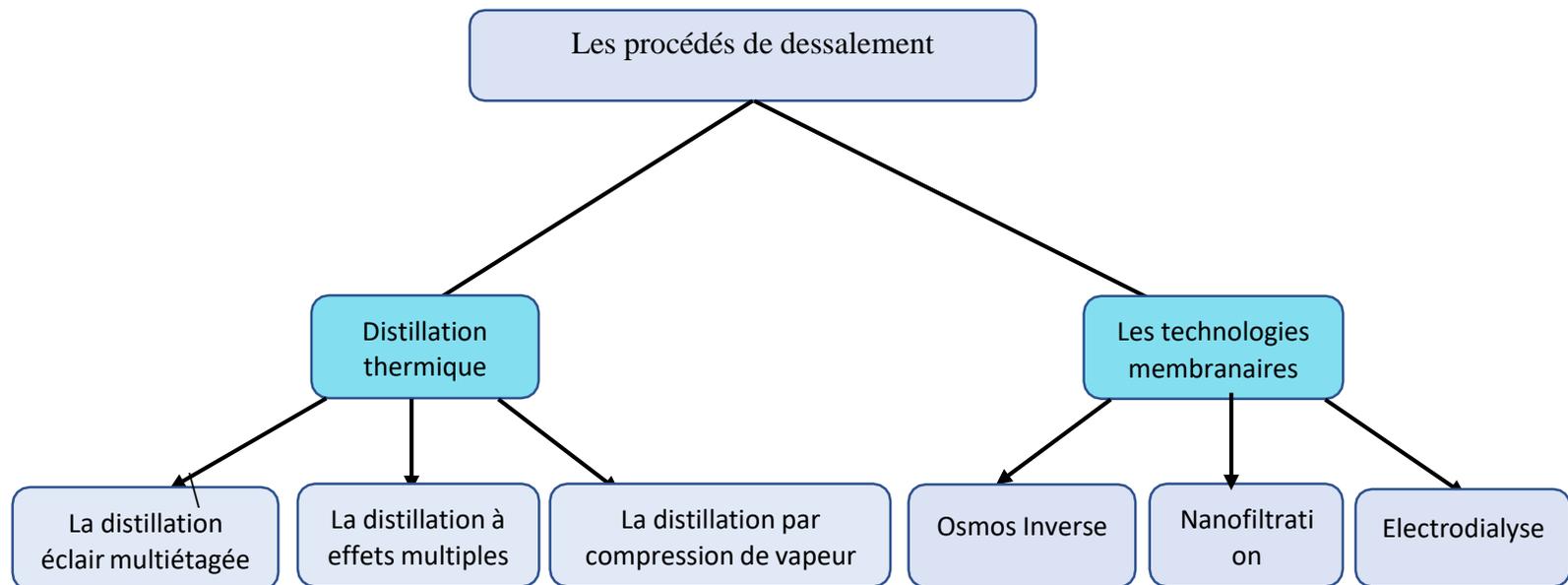


Figure I- 1 Schéma des procédés de dessalement

I.3.1 Distillation thermique

I.3.1.1 Multiple Stage Flash (MSF) (La distillation éclair multiétage)

Les stations MSF contribuent largement à la capacité mondiale de dessalement, dans ce processus, l'eau de mer est chauffée pour produire de la vapeur, qui est ensuite condensée pour produire de l'eau douce. Le processus implique de multiples étapes de chauffage et de refroidissement et nécessite beaucoup d'énergie.

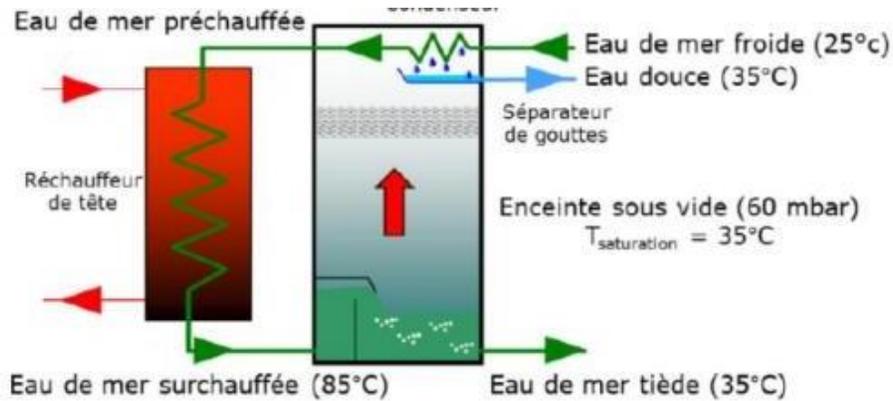


Figure I- 2 Schéma de distillation éclair multiétage

I.3.1.2 Multiple Effect Distillation (MED) (La distillation à effets multiples)

Comme le MFS, le MED consiste à chauffer l'eau de mer pour produire de la vapeur, qui est ensuite condensée pour produire de l'eau douce. Cependant, ce processus utilise plusieurs étapes d'évaporation et de condensation pour augmenter l'efficacité.

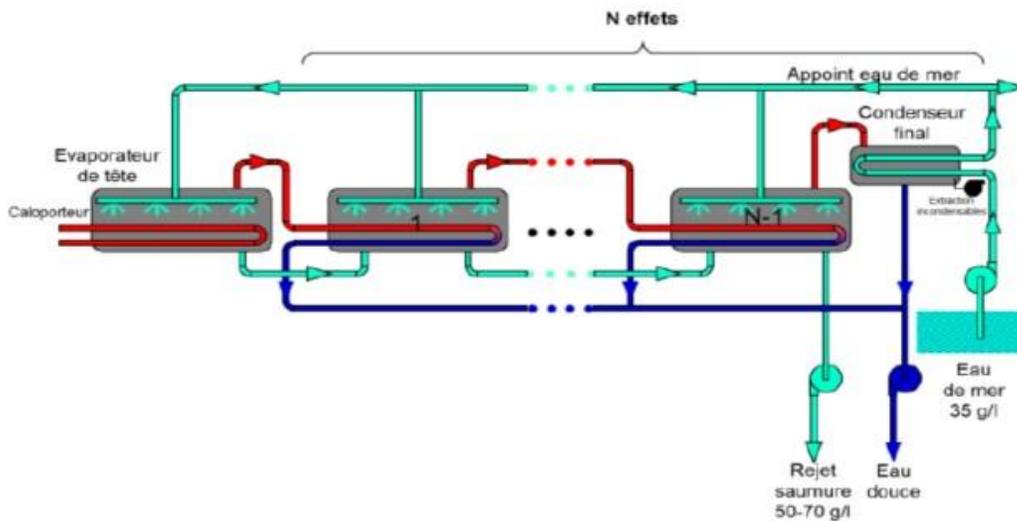


Figure I- 3 Schéma de distillation à effets multiples

I.3.1.3 Vapor Compression Distillation (VCD) (La distillation par compression de vapeur)

Les systèmes VCD fonctionnent en comprimant la vapeur d'eau, ce qui provoque la condensation sur une surface de transfert de chaleur (tube), cela permet à la chaleur de condensation d'être transportée vers la saumure de l'autre côté de la surface, ce qui entraîne la vaporisation. Le compresseur est la principale source d'énergie nécessaire. Le compresseur augmente la pression

du côté de la vapeur et abaisse la pression du côté de la saumure de l'eau d'alimentation afin d'abaisser sa température d'ébullition.

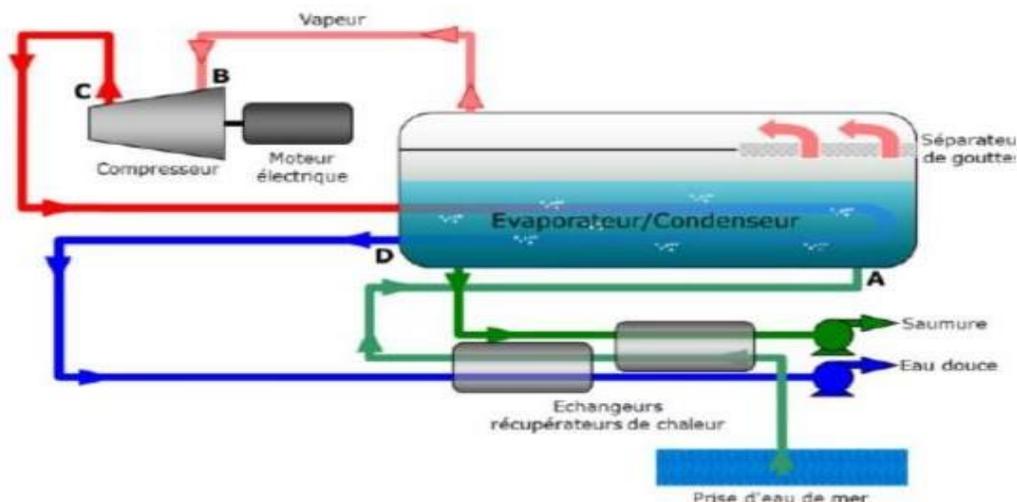


Figure I- 4 Schéma de distillation par compression de vapeur

I.3.2 Les technologies membranaires

I.3.2.1 Osmose Inverse

Les systèmes à osmose inverse, inversent le processus naturel de transport du solvant à travers une membrane semi-perméable, d'une région à faible concentration de soluté vers une région à plus forte concentration de soluté, afin d'égaliser les énergies libres. Dans l'OI, une pression externe est appliquée à l'eau à haute teneur en soluté (concentrée) pour faire migrer le solvant (l'eau) à travers la membrane, laissant les solutés (sels et autres non-perméables) dans une saumure plus concentrée. Certaines membranes rejettent jusqu'à 99% de tous les solides ioniques. L'augmentation de la pression accroît le taux de perméation, mais l'encrassement augmente également. Les procédés d'OI peuvent produire de l'eau dont le TDS est compris entre 10 et 500 mg/L.

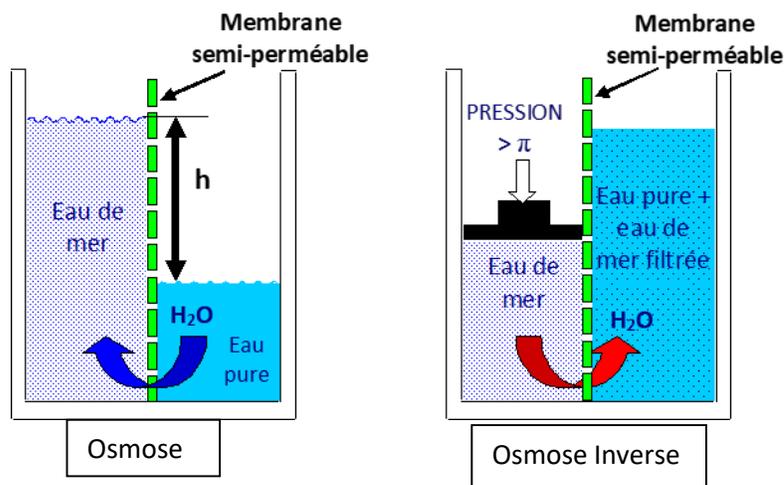


Figure I- 5 Principe de l'osmose inverse

I.3.2.2 Nanofiltration

Les membranes de nanofiltration sont capables d'éliminer les ions bivalents tels que le calcium, le magnésium et le sulfate, ainsi que les matières organiques, les bactéries et les virus, tout en laissant passer les ions monovalents tels que le sodium et le chlorure. La nanofiltration est donc particulièrement utile pour éliminer des contaminants spécifiques qui ne peuvent pas être éliminés efficacement par d'autres types de membranes de filtration, comme l'osmose inverse.

I.3.2.3 Electro dialyse

Le processus d'électrodialyse utilise une série de membranes d'échange d'anions et de cations en alternance, qui séparent les ions de l'eau en deux flux. Le champ électrique créé par le courant entraîne les ions chargés positivement (cations) à travers la membrane cationique (CEM), tandis que les ions chargés négativement (anions) sont entraînés à travers la membrane anionique (AEM). Les ions sont ensuite retirés de l'eau, produisant deux flux : l'un appauvri en ions (l'eau dessalée) et l'autre concentré en ions (la saumure).

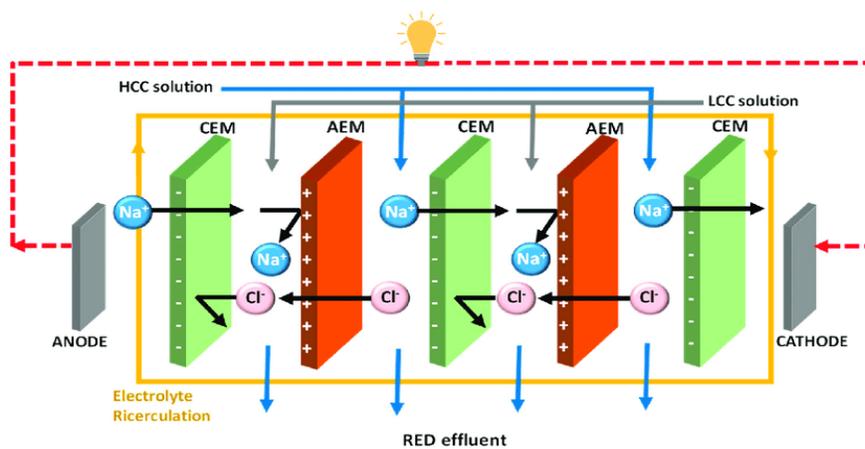


Figure I- 6 Schéma de l'électrodialyse

I.4 Choix de procédé de dessalement

Il existe plusieurs procédés de dessalement différents et le choix de celui qui convient dépend de plusieurs facteurs, notamment :

- La qualité de l'eau d'alimentation : La qualité de l'eau d'alimentation, y compris sa concentration en sel, sa température et ses solides en suspension, peut affecter l'efficacité du processus de dessalement. Vous devez donc choisir un procédé de dessalement capable de gérer les caractéristiques de l'eau d'alimentation.
- L'échelle d'exploitation : La taille de l'usine de dessalement peut influencer sur le choix du procédé de dessalement. Certains procédés conviennent mieux aux opérations à petite échelle, tandis que d'autres sont plus adaptés aux opérations à grande échelle.
- Consommation d'énergie : L'énergie nécessaire au fonctionnement du procédé de dessalement est un facteur essentiel à prendre en compte. Certains procédés sont plus économes en énergie que d'autres, et vous devez choisir un procédé à la fois efficace et économe en énergie.
- Le coût : Le coût du processus de dessalement est un autre facteur crucial à prendre en considération. Certains procédés sont plus coûteux que d'autres, et vous devez choisir un procédé qui soit rentable et qui corresponde à votre budget.
- L'impact sur l'environnement : L'impact environnemental du processus de dessalement est un autre facteur essentiel à prendre en compte. Certains procédés peuvent avoir un impact environnemental plus important que d'autres, et vous devez choisir un procédé respectueux de l'environnement et durable.
- Exigences en matière de maintenance : Les besoins en maintenance de chaque technologie doivent être pris en compte, car certaines technologies nécessitent plus de maintenance que d'autres.

En fonction de ces facteurs, la technologie de dessalement la plus appropriée peut être sélectionnée. Chaque technologie a ses propres avantages et inconvénients, et le choix dépendra des exigences spécifiques du projet.

I.4.1 Choix de procédé en Algérie

Il est nécessaire de mentionner que le choix du procédé de dessalement varie d'un pays à l'autre. Il faut souligner également que les deux principaux facteurs de choix du procédé de dessalement sont l'énergie et les membranes. En ce qui concerne l'énergie, l'Algérie, dans les années 90 et jusqu'au début des années 2000, utilisait la distillation, mais elle consommait environ 7 à 10 kWh/m³, ce qui est beaucoup. L'osmose inverse, en revanche, est censée consommer 3,5 à 5 kWh/m³, mais cette estimation a été faite sans tenir compte de la perte d'énergie au cours de ce processus. Pour être plus précis, l'osmose inverse nécessite une pression élevée pour assurer le dessalement à travers les membranes, cette pression est fournie par des pompes à haute pression.

La question qui se pose maintenant est de savoir où va cette pression une fois que l'eau de mer traverse les membranes, et bien à l'époque il s'agissait d'une perte d'énergie, donc techniquement l'osmose inverse au début consommait la même valeur que la distillation tenant compte de cette perte. Par la suite, les systèmes de récupération d'énergie PX sont apparus et la consommation de l'osmose inverse a commencé réellement à atteindre 3,5 à 5 kWh/m³. Maintenant, si on parle des membranes, il ne faut pas nier qu'elles sont très efficaces pour éliminer le sel et les autres impuretés de l'eau de mer. Cependant, avant d'introduire l'eau de mer dans les membranes, cette dernière doit passer par un prétraitement qui englobe la coagulation, la floculation et la filtration afin d'éliminer toutes les particules et les contaminants qui peuvent colmater les membranes. En outre, ces membranes sont très coûteuses et doivent être nettoyées régulièrement en utilisant des produits chimiques spéciaux. Les stations de dessalement algériennes utilisent toutes l'osmose inverse, sauf une qui opte pour le MSF.

I.5 Conclusion

En raison du changement climatique et de ses effets sur la pénurie d'eau dans le monde, l'Algérie, qui est un pays aride a été fortement touché, par conséquent, le gouvernement se concentre sur le développement du dessalement pour répondre aux besoins en eau du pays. Elle dispose de 11 grandes stations opérationnelles, d'une station en cours de construction et de cinq stations prévues pour l'année 2024. Le dessalement est un processus de traitement de l'eau de mer par différentes techniques qui se divisent en deux catégories : la distillation thermique et les technologies membranaires. La distillation thermique comprend la distillation flash à plusieurs étages, la distillation à effets multiples et la distillation par compression de vapeur. Les technologies membranaires comprennent : l'osmose inverse, la nanofiltration et l'électrodialyse. Le choix des techniques utilisées dépend de multiples facteurs : la qualité de l'eau telle que la salinisation de l'eau de mer, l'échelle de l'opération, la consommation d'énergie, coût et de l'impact sur l'environnement, sans oublier les exigences en matière de maintenance. Si on devait s'en tenir à deux facteurs, ce serait l'énergie et les membranes. Chaque technique a ses aspects positifs et négatifs, et l'Algérie de son côté a opté pour l'osmose inverse pour la majorité de ses usines. Au final, le dessalement reste l'un des principaux procédés permettant de produire de l'eau et d'assurer la sécurité hydrique.

Chapitre II

Gestion et valorisation de la saumure

Introduction

Au cours du processus de dessalement, une quantité importante d'eau salée concentrée, appelée saumure, est produite comme déchet. Cette saumure peut être nocive pour la vie marine et l'environnement ainsi que la station de dessalement, si elle n'est pas correctement gérée. Une gestion efficace de la saumure est essentielle pour la durabilité du dessalement et des autres industries qui produisent de la saumure. En mettant en œuvre des stratégies appropriées de gestion des saumures, il est possible de minimiser l'impact environnemental du rejet et de l'élimination des saumures, de protéger la santé humaine et de récupérer des ressources précieuses à partir de ce flux de déchets. Dans ce chapitre, on va explorer les différentes alternatives de gestion ainsi que les technologies de récupération qui permettront de valoriser la saumure.

II.1 Définition de la saumure

Les stations de dessalement retirent le sel et d'autres minéraux de l'eau de mer ou les eaux saumâtres afin de produire de l'eau douce destinée pour l'AEP, l'irrigation ou pour d'autres fins. La saumure est un sous-produit du processus de dessalement. Il s'agit d'une solution très concentrée de sel et d'autres minéraux qui ont été retirés de l'eau de mer.

La saumure peut contenir divers minéraux et produits chimiques tels que le sodium, le magnésium, le calcium et le chlore, en fonction de l'emplacement et du type d'usine de dessalement. La concentration de sel dans la saumure peut être deux à trois fois supérieure à celle de l'eau de mer. La saumure peut constituer un problème environnemental important, car elle peut être nocive pour la vie marine si elle n'est pas correctement gérée. La méthode d'élimination la plus courante consiste à rejeter la saumure dans l'océan ou dans d'autres masses d'eau. Cette méthode peut toutefois avoir des effets négatifs sur les écosystèmes marins, tels que des changements dans la température et la salinité de l'eau, et l'accumulation de polluants. Certaines stations de dessalement utilisent des méthodes innovantes pour l'élimination de la saumure, telles que l'injection en puits profond ou les bassins d'évaporation, afin de minimiser l'impact sur l'environnement.

II.2 Composition de la saumure

La composition de la saumure peut varier en fonction du type de processus de dessalement et de la qualité de l'eau d'alimentation. Cependant, en général, la saumure est une solution d'eau salée très concentrée qui est produite en tant que sous-produit du dessalement. La saumure contient généralement une forte concentration de sels dissous, notamment du chlorure de sodium (NaCl), du chlorure de magnésium (MgCl₂) et du chlorure de calcium (CaCl₂). Elle peut également contenir d'autres minéraux et oligo-éléments, tels que le bore, qui peuvent être nocifs pour les plantes et la vie aquatique s'ils sont présents en fortes concentrations. Outre les sels et les minéraux, la saumure peut également contenir des produits chimiques et d'autres contaminants utilisés dans le processus de dessalement, tels que des agents de nettoyage, des antitartres et des désinfectants. Ces produits chimiques peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement s'ils sont libérés dans l'écosystème environnant, et nécessitent donc une gestion et une élimination appropriées afin de minimiser leurs effets néfastes potentiels. Dans l'ensemble, la composition de la saumure est une considération importante pour la gestion des installations de dessalement, car elle peut avoir un impact à la fois sur l'environnement et sur le coût et la faisabilité de l'élimination de la saumure.

II.3 Impact de dessalement

Le dessalement peut avoir des effets à la fois positifs et négatifs sur l'environnement et la société humaine. Du côté positif, il constitue une source importante d'eau douce pour les régions confrontées à une pénurie d'eau due à la sécheresse, à la croissance démographique et à d'autres facteurs. Cela peut contribuer à atténuer les pénuries d'eau et à fournir une source fiable d'eau pour l'AEP, l'irrigation et d'autres usages. Cependant, le dessalement a également plusieurs effets négatifs. Le processus consomme beaucoup d'énergie, ce qui pourrait entraîner une augmentation des émissions de gaz à effet de serre et favoriser le changement climatique. En outre, la prise d'eau de mer peut avoir des effets négatifs sur la vie marine, car elle peut piéger et tuer des poissons et d'autres organismes aquatiques. Le rejet de saumure, un sous-produit du dessalement, peut également avoir des effets négatifs sur l'environnement marin, car elle peut être très salée et contenir des produits chimiques et d'autres contaminants susceptibles de nuire aux écosystèmes aquatiques. En outre, le dessalement est souvent coûteux et peut s'avérer financièrement insoutenable pour de nombreuses communautés, en particulier dans les pays en développement. Il nécessite également des coûts d'infrastructure et d'entretien importants, qui peuvent constituer une charge pour les gouvernements locaux et les contribuables. Par conséquent, il est important d'examiner attentivement ses impacts potentiels et de mettre en œuvre des mesures pour les atténuer afin de garantir une gestion durable et responsable de l'eau.

II.4 Impact environnemental dû à la saumure

C'est incontestablement la saumure qui a l'effet le plus important sur l'environnement récepteur. Les effets environnementaux des rejets de saumure concentrée doivent être examinés de manière plus approfondie. Les conditions et le lieu du déversement, en plus du volume lui-même, sont essentiels pour déterminer les effets possibles. Les rejets de saumure endommagent les écosystèmes marins, augmentent les niveaux de sel et réduisent les niveaux d'oxygène dans l'eau, ce qui peut entraîner la disparition de la vie aquatique. En outre, la saumure peut avoir un impact sur la qualité de l'eau locale et augmenter le risque de prolifération d'algues dangereuses. De plus, la saumure de dessalement contient un certain nombre de composés produits par le processus d'osmose inverse, en plus des sels concentrés :

- Les produits de la corrosion
- Les antitartres
- Les antisalissure
- Les antimousses

Y compris le chlore et d'autres sous-produits de désinfection qui peuvent être toxiques, ainsi que des produits chimiques présents dans l'eau de prise d'eau. Le rejet de ce mélange dans l'environnement peut avoir des effets néfastes sur les organismes. Ces effets peuvent être mesurés par des tests en laboratoire, des essais biologiques de diverses concentrations d'effluents sur différentes espèces et des études sur le terrain basées sur les changements dans la communauté d'organismes dans l'environnement récepteur.

II.5 Techniques de gestion de la saumure

De nombreuses techniques sont employées pour éliminer la saumure en raison de ses effets néfastes. Les méthodes les plus courantes pour éliminer les concentrés sont les suivantes :

- Le rejet dans les eaux de surface
- Déversement dans les égouts sanitaires
- Injection en puits profond
- Bassins d'évaporation
- Irrigation par aspersion
- Rejet sans liquide (ZLD)

La saumure peut être diluée avec de l'eau salée ou d'autres sources d'eau pour réduire sa salinité et faciliter son élimination, en plus des autres moyens mentionnés. Toutefois, cette approche peut être limitée par l'accessibilité de l'eau pour la dilution et les effets potentiels sur la vie marine locale.

II.5.1 Rejet dans les eaux de surface

Cette méthode d'élimination implique le rejet du concentré de dessalement dans une masse d'eau de surface telle que l'océan ou la mer, la rivière, l'estuaire, la baie ou le lac à proximité. Le rejet du concentré de la station de dessalement par le biais d'un nouvel exutoire océanique est largement pratiqué dans le monde entier et est très populaire pour les projets de toutes tailles. Plus de 90 % des grandes usines de dessalement d'eau de mer en activité rejettent leurs concentrés par un nouvel émissaire océanique spécialement conçu et construit à cet effet. L'évacuation en mer s'effectue généralement selon l'une des méthodes suivantes :

- Rejet direct par le biais d'un nouvel émissaire océanique
- Rejet par l'émissaire d'une station d'épuration existante
- Rejet par l'émissaire d'une centrale électrique existante



Figure II- 1 Rejet de saumure dans la mer

II.5.2 Déversement dans les égouts sanitaires

Cette méthode de rejet de la saumure ne convient qu'à l'élimination des concentrés provenant de très petites stations de dessalement d'eau saumâtre et d'eau de mer dans des installations de traitement des eaux usées de grande capacité, principalement en raison des effets négatifs potentiels de la teneur élevée en TDS des concentrés sur les opérations de l'usine de traitement des eaux usées. Le rejet du concentré dans l'égout sanitaire est réglementé par les exigences applicables aux rejets industriels et par les réglementations applicables en matière de rejets du service public responsable de la gestion du système de collecte des eaux usées. La faisabilité de cette méthode d'élimination est limitée par la capacité hydraulique du système de collecte des eaux usées et par la capacité de traitement de la station d'épuration recevant le rejet.

II.5.3 Injection en puits profond

Cette méthode d'élimination implique l'injection de la saumure dans un aquifère souterrain profond confiné acceptable, situé sous un aquifère d'eau douce, à l'aide d'un système de puits d'élimination. Le système d'élimination du concentré par injection en puits profond comprend également un ensemble de puits de surveillance pour confirmer que le concentré ne migre pas vers les aquifères adjacents. Une variante de cette solution d'élimination est l'injection de la saumure dans des gisements de pétrole et de gaz existants afin d'en faciliter la récupération. L'élimination par puits de plage est une autre méthode d'élimination des saumures. Par rapport à l'injection en puits profond, l'élimination par puits de plage consiste à déverser le concentré dans un aquifère côtier relativement peu profond et non confiné, qui achemine finalement ce déversement vers la haute mer à travers le fond de l'océan. Les puits de plage sont utilisés pour les petites et moyennes installations de dessalement et ne sont pas abordés plus loin en raison de l'application limitée de cette pratique et de son taux de réussite.

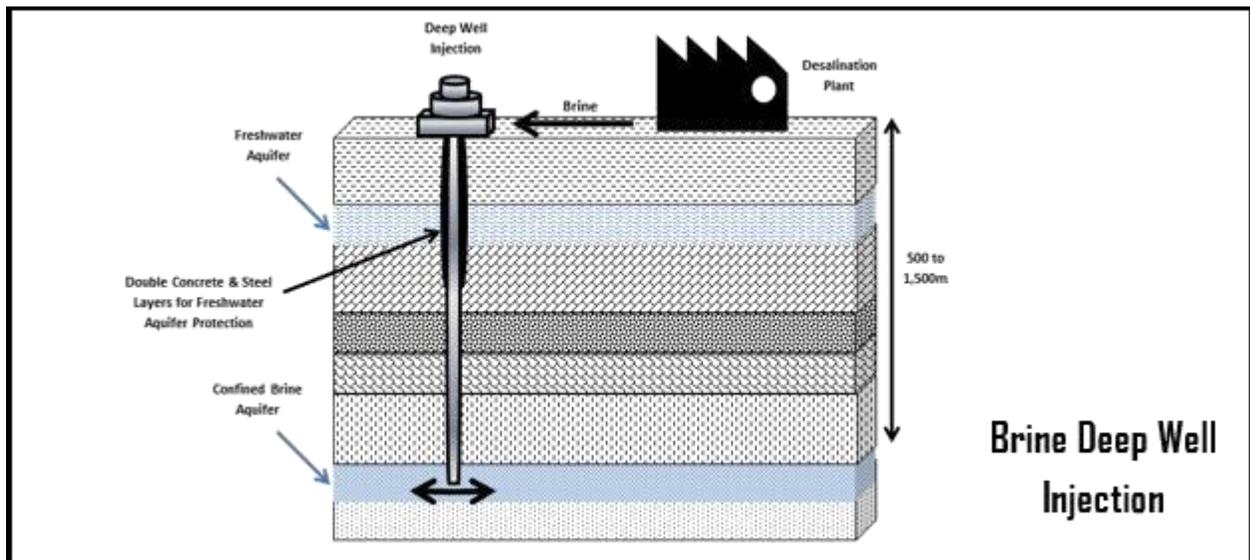


Figure II- 2 Injection de saumure en puits profond

II.5.4 Bassin d'évaporation

Cette méthode est basée sur l'évaporation solaire naturelle de la saumure dans des étangs en terre ou d'autres bassins, doublés et construits par l'homme. Les bassins d'évaporation sont une technologie à rejet nul. Des bassins de rétention sont nécessaires pour le stockage du concentré, tandis que le bassin d'évaporation atteint la salinité élevée nécessaire au fonctionnement normal du bassin. L'utilisation des bassins d'évaporation est limitée par les facteurs suivants :

- Ils ne conviennent qu'à l'élimination de la saumure provenant de petites stations situées dans des zones arides où le coût du terrain est faible.
- Exigences importantes en matière de terrain.
- Nécessité de niveler le terrain.
- Dépendance du climat.
- Le taux d'évaporation diminue à mesure que les niveaux de solides et de salinité dans les bassins augmentent.
- Si les bassins d'évaporation ne sont pas revêtus, une partie de la saumure peut s'infiltrer dans l'aquifère d'eau douce situé sous l'étang.
- Les sels accumulés au fond des bassins sont finalement éliminés dans une dans une décharge appropriée.



Figure II- 3 Bassin d'évaporation

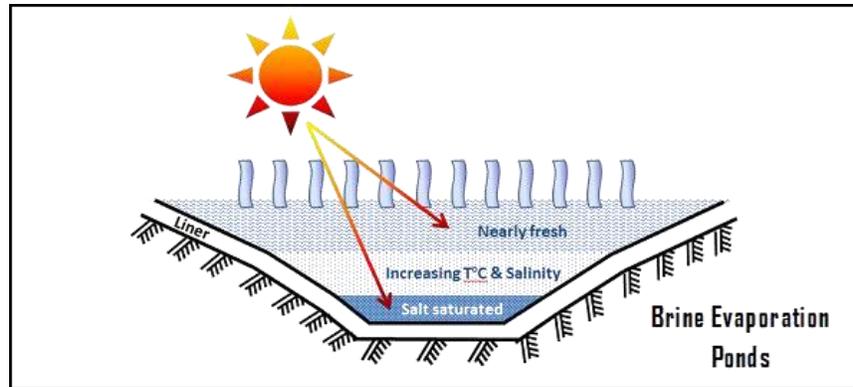


Figure II- 4 Schéma de bassin d'évaporation

II.5.5 Irrigation par aspersion

Cette technologie d'élimination utilise des concentrés pour l'irrigation de cultures tolérantes à la salinité ou de plantes ornementales (pelouses, parcs, terrains de golf, etc.). Les principaux problèmes et contraintes liés à l'irrigation par aspersion sont les suivants :

- La nature saisonnière de l'irrigation.
- Limitée aux petites stations de dessalement.
- Une solution d'élimination de secours est nécessaire lorsque l'irrigation des cultures n'est pas nécessaire.
- La faisabilité est déterminée par le climat, la disponibilité des terres, la demande d'irrigation et la tolérance à la salinité des plantes irriguées.

II.5.6 Rejet sans liquide (Zero Liquid Discharge ZLD)

Le rejet nul de liquide (ZLD) est un processus de traitement de l'eau qui élimine tous les déchets liquides d'une station de dessalement. Dans le contexte de la saumure de dessalement, le ZLD fait référence à un processus dans lequel toute la saumure produite par une station de dessalement est traitée et réutilisée ou éliminée d'une manière qui empêche tout rejet de liquide dans l'environnement. Un processus ZLD idéal est conçu pour une récupération maximale des ressources. Traditionnellement, les technologies ZLD comprennent des concentrateurs de saumure et des cristalliseurs qui utilisent l'évaporation thermique pour transformer la saumure en eau hautement purifiée et en produits solides prêts à être mis en décharge ou récupérés sous forme de sel. Bien que les systèmes d'évaporation/cristallisation soient les plus couramment utilisés dans les processus de ZLD, d'autres technologies prometteuses telles que l'osmose directe, électrodialyse/Inversion de l'électrodialyse et distillation sur membrane avec des taux de récupération élevés ont émergé et sont utilisées dans différentes combinaisons pour réduire les coûts et augmenter l'efficacité du système. La mise en œuvre d'un système ZLD peut s'avérer difficile et coûteuse, car elle nécessite des équipements spécialisés et une gestion minutieuse du processus de traitement. Cependant, il peut offrir des avantages significatifs, notamment la réduction de l'impact environnemental de l'usine de dessalement et la minimisation de l'utilisation des ressources en eau douce. En outre, dans certaines régions où la pénurie d'eau est un problème

important, la ZLD peut être un moyen efficace de réutiliser l'eau et de réduire la dépendance à l'égard des sources d'eau douce.

II.5.6.1 Concentrateurs

La vapeur est générée à partir de la saumure bouillante dans les systèmes de concentration en utilisant un processus d'évaporation thermique à effet unique. Pour augmenter la quantité de vapeur produite à partir de la saumure, cette vapeur est ensuite mise en circulation après avoir été mise sous pression à l'aide d'un compresseur de vapeur. Ce processus permet généralement d'évaporer la saumure et d'obtenir de l'eau douce à faible salinité. Le flux concentré peut ensuite subir une déshydratation supplémentaire et être éliminé en tant que déchet solide. Le sel concentré peut également être utilisé dans l'industrie. Les concentrateurs pour la compression de vapeur consomment environ dix fois moins d'énergie que les évaporateurs à simple effet, ce qui les rend particulièrement efficaces sur le plan énergétique.

II.5.6.2 Cristallisateurs

Les cristallisateurs sont utilisés afin d'extraire les sels très solubles présents dans la saumure. Ces cuves de cristallisation sont des unités verticales qui fonctionnent soit à la vapeur fournie par une chaudière, soit à la chaleur fournie par des compresseurs à vide pour l'évaporation. Pour ce faire, la saumure est introduite dans le cristallisateur et passe par un échangeur de chaleur à tubes et à calandre, où elle est chauffée à l'aide de la vapeur introduite par le compresseur à vide. L'eau à faible salinité, qui a été séparée de la saumure, est récupérée sous forme de distillat dans le condenseur. La saumure chauffée est ensuite mise en rotation dans un tourbillon à l'intérieur du cristallisateur, où des cristaux de saumure se forment dans le récipient. La masse minérale cristalline est ensuite acheminée vers une centrifugeuse ou un filtre-pressé pour être déshydratée jusqu'à atteindre l'état solide.

II.6 La Dilution de Saumure : Notre Choix Fondé

Nous avons minutieusement évalué diverses méthodes de gestion de saumure, cherchant la solution la plus efficace et adaptée à nos besoins spécifiques. Le déversement dans les égouts sanitaires s'est révélé impraticable en raison des limitations des systèmes d'assainissement à accueillir des débits élevés de saumure. L'injection en puits profond, bien que considérée, a été écartée en raison des préoccupations potentielles pour les nappes phréatiques. Les bassins d'évaporation, nécessitant d'importants terrains que nous ne possédons pas, ont également été écartés de notre choix. L'irrigation par aspersion s'est avérée inadéquate en raison de la salinité élevée de la saumure, même après traitement, et de la limitation des cultures tolérantes à cette concentration saline. Enfin, le ZLD (rejet sans liquide) a été évité en raison de ses coûts élevés. Après un examen approfondi, la dilution est apparue comme la meilleure option, offrant une solution pratique et économique pour la gestion de notre saumure.

II.6 Applications bénéfiques de la saumure

La production de saumure est un effet secondaire du procédé de dessalement, qui permet d'éliminer le sel et d'autres minéraux de l'eau de mer pour la rendre potable et apte à l'irrigation. Bien que la saumure puisse sembler être un déchet, elle offre en fait plusieurs avantages et utilisations possibles si elle est bien traitée. Parmi ces derniers on peut citer:

- Production d'énergie : la saumure peut être utilisée comme source d'énergie dans certaines technologies, comme le dessalement thermique, qui utilise la chaleur de la saumure pour produire de l'électricité ou pour chauffer des bâtiments.
- Utilisations industrielles : la saumure peut être utilisée dans divers processus industriels, notamment la production de chlorure de sodium, de soude caustique et de chlore, ainsi que dans la fabrication de savons, de détergents et de papier, ou encore dans le traitement des métaux.
- Production de sel : la saumure est essentielle à la production de sel. En évaporant l'eau de la saumure, on peut extraire des cristaux de sel qui peuvent être utilisés pour la cuisson et la conservation des aliments, ou dans l'industrie chimique.

II.7 Récupération de l'énergie à partir de la saumure

La récupération d'énergie à partir de la saumure de dessalement peut être une solution rentable pour réduire l'impact environnemental de l'élimination de la saumure et pour récupérer des ressources précieuses telles que les minéraux et les métaux.

II.7.1 Osmose directe

L'osmose directe est un processus qui peut être utilisé pour la récupération d'énergie à partir de la saumure de dessalement. L'osmose directe utilise une membrane semi-perméable pour séparer les molécules d'eau des sels dissous et autres solutés présents dans la saumure et contrairement à l'osmose inverse qui utilise une pression hydraulique, l'osmose directe utilise le gradient de pression osmotique. Le procédé fonctionne en introduisant une solution concentrée, appelée solution d'aspiration, d'un côté de la membrane, ce qui crée un gradient de pression osmotique qui attire l'eau de la saumure à travers la membrane et dans la solution d'aspiration. La solution d'aspiration ou d'extraction est une solution concentrée qui est généralement utilisée pour récupérer de l'énergie ou d'autres ressources précieuses à partir de l'eau d'alimentation. Les solutions d'extraction les plus couramment utilisées comprennent des solutions de sels (NaCl, MgCl₂), de sucres et d'autres composés organiques. Lorsque la solution d'extraction est mise en contact avec l'eau d'alimentation à travers la membrane semi-perméable, les molécules d'eau diffusent à travers la membrane de l'eau d'alimentation vers la solution d'aspiration, sous l'effet de la différence de pression osmotique.

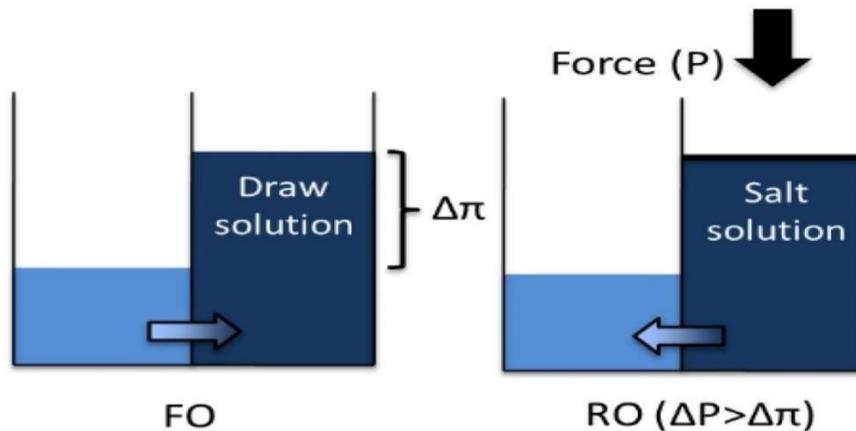


Figure II- 5 Schema d'osmose direct

II.7.2 Electrolyse

L'électrolyse peut être utilisée pour la récupération de la saumure, qui est le processus d'extraction du sel et d'autres minéraux de l'eau saline ou de la saumure. Au fur et à mesure que les ions sont séparés de la saumure, la concentration de sel et d'autres minéraux dans l'eau restante est réduite, ce qui permet de la réutiliser ou de l'éliminer. Tous les cations tels que Na^+ , K^+ , Mg^{2+} et Ca^{2+} et tous les anions tels que les chlorures, les sulfates et les nitrates sont séparés efficacement de la saumure grâce à cette technologie, ces derniers peuvent être collectés et traités pour être utilisés dans diverses applications, telles que les processus industriels ou comme matière première pour la production de produits chimiques. L'électrolyse est un procédé relativement économe en énergie pour la récupération de la saumure par rapport à d'autres méthodes telles que l'évaporation thermique, qui nécessite beaucoup d'énergie pour chauffer la saumure afin d'évaporer l'eau. Cependant, l'électrolyse est généralement utilisée pour les eaux de salinité faible à modérée et peut ne pas être aussi efficace pour les saumures très concentrées.

II.8 Récupération des minéraux dans la saumure

La récupération des minéraux contenus dans les saumures de dessalement est apparue comme une solution prometteuse pour la gestion durable des ressources. Le processus consiste à extraire les minéraux précieux de la saumure et à les utiliser dans diverses applications industrielles. La récupération des minéraux de la saumure de dessalement permet non seulement de réduire l'impact environnemental de l'élimination de la saumure, mais constitue également une source potentielle de revenus et réduit la dépendance à l'égard des ressources minérales non renouvelables. Plusieurs minéraux peuvent être extraits de la saumure de dessalement, notamment le chlorure de sodium, le magnésium, le calcium, le potassium, le lithium et le bore. Cependant, la récupération des minéraux de la saumure est un processus complexe qui nécessite un examen minutieux de plusieurs facteurs tels que le type de processus de dessalement, la concentration des minéraux dans la saumure et la faisabilité économique du processus de récupération. Parmi les minéraux qui peuvent être récupérés de la saumure de dessalement, on peut citer :

- Chlorure de sodium (NaCl) : Il s'agit du principal minéral présent dans la saumure de dessalement et il est généralement extrait pour être utilisé comme sel de table ou dans des applications industrielles telles que la production de chlore, de soude caustique et d'autres produits chimiques.
- Magnésium (Mg) : Le magnésium peut être extrait de la saumure de dessalement et utilisé dans diverses applications, telles que la production d'alliages, d'engrais et de produits pharmaceutiques.
- Calcium (Ca) : Le calcium est un autre minéral présent dans la saumure de dessalement qui peut être extrait et utilisé dans la production de ciment, d'acier et d'autres produits industriels.
- Potassium (K) : Le potassium est un minéral important pour la croissance des plantes et peut être extrait de la saumure de dessalement et utilisé comme engrais.
- Lithium (Li) : La saumure de dessalement peut contenir des quantités importantes de lithium, un minéral précieux utilisé dans la production de batteries et d'autres appareils électroniques.
- Bore (B) : Le bore est un autre minéral présent dans la saumure de dessalement qui peut être extrait et utilisé dans diverses applications, telles que la production de verre borosilicaté et comme retardateur de flamme.
- Strontium (Sr) : métal présent dans la saumure de dessalement et utilisé dans la production d'aimants en ferrite et dans d'autres processus industriels.
- Brome (Br) : C'est un élément non métallique qui est utilisé dans une variété d'applications industrielles, y compris la production de retardateurs de flamme, de produits chimiques agricoles et de produits pharmaceutiques.

On peut également ajouter le Césium, Lithium, Uranium and Nitrogen, même s'ils sont en faibles concentrations.

En ce qui concerne les technologies de récupération, nous pouvons les résumer dans le tableau ci-dessous :

Tableau II- 1 Technologies de récupération des minéraux.

Minéraux Récupérés	Technologie de récupération des minéraux
Chlorure de sodium	Les procédés conventionnels d'évaporation et de cristallisation. La saumure est chauffée et l'eau est évaporée pour augmenter la concentration des cristaux de sel, qui peuvent ensuite être collectés
Magnésium	La précipitation, l'échange d'ion et l'extraction par solvant. La précipitation implique l'ajout de produits chimiques à la saumure afin de séparer le chlorure de magnésium sous forme solide. L'échange d'ions est le passage de la saumure à travers un lit de résine qui adsorbe sélectivement les ions de magnésium. L'extraction par solvant consiste à utiliser des solvants organiques (par l'acide di-(2-éthylhexyl) phosphorique) pour extraire sélectivement les ions magnésium de la saumure.
Calcium	L'échange d'ions, l'adsorption et la précipitation par ajout des produits chimiques à la saumure pour séparer le chlorure de calcium sous forme solide (Cristallisation par congélation eutectique)
Potassium	L'extraction par solvant consiste à utiliser des solvants organiques pour extraire sélectivement les ions potassium de la saumure et la cristallisation consiste à refroidir la saumure pour que le chlorure de potassium se cristallise sous forme solide.
Lithium	<ul style="list-style-type: none"> - Électrodialyse avec des membranes d'échange d'ions sélectifs monovalents. - Approche électrochimique par l'utilisation d'une batterie de dessalement à lithiation sélective.
Bore	L'échange d'ions, l'adsorption et les procédés membranaires
Strontium	L'échange d'ions, l'adsorption et la précipitation
Brome	Les traitements chimiques, tels que la précipitation, l'oxydation et l'extraction par solvant. L'oxydation consiste à oxyder les ions bromure dans la saumure pour former du brome élémentaire. L'extraction par solvant consiste à utiliser des solvants organiques pour extraire sélectivement le brome de la saumure.

II.9 Conclusion

Compte tenu des impacts du dessalement et de la composition de la saumure qui est un sous-produit. La nécessité de gérer la saumure est soulignée afin de minimiser ses impacts négatifs sur l'environnement. Nous examinons ensuite les différentes techniques qui peuvent être utilisées pour gérer la saumure de dessalement, notamment le rejet dans les eaux de surface, le déversement dans les égouts sanitaires, l'injection en puits profond, les bassins d'évaporation, l'irrigation par aspersion, le rejet sans liquide (ZLD) et la dilution. Les avantages et les limites de chaque technique sont examinés de manière détaillée. Le potentiel d'extraction des minéraux de la saumure de dessalement, qui peuvent être utilisés pour créer des avantages économiques supplémentaires, tels que le chlorure de sodium, le magnésium et le carbonate de calcium, est également mis en évidence. Les différentes méthodes d'extraction de chaque minéral, notamment la précipitation, l'échange d'ions et les procédés membranaires, sont également décrites.

Chapitre III

Rejet direct dans la mer

Introduction

Bien que le dessalement soit devenu une méthode de plus en plus populaire pour fournir de l'eau douce dans les régions où les ressources en eau douce sont limitées, le processus génère une quantité importante de déchets appelés saumure. Cette dernière constitue par la suite l'une des principales préoccupations des pays qui produisent de l'eau à partir du dessalement.

Son rejet constitue un dilemme, même s'il existe de nombreuses méthodes comme indiqué précédemment, il y a toujours un inconvénient qui rend les méthodes impossibles ou difficiles, qu'il s'agisse du coût ou de l'efficacité. C'est pourquoi la plupart des pays optent pour le rejet direct dans l'océan. Bien que cette méthode soit souvent considérée comme une solution pratique, les impacts négatifs potentiels du rejet de saumure sur les écosystèmes marins soulèvent des inquiétudes.

Dans ce chapitre, nous étudierons les problèmes liés au rejet direct de la saumure de dessalement dans la mer.

II.7 Rejet direct dans la mer

Le rejet de saumure par de longs émissaires en mer est une stratégie d'élimination économique pour les stations de dessalement de l'eau de mer. La plupart des stations choisissent de rejeter leur saumure en mer pour plusieurs raisons. La cause principale est que la mer peut diluer la saumure très concentrée, réduisant ainsi l'impact environnemental du rejet. Et bien sûr, comme les stations de dessalement sont situées dans des zones côtières, le rejet de la saumure dans l'océan est souvent la solution la plus rentable et la plus pratique.

Le rejet se fait par des émissaires en mer, qui ont pour but d'éliminer les concentrés de la station tout en protégeant l'environnement. Cela signifie principalement minimiser les zones à forte salinité, au-delà de la plage de tolérance typique des organismes aquatiques qui habitent les zones de décharges. Les deux principales options disponibles pour accélérer le mélange des concentrés pour les rejets en mer sont de s'appuyer sur les capacités de mélange naturelles de la zone de marée (vagues marines) ou de rejeter le concentré au-delà de la marée et d'installer un diffuseur à la fin du rejet pour améliorer le mélange. Il est essentiel de se rappeler que le rejet de saumure dans la mer peut avoir des effets néfastes sur l'environnement, tels que la modification de la salinité et de la température de l'eau et la détérioration de la vie marine. Par conséquent, afin de réduire l'impact environnemental des rejets de saumure, les stations de dessalement doivent les surveiller et les gérer avec soin. De plus, à l'heure actuelle des efforts sont en cours pour créer des techniques de remplacement pour l'élimination de la saumure, telles que le traitement en vue d'une réutilisation ou l'utilisation dans des processus industriels.

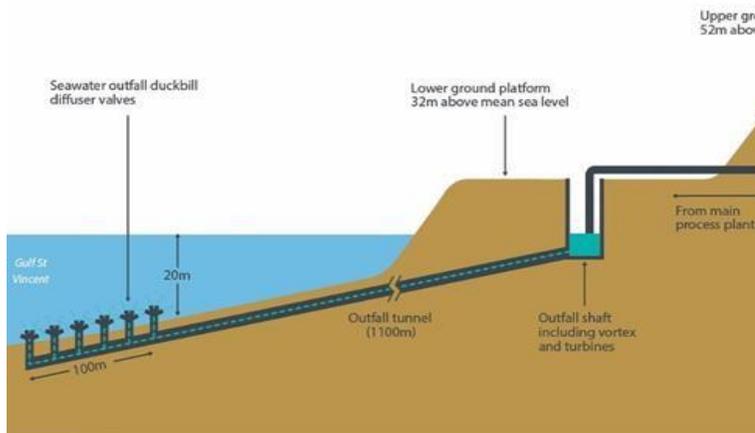


Figure III- 1 Système de décharge



Figure III- 2 Diffuseur de rejet de saumure

II.8 Rejet direct de saumure dans la mer à l'échelle internationale

Le rejet direct de saumure dans la mer est très utilisé par les pays qui dépendent essentiellement du dessalement pour la production d'eau. Parmi ces pays : l'Arabie saoudite, les Emirats arabes unis et le Qatar.

- **L'Arabie-Saoudite**

L'Arabie Saoudite est l'un des pays les plus dépendants du dessalement pour satisfaire ses besoins en eau, en raison de son climat aride et de ses ressources en eau renouvelables inférieures à 1000 m³/habitant/an, ce qui signifie qu'il est impossible d'obtenir de l'eau à partir de ressources naturelles et que le dessalement est donc la solution à retenir. Les usines de dessalement de la région sont alimentées par les eaux côtières de la mer Rouge ou du golfe Arabo-Persique. Ces usines de dessalement s'approvisionnent en eau à partir de systèmes de prise d'eau et la rejettent directement dans les eaux côtières. Il faut noter que la mer Rouge est moins utilisée que le Golfe pour le dessalement. En ce qui concerne le rejet de saumure, toutes les stations de dessalement du Golfe rejettent environ 115 Mm³/j, et celles de la mer Rouge environ 15 Mm³/j.

- **Les Émirats arabes unis**

Les Émirats arabes unis dépendent principalement des eaux souterraines en tant que ressource, mais avec leur énorme croissance économique et leur population, ils en ont surexploité et se sont tournés vers le dessalement. Si nous prenons l'exemple d'Abu Dhabi et de Dubaï, les deux villes les plus importantes des EAU, nous voyons que les usines de dessalement de ces deux villes sont très importantes pour l'économie des EAU. Ces stations rejettent de la saumure résiduelle à un rythme d'environ 1,6 Mm³/J dans le sud du golfe Persique. D'autres usines de dessalement aux Émirats arabes unis rejettent également la saumure usée directement dans la mer.

- **Le Qatar**

Le Qatar dépend de plus en plus de l'eau dessalée en raison de l'augmentation de la population et de la surexploitation des ressources naturelles en eau douce. 99,9 % de l'eau potable du Qatar est fournie par dessalement. Il existe trois grandes usines de dessalement au Qatar, qui dépassent toutes les trois une capacité de 500 000 m³/j et qui se déversent toutes dans la mer.

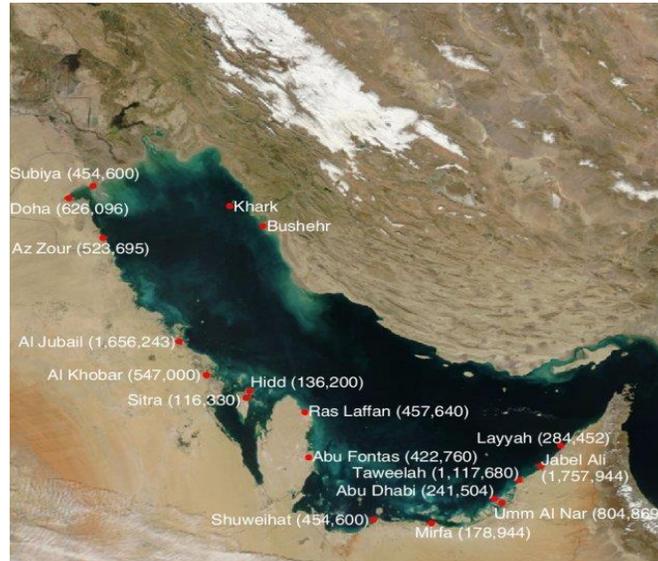


Figure III- 3 Principales stations de dessalement dans le golfe Arabo-Persique

II.9 Le rejet direct dans la mer en Algérie

Comme indiqué précédemment, l'Algérie possède 14 stations de dessalement, dont 11 ont une capacité supérieure à 100 000 m³/jour. Toutes les stations de dessalement sont situées sur la côte méditerranéenne, elles rejettent donc toutes de la saumure dans cette dernière.

Si l'on prend l'exemple de la station d'El Hamma avec un rejet de saumure d'environ 244444 m³/J, plusieurs travaux antérieurs ont montré que l'émissaire de cette dernière n'est pas adapté à l'emplacement du site. En effet, l'interaction entre le jet et la surface de l'eau est défavorable à la dispersion de la saumure. En d'autres termes, la façon dont la saumure est déversée dans l'eau fait qu'elle ne se répand pas et ne se mélange pas à l'eau environnante aussi bien qu'elle le devrait, ce qui peut entraîner des conséquences négatives sur l'écosystème marin local.



Figure III- 4 Situation du rejet de saumure d'El Hamma

Passons maintenant au dessalement dans les stations de l'ouest, en prenant comme exemple Beni Saf et Mostaganem. Ces deux usines ont une capacité de 200 000 m³/j avec environ 220 000 m³/j de saumure déversée à une salinité approximative de 68 g/l. Beni saf évacue sa saumure par une sortie de 1,8 m de diamètre, tandis que pour Mostaganem l'évacuation de la saumure se fait par un émissaire équipé de 50 diffuseurs à l'extrémité. L'impact de ces deux stations sur la mer est assez différent. Pour Beni Saf, à proximité des zones de rejet, les valeurs de salinité du fond de la mer ont atteint 62,8 et l'augmentation de la salinité au-delà de 38 a atteint plus de 1,5 km du point de rejet. La valeur maximale obtenue à Mostaganem était de 39,8, et à Mostaganem, elle n'a touché que 200 m. La différence entre l'impact des deux stations réside dans les diffuseurs qui permettent un meilleur mélange de la saumure et de l'eau de mer à Mostaganem, ce qui permet une sorte de dilution acceptable.

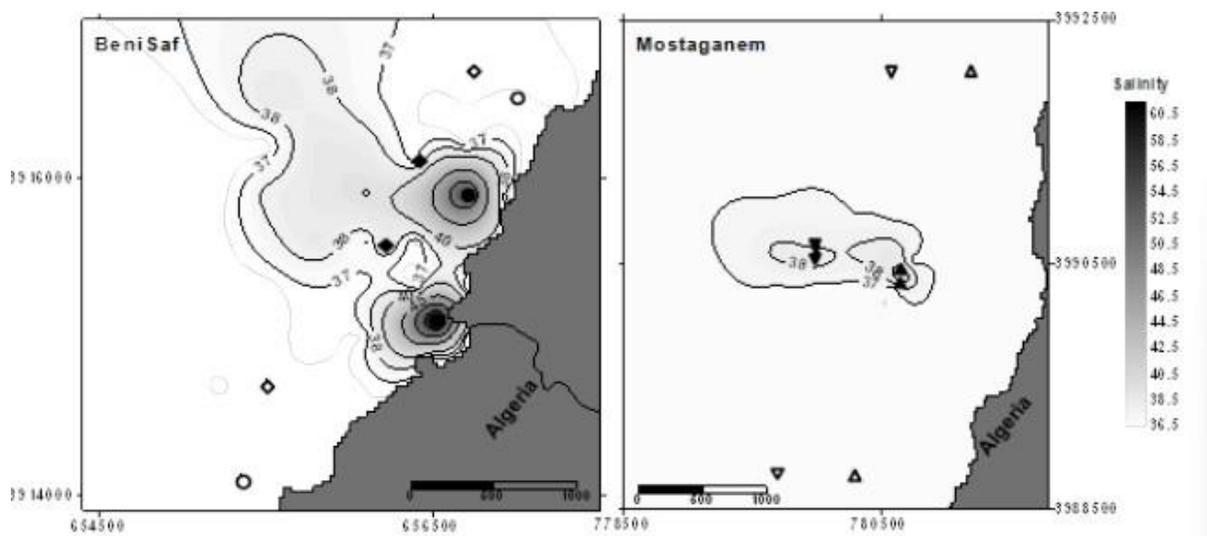


Figure III- 5 représentation spatiale de la distribution de la salinité au fond de la mer pour les deux sites

La station de dessalement de l'eau de Honaine à Telemcen rejette également de la saumure directement dans la mer. Une augmentation de la salinité, de la conductivité, du calcium, du magnésium et des chlorures a été constatée.

II.10 Les effets de la décharge de saumure dans le champ proche et lointain

Le rejet de saumure dans la mer est une méthode courante d'élimination des déchets générés lors du dessalement de l'eau de mer. La saumure est une solution hautement concentrée qui peut avoir un impact négatif sur les écosystèmes marins si elle n'est pas gérée correctement. En général, le rejet direct peut entraîner deux problèmes essentiels : une pollution environnementale majeure et un problème de recirculation ou l'eau salée rejetée ne doit pas affecter l'eau d'alimentation.

Lorsque l'on parle des impacts du rejet direct de saumure dans la mer, deux régions principales doivent être prises en considération : la région du champ proche et la région du champ lointain. Le champ proche dépend de la conception du système de décharge, qui vise à augmenter le taux de dilution dans cette zone. Le champ lointain est situé loin du point de rejet où la saumure s'écoule vers le fond marin en raison de l'écoulement par gravité.

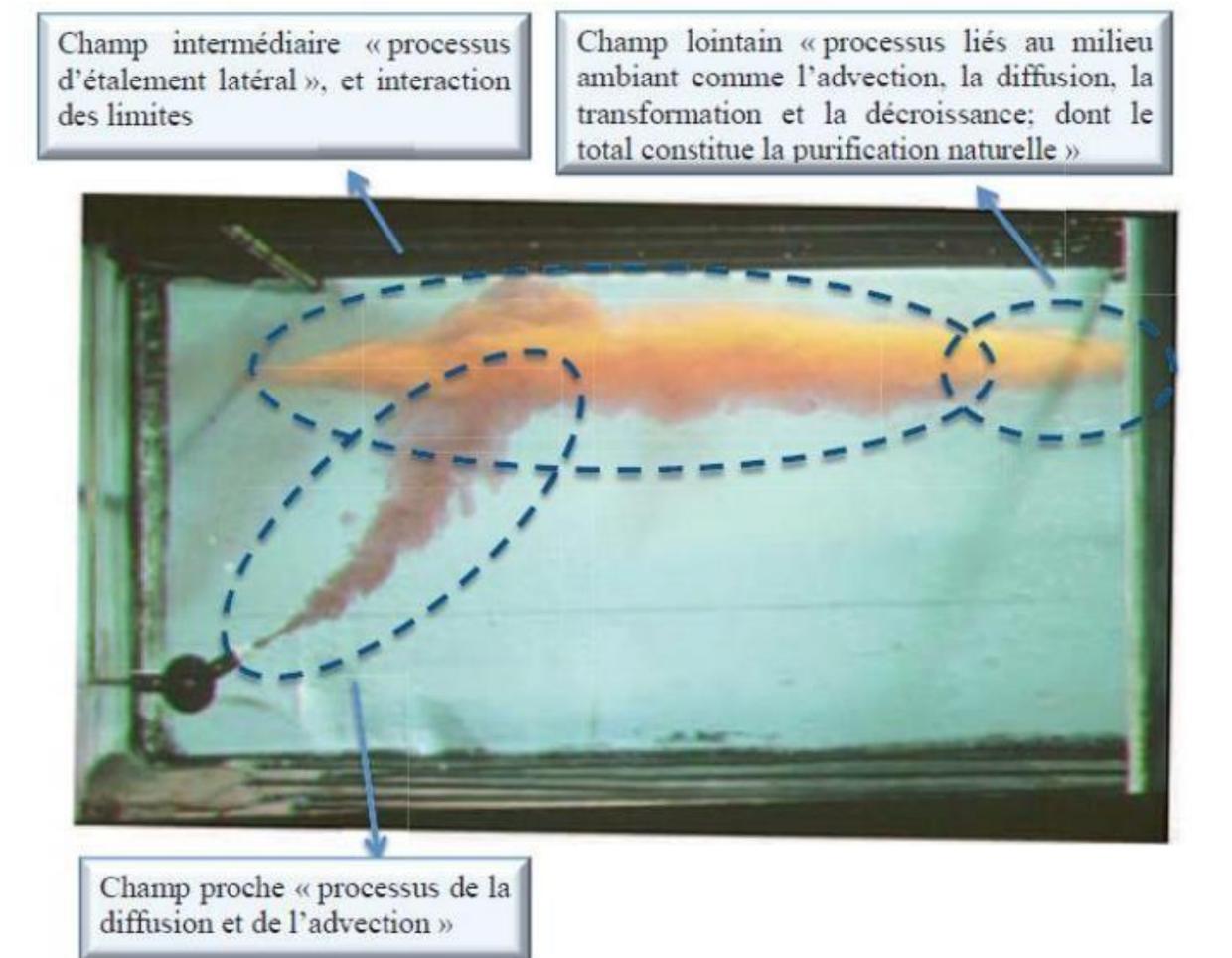


Figure III- 6 Répartition des champs issus des rejets en mer

- **Le champ proche**

La région du champ proche est située à proximité du point de rejet et se caractérise par un mélange initial, qui dépend principalement de la conception du système de rejet de la saumure et des propriétés de l'effluent et du milieu récepteur. Naturellement, les impacts sur les deux régions sont très différents. Dans le champ proche, le rejet de saumure peut entraîner une augmentation localisée de la salinité et perturber l'équilibre naturel de l'écosystème marin à proximité immédiate du point de rejet. En plus de ces impacts inévitables, il y a aussi les changements de température, si la différence est trop importante, nous risquons une pollution thermique. La salinité élevée de la saumure peut entraîner une augmentation de la densité, ce qui peut provoquer une stratification dans la colonne d'eau près du point de rejet. Cette stratification peut entraver l'échange d'oxygène entre les différentes couches d'eau, ce qui peut entraîner un appauvrissement en oxygène dans les couches plus profondes. Les conditions de manque d'oxygène peuvent être néfastes pour la vie marine, en particulier pour les espèces qui ont besoin d'une eau bien oxygénée.

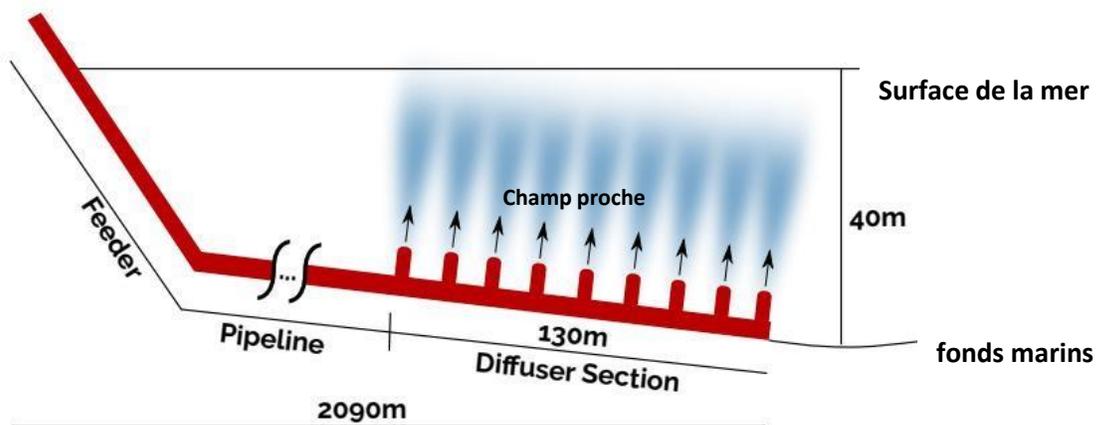


Figure III- 7 Schéma des émissaires marins.

- **Le champ lointain**

La région du champ lointain, quant à elle, est située plus loin du point de décharge, là où se produit le processus de transport. La saumure rejetée en mer est soumise aux courants océaniques et à la dispersion, ce qui l'éloigne de la source et se transforme en un courant de gravité qui s'écoule vers le fond de la mer. Le mélange dépend des conditions environnantes telles que la bathymétrie, les courants et les vagues. Sur de longues distances, la saumure se dilue davantage, ce qui réduit son impact immédiat. Cependant, elle peut encore affecter les écosystèmes côtiers et marins, en particulier si le mélange est insuffisant ou si la saumure rejetée contient des polluants qui peuvent persister même après dilution.

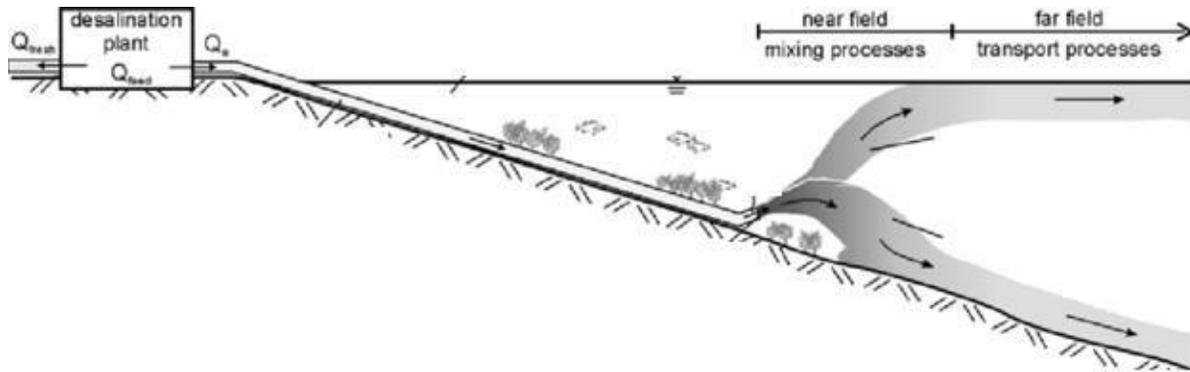


Figure III- 8 champ proche et lointain

La différence entre les deux régions réside dans le taux de dilution : dans la région du champ proche, des taux de dilution plus élevés sont atteints en raison des turbulences créées par la différence de vitesse entre le jet et l'eau de mer, tandis que dans la région du champ lointain, le taux de dilution est relativement faible et constant et dépend des conditions naturelles.

Dans les deux figures suivantes, une étude a été menée par l'université de Cantabrie où la saumure a été colorée à la rhodamine sur la plage de Maspalomas (Espagne) pour confirmer l'impact dans les deux champs.



Figure III- 9 Impacts dans le champ proche



Figure III- 10 Impacts dans le champ lointain

II.11 Le défi de la salinité élevée : Conséquences du rejet de saumure dans les écosystèmes marins

L'un des principaux problèmes liés au rejet de saumure dans la mer est sa salinité élevée. Les solutions salines concentrées créent des régions localisées de forte salinité, ce qui peut avoir un impact négatif sur la diversité de la vie marine à proximité. Une salinité élevée peut provoquer un stress osmotique chez les organismes marins, ce qui peut entraîner une réduction des taux de croissance, un échec de la reproduction et même la mort.

On a mentionné plus haut les rejets directs dans la mer dans le golfe arabe, la mer Rouge et la mer Méditerranée. Il faut savoir que le total des solides dissous (TDS) dans ces trois régions principales est plus élevé par rapport à l'eau de mer typique d'environ 34,5 g/l, 45, 41 g/l et 38,6 respectivement. L'augmentation des rejets de saumure accroît de manière significative la concentration de sel dans ces trois milieux récepteurs.

Il est nécessaire de mentionner que la mer Méditerranée possède une espèce qui est très sensible aux moindres changements de salinité, il s'agit de la Posidonie de Méditerranée. Il s'agit d'une espèce importante de plantes marines. Elle forme de vastes prairies sur les fonds marins, fournissant des fonctions et des services écologiques importants. Cette plante est connue en tant que forêt de la mer. Si elle est menacée, c'est l'ensemble de l'écosystème qui est en danger. Des impacts importants sur la structure de la plante ont été observés à un taux de salinité de seulement 39,1 gr /l et sur sa vitalité à partir de 38,4 gr /l. Un tel changement risque de compromettre l'ensemble de l'écosystème aquatique.



Figure III- 11 La posidonie de Méditerranée

Cette augmentation de la salinité dans les trois principales régions (MENA) où l'utilisation du dessalement est la plus importante ne peut nous mener nulle part, si ce n'est que le rejet direct de la saumure dans la mer n'est pas la meilleure solution pour l'élimination de la saumure et peut entraîner de graves impacts sur l'environnement aquatique et sur la station de dessalement elle-même. Ce problème doit donc être étudié d'un point de vue environnemental et technique afin de trouver d'autres méthodes prometteuses.

C'est pourquoi nous suggérons de diluer la saumure avec de l'eau de mer afin de réduire les impacts négatifs et de préserver l'environnement ainsi que la station.

II.12 Conclusion

Même s'il existe différentes méthodes d'élimination de la saumure, la plupart des pays qui dépendent du dessalement pour produire de l'eau utilisent le déversement direct de la saumure dans la mer, par exemple : Arabie Saoudite, EAU et Qatar. Ils rejettent tous leurs saumures dans le golfe Persique et la mer Rouge. L'Algérie rejette également ses saumures dans la mer Méditerranée, qui abrite des espèces sensibles (la Posidonie de Méditerranée) à la salinité de l'eau. L'impact de cette décharge touche deux régions, le champ proche de la décharge et le champ lointain. De nombreuses recherches ont montré que les rejets directs ont de nombreux impacts négatifs sur l'écosystème aquatique et les organismes marins qui peuvent entraîner des dommages irréversibles, non seulement sur l'environnement, mais aussi sur les stations de dessalement. En raison de ces impacts, de plus en plus de techniques sont développées pour l'élimination de la saumure, et l'Espagne est l'un des pays qui prennent de l'avance dans ce domaine. Les conséquences des rejets directs sont irréversibles. Une fois que les dégâts sont faits, il n'y a plus de solutions pour y remédier. C'est pourquoi, avant qu'il ne soit trop tard, nous suggérerons et discuterons du potentiel de dilution de la saumure avec de l'eau de mer en tant que technique économique et prometteuse.

Chapitre IV :

Présentation de zone d'étude

Introduction

Ce chapitre donne un aperçu de la zone d'étude, la station de dessalement d'El Marsa située à Ain Taya, wilaya d'Alger. Cette station est très importante car elle répond au besoin urgent d'approvisionnement en eau douce de la région. Avec une capacité de production de 60 000 m³/jour, l'usine de dessalement d'El Marsa joue un rôle essentiel pour répondre aux besoins en eau des communautés locales et soutenir diverses industries. L'objectif de cette étude était d'explorer des stratégies de gestion durable de la saumure produite lors du dessalement. Le traitement de l'eau salée est un défi majeur pour les usines de dessalement, et cette station ne fait pas exception. Pour atténuer l'impact environnemental du traitement de la saumure, on étudiera la possibilité de dilution de l'eau de mer comme solution viable.

IV.1 Description de la station de dessalement d'El Marsa

La station d'El Marsa est composée d'une tour de captage, d'un prétraitement qui comporte plusieurs phases, à commencer par un ouvrage destiné aux dégrilleurs suivi d'une station de pompage de relevage vers le bâtiment de coagulation-floculation, puis plusieurs décanteurs lamellaires suivi d'un bâtiment des filtres puis enfin un bâtiment de l'osmose inverse.

IV.1.1 Situation géographique

La station de dessalement de Marsa a été mise en service en octobre 2022 avec une capacité de 60000m³/j. La station est située à l'est d'Alger, dans la commune d'el Marsa qui est rattachée à Ain Taya. Cette station de dessalement assure l'approvisionnement de plusieurs communes dont la population est 400 milles habitants. Il est à noter que la distance entre la station et la mer Méditerranée est d'environ 350 m.

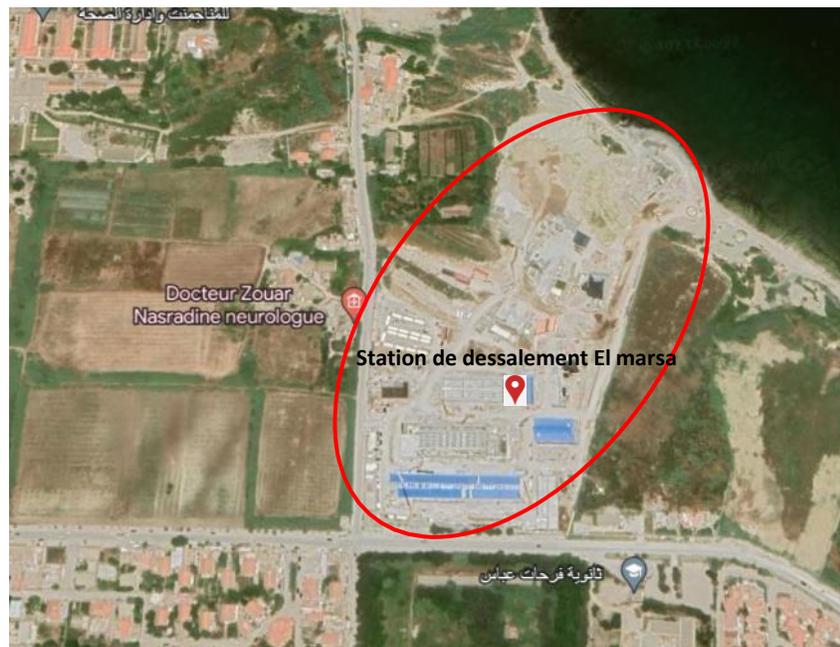


Figure IV- 1 Situation géographique d'El Marsa



Figure IV- 2 La station de dessalement de l'eau de mer El Marsa

IV.1.2 Processus et fonctionnement de la station d'El Marsa :

Une station de dessalement est une installation à grande échelle conçue pour convertir l'eau salée, telle que l'eau de mer, en eau douce potable. Elle utilise divers procédés pour éliminer les sels et les impuretés présents dans l'eau de source, la rendant ainsi sûre et adaptée à la consommation humaine, à l'usage agricole et aux applications industrielles. Toutes les stations de dessalement commencent par un prétraitement de l'eau de mer. Naturellement, le prétraitement varie en fonction de la qualité de l'eau de mer. Les étapes principales de dessalement dans cette station est :

- a. Captage d'eau de mer
- b. Prétraitement
- c. Osmose inverse
- d. Post-traitement

IV.1.2.1 Captage de l'eau de mer :

La station de dessalement de Marsa prélève 133333 m³/j d'eau de mer par un système composé de trois éléments essentiels : une tour en béton d'une forme octogonale à 236 m du littoral à une profondeur de -12 m, conduite de captage et bassin de captage.

Les caractéristiques de l'eau de mer et de la conduite provenant de l'entrée ouverte sont mentionnées dans les tableaux ci-dessous :

Tableau IV- 1 Caractéristiques de la conduite

Tableau IV- 2 Caractéristiques de l'eau de mer

Conduite			
N°conduite	Diamètre normalisé (mm)	Longueur (m)	Matériau
1	1200	236	PRV

L'eau de mer		
Température choisie (°C)	Concentration MES (g/l)	Masse volumique (Kg/m ³)
21.0	40.4	1028,27



Figure IV- 3 La conduite de captage

Il est à noter qu'afin de maintenir un PH adéquat et pour protéger les conduites du colmatage dû aux différents organismes présents dans l'eau de mer, un dosage de choc qui est une acidification (acide sulfurique H_2SO_4) suivie d'une pré-chloration (L'hypochlorite de sodium NaOCl) sont fait à travers des conduites de 10 mm attachées à la conduite de captage.

- L'acidification permet de parvenir la précipitation des carbonates de calcium sur les membranes, et de maintenir un pH optimal de 6,9–7,2 pour la coagulation et la pré-chloration.
- La pré-chloration sert à éviter la prolifération des organismes vivant et le colmatage des conduites.

Tableau IV- 3 Processus d'acidification et pré-chloration

Période d'injection	Produit chimique	Dose d'injection (ppm)	Fréquence
Saison Hivernale	H_2SO_4	140	02 fois/saison 4H/24H
	NaCLO	4	04 fois/saison 04H/24H
Saison estivale	H_2SO_4	140	04 fois/saison 06H/24H
	NaCLO	6	08 fois/saison 06H/24H

Après que l'eau de mer est arrivée à l'entrée à l'ouvrage on-shore, la phase de prétraitement commence.

IV.1.2.2 Etape de prétraitement

Le prétraitement, avec toutes ses méthodes et ses phases, est essentiel pour protéger la membrane d'OI en éliminant certains contaminants, réduire les particules et donc l'encrassement de la membrane, prolonger la durée de vie et améliorer l'efficacité de fonctionnement. D'une manière générale, les solides en suspension sont éliminés par filtration, le pH est ajusté pour protéger la membrane et contrôler la précipitation des sels, et des inhibiteurs d'entartrage sont ajoutés pour contrôler les carbonates de calcium et les sulfates.

Dans le cas de la station d'El Marsa, le prétraitement commence par des dégrilleurs grossiers et fins, puis l'eau est pompée pour subir une coagulation-floculation, suivie d'un décanteur lamellaire, pour finalement passer par des filtres gravitaires à deux couches pour finalement être traitée par des membranes d'osmose inverse.

a. Les dégrilleurs

- Dégrilleurs grossiers :

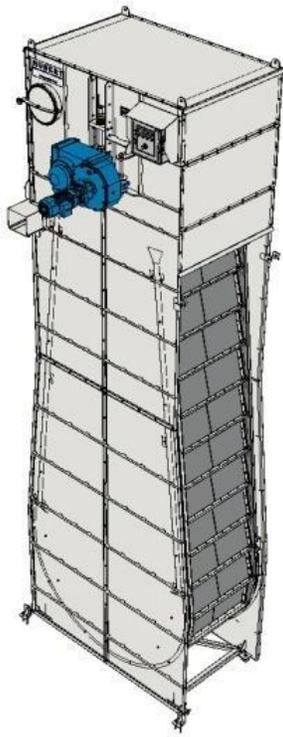


Figure IV- 4 Dégrilleur grossiers d'El Marsa

L'objectif du dégrillage est d'éliminer les déchets, les grosses matières solides et les petites particules qui se trouvent dans la station avec l'eau de mer entrante. Il permet d'éviter les dommages mécaniques et le colmatage des équipements et des machines en aval. Le dégrilleur grossier est conçu pour les déchets et les solides dont la taille est supérieure ou égale à 40 mm. Le nombre de dégrilleurs en service dans la station est de 02, avec un débit horaire de 5610 m³/h. La distance entre les barreaux est de 40 mm, quant à l'épaisseur des barreaux, elle est de 10 mm.

- Dégrilleurs fin :

Les dégrilleurs fins font partie intégrante des processus de prétraitement de l'eau et sont utilisés pour éliminer les petites particules solides des sources d'eau avant leur traitement ou leur distribution. Ces dégrilleurs sont conçus pour capturer et retenir les débris tels que le sable, le limon, les algues, les feuilles et autres solides en suspension présents dans l'eau. La station d'El Marsa dispose de 02 dégrilleurs fin en service. La hauteur et la largeur des barres sont de 500 mm et 1100 mm respectivement.



(A)



(B)



(C)

Figure IV- 5 (A, B, C) Degrilleurs fin

b. Station de pompage

Une fois l'étape des dégrilleurs est passée, l'eau est stockée dans un réservoir qui sert à maintenir un débit régulier. La station de pompage qui mène vers la coagulation floculation est équipée de 4 pompes de type DESMI B114N, dont 3 en service et 1 en réserve avec une HMT de 40m. Le débit de pompage est de 1850-1900 m³/h, avec une pression d'aspiration de -0,5 bar et une pression de refoulement de 4 bar.



Figure IV- 6 Station de relevage

Au niveau de cette station, divers paramètres sont contrôlés en continu avec deux capteurs. Les paramètres sont :

- Hydrocarbures : un paramètre de pollution, si la concentration dépasse 0.1 mg/l la station de dessalement s'arrête complètement.
- Chlorophylle
- MES
- PH
- Température
- Conductivité



Figure IV- 8 Capteur chlorophylle, MES et PH Figure IV- 7 Capteurs T, Conductivité et HC

c. Coagulation floculation :

La coagulation dans les systèmes de prétraitement conventionnels est principalement appliquée pour s'assurer que la qualité de l'eau produite répond aux exigences des fabricants de membranes d'OI en termes de turbidité et de SDI. Le coagulant le plus couramment utilisé dans le prétraitement des eaux de mer est le chlorure ferrique.

La coagulation-floculation est effectuée dans un mélangeur statique fourni par STATIFLO.



Figure IV- 9 Les mélangeurs statiques de coagulation-floculation

Le coagulant utilisé est l'hypochlorite de sodium et le chlorure ferrique $FeCl_3$ avec un intervalle de dosage qui varie en fonction de trois conditions :

- Si la turbidité est inférieure à 5 NTU, aucun coagulant n'est utilisé.
- Si la turbidité est comprise entre 0 et 50 NTU, le dosage est de 0-10 mg/l.
- Si la turbidité est comprise entre 50 et 100 NTU, le dosage est de 13-20 mg/l.

Le dosage exact du coagulant et du floculant polymère cationique est déterminé à partir du jar test. Ce test est effectué dans 6 tubes, chaque tube contenant d'eau brute possède une concentration de coagulant comme suit :

Tableau IV- 4 Les concentrations de coagulant dans chaque tube

N°tube	1	2	3	4	5	6
Dosage(mg/l)	0	2	4	6	8	10

Une fois les dosages distribués, un agitateur mélange soigneusement chaque tube pour bien disperser le réactif ou le coagulant dans l'eau. On les laisse reposer un certain temps, puis on observe l'efficacité en regardant la formation de précipités, la réduction de la turbidité de l'eau, la clarification de l'eau, la couleur de l'eau, etc. On élimine ensuite les dosages qui ne donnent pas de résultats satisfaisants, c'est-à-dire ceux qui ne produisent pas une coagulation adéquate ou qui entraînent une sur-coagulation. Ensuite, nous répétons le même processus avec les dosages les plus précis, de sorte que nous obtenons finalement le dosage optimal.



Figure IV- 10 Jar Test du laboratoire d'El Marsa

Les coagulants et floculant sont dosés à travers des pompes doseuses, les doses exactes sont montrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV- 5 Caractéristiques des coagulants-floculant

Produit chimique	Dose d'injection (optimale)	Débit horaire De la pompe doseuse
Chlorure ferrique $FeCl_3$	06 ppm	59,57 l/h
Polymère cationique	0.2 ppm	373,33 l/h
L'hypochlorite de sodium	Selon la demande en chlore	Voir tableau 3



Figure IV- 11 Les pompes doseuses

d. Décanteur Lamellaire

L'eau coagulée et floculée est transportée en parallèle de bas en haut à travers des canalisations PEHD Ø1000mm vers trois décanteurs. L'objectif du décanteur est de séparer et d'éliminer les MES de l'eau coagulée et floculée. Pour cela, trois décanteurs lamellaires de conception et de taille identiques sont utilisés. Les décanteurs peuvent éliminer les MES à des concentrations allant jusqu'à 55...60 mg/l avec une efficacité d'au moins 95%. Dans des conditions normales d'exploitation, les trois décanteurs fonctionnent. À pleine capacité, chaque unité traite un débit de 1 868 m³/h pendant un temps de séjour de 02 heures. Ils sont tous équipés d'un racleur de boues vertical. En cas des travaux ou nécessité d'entretien, il est tout à fait possible d'isoler l'un des décanteurs avec des vannes murales à commande manuelle du canal d'entrée et de sortie. Il est important de mentionner que la concentration de MES dans l'eau est mesurée en continu. La différence de concentration en MES mesurée en amont et en aval des étapes de prétraitement donne une image claire de l'efficacité du prétraitement.



Figure IV- 12 Décanteur Lamellaire

e. Filtres Gravitaires Bicouches et Filtre à Cartouches

Une fois que l'eau est décantée, elle est envoyée vers les filtres bicouches par l'intermédiaire des conduites en PEHD de diamètre 500 mm. Ces filtres sont constitués en trois couches : une couche de l'antracite, une couche de sable et une couche de gravier.

L'usine d'El Marsa contient 05 filtres bicouches installés en parallèle et reçoivent un débit de 480 m³/h, éliminent la plupart des particules en suspension, des particules d'huile et de graisse qui restent dans l'eau de mer et produisent une eau filtrée à faible turbidité prête à passer à l'étape de la microfiltration. Les filtres bicouches sont nettoyés avec l'eau de saumure et l'air comprimé.

L'eau filtrée est envoyée par des pompes, dont 03 en service et 1 en réserve, vers les filtres à cartouches. La station possède 6 cartouches de 5 µm, 5 en service et 1 en réserve. Il faut noter qu'un dispersant (anti scalant) est injecté au niveau de la conduite qui est en amont des filtres à cartouches. L'injection de l'anti-scalant en mode continu à travers la pompe doseuse du mélangeur statique, et sa dose est déterminée par le logiciel "ROPUR" après simulation sur la base des résultats d'analyse des paramètres physiques et chimiques de l'eau traitée.

Le prétraitement s'arrête à cette étape, l'eau filtrée est alors pompée pour être traitée à travers les membranes d'osmose inverse.

Tout au long du prétraitement, l'eau a été injectée avec du chlore (eau de Javel) auquel les membranes d'osmose inverse sont très sensibles. Par conséquent, afin de protéger les membranes de cette substance, une déchloration est nécessaire. Dans cette station, le réducteur de chlore utilisé est le bisulfite de sodium NaHSO₃. En ce qui concerne la dose, 1 dose de chlore équivaut à 3 doses de Bisulfite de Sodium. Par exemple, si nous avons 2 Ppm de chlore, nous aurons 6 mg/l de Bisulfite de sodium.

Après la filtration à cartouches, il y a certains paramètres qui doivent être contrôlés avant de passer par les membranes : le chlore résiduel et le SDI.

Le SDI (l'indice de colmatage des membranes) est mesuré au niveau du bâtiment d'osmose inverse, à l'aide de l'appareil « SDI AUTOMATIC ANALYZER ». Le SDI est un élément crucial pour déterminer l'efficacité du prétraitement, si le SDI est supérieur ou égal à 5 cela signifie que le prétraitement n'est pas bon et donc l'eau traitée est rejetée dans la mer. Si la valeur est inférieure à 5, l'eau sera acheminée vers l'osmose inverse.

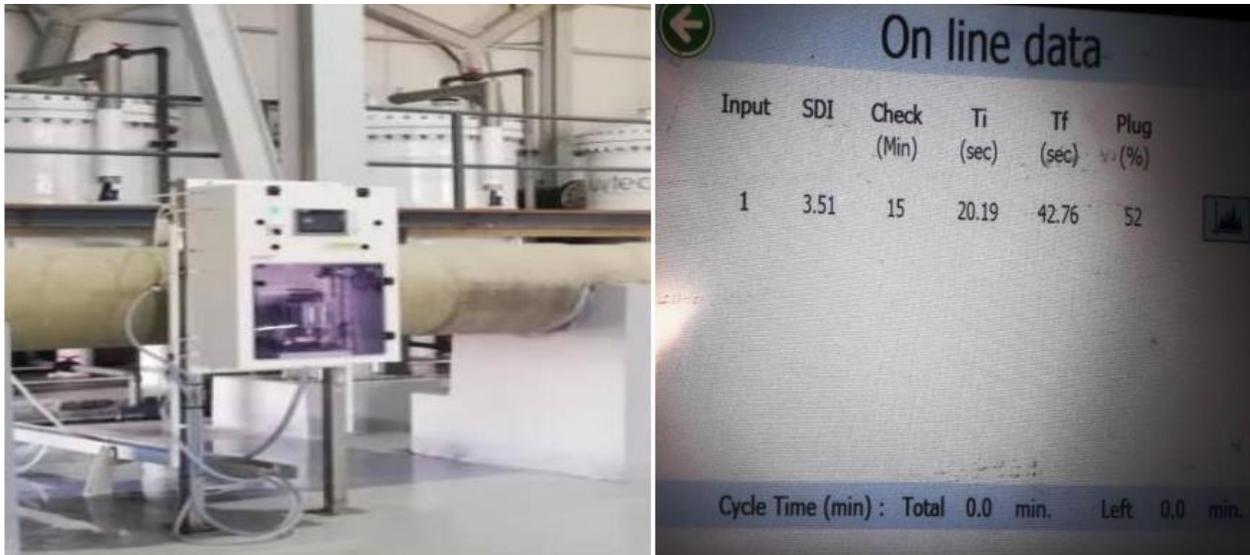


Figure IV- 13 L'appareil de mesure de SDI

Le PH, la température, la conductivité, la turbidité et l'ORP de l'eau filtrée sont également contrôlés par des capteurs avant son arrivée à l'OI.



Figure IV- 14 Les capteurs PH, T°C, Conductivité, turbidité et l'ORP

IV.1.2.3 Etape de traitement

La phase de traitement dans le domaine du dessalement implique le processus de purification supplémentaire de l'eau saline filtrée obtenue après le prétraitement. Son objectif est de retirer les sels dissous et les impuretés, afin de produire de l'eau douce et potable. Cette étape comprend l'osmose inverse et la reminéralisation.

a. Osmose Inverse

Avant de commencer le processus d'OI à El Marsa, il est important de noter qu'une pression élevée est nécessaire pour l'osmose inverse (OI) afin de surmonter la pression osmotique et de forcer l'eau salée à travers la membrane. C'est pourquoi nous parlerons des pompes HPRO avant de passer à l'osmose inverse.

- Pompes haute pression (HPRO) et Pompe booster

Les pompes d'osmose inverse à haute pression (HPRO) ont pour but de générer la pression nécessaire pour surmonter la pression osmotique et faciliter le passage de l'eau à travers la membrane semi-perméable dans les systèmes de dessalement par osmose inverse (OI). Lors de la phase de traitement du dessalement, l'eau saline est soumise à une pression à l'aide de pompes HPRO avant de pénétrer dans les membranes d'osmose inverse. Dans l'usine de dessalement d'El Marsa, il y a 5 HPRO en service avec une pression d'alimentation de 69 bars requise par les membranes à 15 °C et pour une salinité de 40,1 g/l.



Figure IV- 15 Pompe haute pression HPRO

La station est également équipée de 5 pompes booster, elles sont utilisées pour augmenter la pression de l'eau fournie au système d'OI, en amont des pompes à haute pression. Elles fournissent une pression suffisante pour compenser les pertes de pression dans les différents équipements de filtration en amont du processus d'OI. Ces pompes sont capables de produire une pression modérée à élevée, mais inférieure à celle de la HPRO. En résumé, les deux pompes sont complémentaires.



Figure IV- 16 Pompe Booster

- Procédé d'Osmose Inverse

L'usine d'El Marsa est dotée d'un bâtiment dédié au processus d'osmose inverse contenant 5 lignes identiques (5 racks) avec un taux de conversion de 45%-55%, soit 45% perméat (eau dessalée) et 55% rejet (eau de saumure). Chaque rack est équipée d'une pompe HP, 12 échangeurs de pression appelés ERI de type PX Q300. L'échangeur de pression est un composant clé utilisé pour améliorer l'efficacité énergétique globale du processus d'OI en récupérant l'énergie hydraulique du flux de concentré.



Figure IV- 17 Echangeur de pression

La surface dédiée aux membranes actives est de 37 m². Les membranes sont placées dans des tubes dont chacun contient 7 membranes. Pour un fonctionnement optimal des membranes, certaines conditions doivent être respectées :

- Le SDI de l'eau filtrée doit être inférieur à 5 (SDI de la membrane).
- La turbidité doit être inférieure à 1 NTU
- La teneur max en chlore doit être inférieure à 0.1 ppm
- Pression maximale applicable 82.7 bar (le système fonctionne sous pression 62 bars)
- Température max de fonctionnement : 45°C



Figure IV- 18 Unité d'osmose inverse

Une fois que l'eau filtrée traverse les membranes, une partie de ce flux est convertie en eau de production, tandis que l'autre partie devient la saumure, qui contient les sels et les impuretés rejetés. Traditionnellement, ce flux de concentré est évacué comme un déchet. Pour ne pas gaspiller l'énergie, la station d'El Marsa dispose de 12 échangeurs de pression (PX) pour chaque unité.

Les membranes sont très exposées au risque de colmatage. Les indices de colmatage sont :

- Une diminution du débit de perméat soit (- 10- 15 %)
- Une différence de pression de rack supérieure à 1,2 bar

Pour résoudre le problème de colmatage, un nettoyage en place (CIP : Cleaning In Place) est effectué. Ce nettoyage se déroule en deux phases successives :

1) Le CIP avec la soude NaOH

Une solution de concentration 1 g/l et de pH = 12, elle est préparée avec de l'eau filtrée et acheminée vers le réservoir de stockage de NaOH de 28m³ à l'intérieur du bâtiment d'OI. Cette solution passe obligatoirement par un filtre à cartouche CIP avant d'être injectée dans les membranes de chaque rack en circuit fermé, pendant 12 heures, afin d'éliminer les matières organiques, les MES et le CaSO₄.

2) Le CIP avec l'acide citrique C₆H₈O₇

Une solution de concentration 20 g/l et de pH =2-3, elle est préparée avec de l'eau filtrée ou potable et acheminée vers le réservoir de stockage de NaOH de 28m³ à l'intérieur du bâtiment d'OI. Cette solution passe obligatoirement par un filtre à cartouche CIP avant d'être injectée dans les membranes de chaque rack en circuit fermé, pendant 12 heures, afin d'éliminer Mg, Fe et CaCO₃.

3) Processus de rinçage

il est effectué avec de l'eau perméat, suivi d'une remise en service des membranes et d'une répétition du test de déferencement de la pression et du flux de perméat. Si le problème persiste, un nouveau CIP avec d'autres produits chimiques (par exemple SMBS, genesol, etc.) sera nécessaire.



Figure IV- 19 Le système de nettoyage des membranes unité CIP

Toute la saumure concentrée serait collectée dans un réservoir puis rejetée dans la mer.

b. Reminéralisation

La reminéralisation est le processus qui consiste à ajouter des minéraux essentiels à l'eau dessalée afin d'en améliorer le goût, la qualité et les bienfaits pour la santé. Elle intervient généralement après le processus d'osmose inverse (OI), au cours duquel les sels dissous et les minéraux sont éliminés de l'eau d'alimentation.

À El Marsa, la reminéralisation se fait par injection de CO₂ et dans des cuves de calcite.

- Injection de CO₂ et acide sulfurique

Le dioxyde de carbone est injecté dans l'eau dessalée pour abaisser son pH et créer un environnement légèrement acide. L'objectif de cette injection est double :

- a. Acidification : Le CO₂ réagit avec l'eau pour former de l'acide carbonique (H₂CO₃), qui abaisse le PH de l'eau. Les conditions acides facilitent la dissolution de la calcite et le processus de reminéralisation.



Figure IV- 20 Le système de stockage de CO2

- b. Stabilisation : Le CO₂ agit également comme un agent stabilisateur en réduisant le potentiel de corrosion ou d'entartrage dans les tuyaux ou les systèmes de distribution en aval. Il aide à maintenir l'équilibre minéral souhaité et empêche la précipitation des minéraux qui peuvent entraîner des problèmes d'entartrage.

L'injection de l'acide sulfurique a pour but d'obtenir un PH optimal et d'assurer de meilleures conditions pour la réaction précédente.

- **Bassin de Calcite**

Une fois l'eau est passée par ces injections, l'eau remonte du fond du bassin de reminéralisation par le système "LEOPOLD" en traversant successivement trois couches de gravier de hauteur identique (5 cm) et de diamètre différent de bas en haut : (3 à 6 mm), puis (6. 3 à 12,5 mm) et (12,5 à 19 mm). Pour ensuite passer à travers un lit de calcite CaCO₃ de 3 m de haut, représentant un volume de 102m³. Le but du passage à travers les 3 couches de gravier est de favoriser le temps de contact avec la calcite.



Figure IV- 21 le réservoir de reminéralisation LEOPOLD

La station d'El Marsa dispose de 6 bassins de calcite. Lorsque l'eau dessalée s'écoule dans le réacteur à calcite, elle entre en contact avec le milieu calcaire. L'eau légèrement acide, en raison de la présence d'acide carbonique, dissout la calcite, libérant des ions de calcium et de carbonate dans l'eau. Ce processus de dissolution augmente la teneur en minéraux de l'eau, en l'enrichissant notamment en calcium. L'ajout de calcite permet d'ajuster l'équilibre minéral de l'eau dessalée. Le calcium est un minéral essentiel pour la santé humaine, et sa présence dans l'eau apporte des avantages pour la santé et améliore le goût.

Les deux principaux buts de cette étape sont :

- L'ajustement du PH par NAOH
- La désinfection par l'hypochlorite de sodium NACLO



Figure IV- 22 Bassin de Calcite

L'eau est ensuite collectée et stockée dans un réservoir d'une capacité de 2000 m³, qui sera ensuite distribuée vers le client par deux lignes par le biais d'une station de pompage.

Tableau IV- 6 Caractéristiques des lignes de distribution

Ligne de refoulement	Diamètre	Nombre des pompes	Débit	Pression
Ligne N 01	800 mm	1+1	292-300 m ³ /h	2 à 4 bars
Ligne N 01	300 mm	1+1	2200-2500 m ³ /h	2 à 4 bars



Figure IV- 23 Station de pompage d'eau traitée

c. Système de rejet de saumure

La saumure produite du au procédé Osmose Inverse soit 55% du débit de captage donc environ $73333 \text{ m}^3/\text{j}$ est évacuée de manière gravitaire à travers deux conduite en PEHD de diamètre 800 mm avec longueur en mer 371.20 m.

IV.2 Conclusion :

En conclusion, la station de dessalement d'El Marsa est un exemple exemplaire de l'application réussie de la technologie de dessalement pour répondre aux besoins croissants en eau potable dans la région. Le fonctionnement de la station repose sur un processus bien défini et intégré, mettant en œuvre plusieurs étapes clés pour garantir la production d'eau potable de haute qualité à partir de l'eau de mer. Tout d'abord, l'eau de mer passe par des dégrilleurs fin et grossier pour éliminer les particules et les débris de grande taille. Ensuite, la coagulation et la floculation sont utilisées pour agglomérer les particules fines et les matières en suspension, facilitant ainsi leur élimination ultérieure. Le décanteur lamellaire est ensuite utilisé pour séparer les particules coagulées et floculées de l'eau. Par la suite, l'eau passe par un processus de filtration à cartouche pour éliminer les particules restantes et obtenir une eau claire et de qualité. Le processus se poursuit avec l'utilisation d'un système d'osmose inverse, où l'eau est soumise à une pression élevée à travers une membrane semi-perméable pour éliminer efficacement les sels, les minéraux indésirables et d'autres impuretés dissoutes. Cela permet d'obtenir une eau dessalée de haute qualité. Finalement, l'eau dessalée passe par la reminéralisation permettant ainsi l'obtention d'une eau de haute qualité, adéquate et prête à répondre aux exigences de qualité et de potabilité par un système de distribution en deux lignes avec l'aide d'une station de pompage.

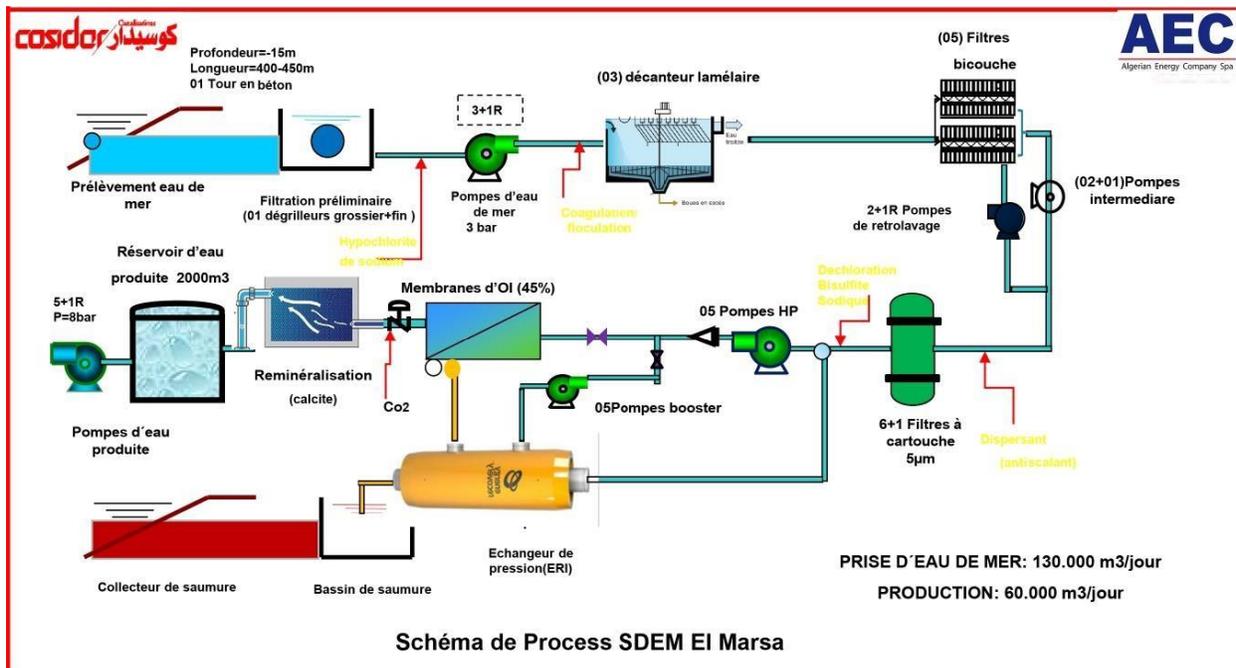


Figure IV- 24 Le schéma de fonctionnement d'El Marsa

Chapitre V :

Dimensionnement des ouvrages de dilution

Introduction

Les effets de la saumure sur l'environnement sont désormais connus et ne doivent pas être négligés. Cependant, il n'existe pas de réglementation officielle pour dicter la manière dont la saumure doit être rejetée. La majorité des stations de dessalement en Algérie utilise le rejet direct dans la mer, dans cette partie nous suggérons d'utiliser la dilution avec de l'eau de mer comme moyen de rejeter la saumure et de protéger l'environnement. Pour ce faire, on va dimensionner trois ouvrages qui permettent la dilution de saumure avec l'eau de mer, à savoir :

- Canal Trapézoïdal à surface libre
- Bassin de dilution

V.1 Dimensionnement du canal trapézoïdal à surface libre

Dans cette variante, un canal à surface libre de 187 m de longueur est conçu, où la saumure s'écoule par gravité et l'eau de mer est pompée.

Le débit de saumure produit par la station d'El Marsa est de 73333 m³/j, avec une salinité de 69 g/l. Ce qu'on veut faire, c'est diluer la saumure de manière à ce qu'elle soit 10% plus élevée que la salinité du milieu récepteur (la méditerranée), afin qu'une fois déversée dans la mer, elle soit encore diluée de manière naturelle, ce qui réduira l'effet de panache et protégera l'environnement marin.

Il est à noter que la salinité de la méditerranée est de 38 g/l, donc la salinité ciblée est de 41.5 g/l d'après le calcul suivant :

$$38 \rightarrow 100\%$$

$$X \rightarrow 10\%$$

Donc :

- $X = 3.5$

Ainsi la concentration du rejet après la dilution est :

- $C_{rejet} = 38 + 3.5 = 41.5 \text{ g/l}$

Avant de passer au dimensionnement du canal il est primordial de déterminer le débit d'eau de mer nécessaire pour atteindre la salinité ciblée :

$$C_1Q_1 + C_2Q_2 = C_3(Q_1 + Q_2)$$

$$C_1Q_1 + C_2Q_2 = C_3Q_1 + C_3Q_2$$

$$C_1Q_1 - C_3Q_1 = C_3Q_2 - C_2Q_2$$

$$C_1Q_1 - C_3Q_1 = Q_2(C_3 - C_2)$$

$$Q_2 = \frac{C_1Q_1 - C_3Q_1}{C_3 - C_2} \dots \dots \dots (V. 1)$$

- Définitions des données :

C_1 : concentration de saumure. (g/l)

C_2 : concentration d'eau de mer. (g/l)

C_3 : concentration du rejet. (g/l)

Q_1 : débit de saumure. (m^3/j)

Q_2 : débit d'eau de mer. (m^3/j)

Q_3 : débit de rejet. (m^3/j)

- Application :

$$Q_2 = \frac{69 \times 73333 - 41.5 \times 73333}{41.5 - 38} = 576188 \text{ m}^3/j$$

- Donc le débit nécessaire pour une dilution optimal de la saumure avant son rejet est 576188 m^3/j .
- Le débit total est : $Q_{tot} = 649521 \text{ m}^3/j$

V.1.1 Le dimensionnement du canal

Pour dimensionner le canal, on va suivre l'équation de Manning Strickler. Cette méthode consiste à calculer les dimensions du canal afin d'assurer un certain débit et une certaine vitesse. L'équation de Manning relie le débit (Q) dans un canal ouvert au rayon hydraulique (R), à la pente du canal (i) et au coefficient de rugosité de Manning (n) :

$$Q = \frac{1}{n} S R^2 \sqrt{i} \dots \dots \dots (V. 2)$$

- Définitions des données

Q : le débit. (m^3/j)

n : le coefficient de rugosité de Manning, qui représente la résistance du canal à l'écoulement. Il dépend du matériau, de la forme et de la rugosité du canal.

S : la section transversale de l'écoulement.

R : le rayon hydraulique, défini comme la surface de la section transversale divisée par le périmètre mouillé.

i : la pente du canal.

Pour dimensionner un canal à l'aide de la méthode de Manning Strickler, il faut généralement suivre les étapes suivantes :

- Déterminer le débit de conception (Q) en fonction du débit d'eau prévu dans le canal, dans ce cas le débit total de la saumure et l'eau de mer.
- La sélection du coefficient de rugosité de Manning (n) en fonction des caractéristiques du canal, telles que le matériau, la forme et la rugosité. Ce coefficient est généralement obtenu à partir de manuels d'ingénierie ou de normes locales. Dans nos calcul on prend $n = 0.0167$

- Le choix d'une pente initiale du canal (i). La pente détermine la vitesse et la capacité d'écoulement du canal.
- Le calcul de la section transversale et le périmètre mouillé du canal trapézoïdal, à savoir :

$$S = bh + mh^2 \dots \dots \dots (V. 3)$$

$$P = b + 2h\sqrt{1 + m^2} \dots \dots \dots (V. 4)$$

- Le calcul du rayon hydraulique, à savoir :

$$R = \frac{S}{P} \dots \dots \dots (V. 5)$$

$$R = \frac{bh + mh^2}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}} \dots \dots \dots (V. 6)$$

- On finit avec l'introduction des valeurs calculées de S, R et i dans l'équation de Manning pour vérifier si le débit calculé (Q) correspond au débit de conception souhaité.

$$Q = \frac{1}{n} R^{2/3} \sqrt{i} \dots \dots \dots (V. 7)$$

- Si le débit calculé correspond au débit souhaité, les dimensions du canal choisies sont appropriées. Si ce n'est pas le cas, on ajuste la pente et on répète les calculs jusqu'à ce que le débit calculé corresponde au débit souhaité (calcul itératif).
- On finit par calculer la vitesse d'écoulement suivant la formule de Chezy.

$$V = \frac{Q}{S} \dots \dots \dots (V. 8)$$

$$V = C\sqrt{Ri} = \frac{1}{n} R^{1/6} \sqrt{Ri} \dots \dots (V. 9)$$

• **Calcul**

Dans cette variante, on a choisi de placer le canal trapézoïdal comme suite de la conduite d'évacuation. Pour être plus précise, on va diviser la conduite en deux parties et placer le canal comme partie intégrante de la conduite d'évacuation existante. Ainsi, le débit de saumure se dirigera gravitairement vers le canal, et le débit d'eau de mer sera assuré par un système de pompage. Un regard de jonction est placé en amont du canal pour des raisons pratiques et fonctionnelles.

Selon la méthode mentionnée précédemment, les données dont nous aurons besoin sont le débit total, la pente initiale de la conduite et le coefficient de rugosité de Manning.

- $Q_{tot} = 649521 \text{ m}^3/j = 7.518 \text{ m}^3/s$
- $i = 5.6\% = 0.056$
- $n = 0.0167$
- $m = 1$

D'après ces données et en suivant un calcul itératif selon la méthode de Manning Strickler, on trouve :

Tableau V- 1 Calcul itératif

H (m)	B (m)	R_h	$Q_{souhaité} (m^3/s)$	$Q_{calculé} (m^3/s)$
0.5	0.5	0.2160	7.518	2.895
1	0.5	0.3107	7.518	4.875
0.5	1.65	0.3508	7.518	7.577

D'après ce calcul on trouve les caractéristiques du canal comme suit :

Tableau V- 2 Calcul du canal

H (m)	B (m)	R_h	$Q_{souhaité} (m^3/s)$	$Q_{calculé} (m^3/s)$	$V_{écoulement} (m/s)$
0.5	≈ 2	0.3508	7.518	7.577	≈ 7

- B = 1.65, on arrondi pour 2 m.
- La vitesse suivant les deux formules précédentes (V.8) et (V.9) respectivement :
 - V = 6.99 m/s
 - V = 7.04 m/s

Remarque

Cette vitesse est beaucoup trop importante pour une largeur de 2 m et une hauteur de 0,5 m. Par conséquent, on va faire un calcul inverse, en fixant la vitesse du flux à 2 m/s et la hauteur à 1 m pour déterminer la largeur. Naturellement, la pente changera en fonction de ces nouvelles conditions.

- **Calcul inverse :**
 - $V_{écoulement} = 2$ m/s
 - H = 1 m

➤ La surface :

$$S = \frac{Q}{V} = \frac{7.518}{2} = 3.759 \text{ m}^2$$

➤ La largeur :

$$S = bh + mh^2 \Rightarrow \frac{S}{h} = b + mh$$

$$3.759 = b + 1$$

$$3.759 - 1 = b$$

$$b = 2.759 \text{ m}$$

On arrondi : $b = 3 \text{ m}$

➤ Périmètre mouillé :

$$P = b + 2h\sqrt{1 + m^2}$$

$$P = 5.59 \text{ m}$$

➤ Rayon hydraulique :

$$R_h = \frac{S}{P} = \frac{3.759}{5.59} = 0.673$$

➤ La pente :

On a :

$$Q = \frac{1}{n} R_h^{2/3} \sqrt{i}$$

D'où :

$$i = \left(\frac{Qn}{SR_h^{2/3}} \right)^2 = \left(\frac{7.518 \times 0.0167}{3.759 \times (0.673)^{2/3}} \right)^2 = 0.00189$$

$$i = 0.189\% \approx 0.19\%$$

➤ Vérification de vitesse :

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{7.518}{3.759} = 1.999 \text{ m/s}$$

$$V = C\sqrt{Ri} = 1.999 \text{ m/s}$$

D'après les deux formules la vitesse est identique, ce qui rend nos calculs fiable.

Tableau V- 3 Calcul du canal II

H (m)	B (m)	R_h	$Q_{souhaité} (m^3/s)$	i	$V_{écoulement} (m/s)$
1	≈ 3	0.637	7.518	0.19%	≈ 2

Pour faciliter le mélange de la saumure et de l'eau de mer et assurer une dilution optimale, on propose d'aménager le fond du canal en petits escaliers ou des petits obstacles. Vu que les obstacles ou les irrégularités au fond du canal peuvent perturber l'écoulement de l'eau. Pour mieux expliquer lorsque l'eau traverse des escaliers ou de petits obstacles, elle doit contourner ces obstacles, créant des zones de vitesses et de pressions différentes. Cela peut entraîner la formation de tourbillons et de turbulences, ce qui favorise le mélange.

V.1.2 Système de pompage

L'acheminement de l'eau de mer, avec un débit de $6.669 \text{ m}^3/s$, vers le canal a été conçu en utilisant un réseau de quatre conduites en polyéthylène haute densité (PEHD), chacune ayant une longueur de 200 mètres. Chaque paire de conduites est équipée d'un système de pompage, ce qui se traduit par deux systèmes de pompage au total.

Cette configuration a été élaborée pour garantir un transfert efficace et continu de l'eau de mer vers le canal. Les conduites en PEHD ont été choisies en raison de leur durabilité, de leur résistance à la corrosion et de leur faible perte de charge, ce qui permet de minimiser la perte de pression pendant le transport. Les deux systèmes de pompage, assurent une redondance opérationnelle et une gestion efficace du débit, permettant ainsi de maintenir une alimentation en eau stable et fiable pour les besoins du projet.

Cette configuration a été soigneusement étudiée et mise en place pour répondre aux exigences spécifiques du projet tout en garantissant une gestion optimale du débit d'eau de mer tout au long du processus.

Pour nos calculs, la vitesse d'écoulement pour les deux conduites est fixée à 1 m/s. Il est important de noter que chaque conduite transporte la moitié du débit total Afin de trouver la pompe idéale pour notre projet, on aura besoin des paramètres suivants :

- Hauteur Manométrique Totale (HMT)
- Débit d'eau de mer
- Hg

Avec :

$$HMT = H_g + J_{totale} \dots\dots\dots (V.10)$$

H_g: hauteur géométrique

J_{totale} : perte de charge linéaire (Hazen – Williams) + perte de charge singulière

$$J_{singuliere} = 10\% J_{lineaire}$$

Donc :

$$J_{totale} = J_{singuliere} + 10\%J_{lineaire} = 1.1 J_{lineaire} \dots\dots\dots (V.11)$$

Avec :

$$H_g = 20 \text{ m}$$

$$J_{lineaire} = \left(\frac{3.592}{C_{hw}}\right)^{1.85} \frac{L}{D^{4.87}} Q^{1.852} \dots\dots\dots (V.12)$$

Avec :

C_{hw} : parametre de rugosite = 150 pour PEHD

L : longueur de la conduite

D : diamètre de conduite

Q : débit d'eau de mer

- Calcul du diamètre :

Vu qu'on a la vitesse d'écoulement (1 m/s) et le débit d'eau de mer journalier on peut extraire la surface :

$$S = \frac{Q}{V}$$

Le débit d'eau de mer sera distribué de manière équilibrée entre les quatre conduits, donc :

$$Q = \frac{6.668}{4} = 1.667 \text{ m}^3/s$$

D'où la surface :

$$S = \frac{1.667}{1} = 1.667 \text{ m}^2$$

D'après la surface, on calcule le diamètre :

$$S = \pi r^2 = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \dots \dots \dots (V.13)$$

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \dots \dots \dots (V.14)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 1.667}{\pi}} = 1.4570 \text{ m} = 1457.00 \text{ mm}$$

Pour bien économiser, on peut établir une comparaison avec le calcul du diamètre économique conformément aux propositions formulées par Bresse et Bonnin, respectivement :

a. Bresse : $D_{eco} = 1.5 (Q^{\frac{1}{2}}) \dots \dots \dots (V.15)$

b. Bonnin : $D_{eco} = (Q^{\frac{1}{2}}) \dots \dots \dots (V.16)$

Application numérique :

Bresse : $D_{eco} = 1.5 (1.667^{\frac{1}{2}}) = 1.9368 \text{ m}$

Bonin : $D_{eco} = (1.667^{\frac{1}{2}}) = 1.2912 \text{ m}$

Maintenant comparons les résultats obtenus pour le diamètre économique en utilisant différentes méthodologies :

- Méthode de Bresse : Diamètre économique ≈ 1.9368 mètres (soit 1936.80 mm).

- Méthode de Bonnin : Diamètre économique = 1.2912 mètres (soit 1291.20 mm).
- Approche basée sur la vitesse d'écoulement : Diamètre économique initial = 1.4570m (soit 1457.00 mm).

Suite à l'analyse des résultats, nous avons décidé de sélectionner le diamètre économique proposé par la méthode de Bonnin, qui est 1291.20 mm. Cette option a été retenue en raison de son caractère économique par rapport aux autres méthodes évaluées.

Le diamètre normalise est DN = 1500 mm.

- La perte de charge totale de la conduite :

$$C_{hw} = 150 \text{ pour le PEHD}$$

$$L = 200 \text{ m}$$

$$D = 2.91393 \text{ m}$$

$$Q = 1.667 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$J_{\text{lineaire}} = \left(\frac{3.592}{150}\right)^{1.85} \frac{200}{1.8260^{4.87}} 1.667^{1.852} = 0.19$$

$$J_{\text{totale}} = 1.1 J_{\text{lineaire}} = 1.1 \times 0.149$$

$$J_{\text{totale}} = 0.16 \text{ m}$$

Donc la HMT :

$$HMT = H_g + J_{\text{totale}} = 20 + 0.16 = 20.16 = 20.20 \text{ m}$$

On a pris la décision d'ajouter un surplus de 2 mètres à la Hauteur Manométrique Totale (HMT) dans le cadre de notre conception pour des raisons de sécurité. Cette marge de sécurité a été intégrée afin de tenir compte de divers facteurs imprévus qui pourraient affecter le système, tels que des variations de pression, des obstructions temporaires, ou d'autres conditions de fonctionnement anormales.

En résumé :

Tableau V- 4 Données du choix de la pompe

HMT (m)	Hg (m)	Q (m ³ /s)
22	20	3.33

Il convient de noter que malgré la présence de quatre conduites, elles ont été regroupées en deux paires, chacune associée à un système de pompage dédié. En d'autres termes, deux systèmes de pompage ont été conçus pour gérer ensemble le débit total, chacun d'eux étant responsable de deux des quatre conduites.

Ainsi, lors de la sélection des pompes, le débit total à prendre en compte a été divisé par deux, ce qui a permis d'identifier les pompes appropriées pour chaque système de pompage.

V.1.2.1 Choix des pompes

Dans notre choix de pompes, on a opté pour l'installation de pompes dans un circuit parallèle en raison du débit élevé d'eau de mer $3.33(m^3/s)$ (soit $11988m^3/h$), Les pompes seront accompagnées d'un certain nombre de pompes de réserve choisit comme suit :

En mettant n : nombre de pompes principales

Si : $1 \leq n < 4$: une pompe de secours

$4 \leq n < 6$: deux pompes de secours

$6 \leq n$: trois pompes de secours

Pour choisir la pompe idéale, on a parcouru différents catalogues et logiciels, pour n'en citer que quelques-uns :

- PUMP-FLO : outil de sélection qui contient diverses marques américaines
- Xylect : outil de sélection de produits Xylem
- KSB easy select : outil de sélection des pompes KSB
- Caprari : outil de sélection des pompes Caprari
- DESMI catalogue : catalogue des produits en ligne des pompes DESMI
- LENNTECH catalogue : catalogue des produits en ligne de diverse marque

D'après ces outils et les données mentionnées dans le tableau V-3, le choix le plus économique était, la pompe **KSB KWP** avec 01 pompe en service et 01 pompe en réserve (stand-by) avec les caractéristiques suivantes :

Tableau V- 5 Caractéristique de la pompe

Pompe	Rendement (%)	NPSH requis (m)	Puissance absorbée (kW)	Diamètre effectif (mm)	Débit (m3/h)
KSB KWP	91.40%	8.41	808.10	1114	11989.83

D'après les informations fournies par le site KSB, cette pompe est conçue pour une installation sèche et présente une conception de volute horizontale. Elle est particulièrement adaptée à diverses applications, notamment le traitement des eaux usées industrielles et le processus de dessalement de l'eau de mer par osmose inverse.

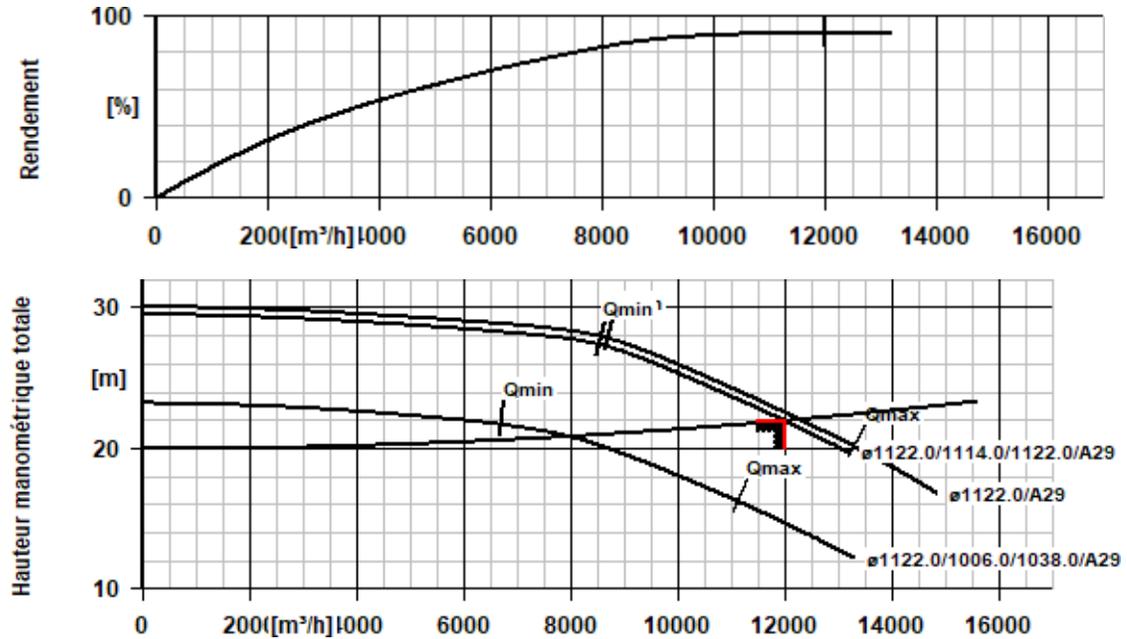


Figure V- 1 Courbe caractéristiques de la pompe KWP

- Conclusion :

Pour conclure cette variante, on a dimensionné le canal trapézoïdal en utilisant la méthode Manning-Strickler. Cette méthode a permis de déterminer les dimensions optimales du canal, soit une largeur d'environ 3 mètres et une hauteur de 1 mètre.

Afin de favoriser un mélange efficace de la saumure et de l'eau de mer, de petits obstacles seront placés au fond du canal pour créer une zone turbulente. De plus, afin de transporter l'eau de mer jusqu'au canal, un système de pompage d'une hauteur manométrique totale de 22 m a été conçu.

Le système de pompage se compose d'une pompe principale KSP KWP avec 1 pompe de secours. Ces étapes garantissent une gestion efficace de la dilution de la saumure.

2.2 Dimensionnement du bassin de dilution

Dans cette deuxième variante, on propose de dimensionner bassin en dessous du niveau de la mer à la sortie de la conduite de saumure pour exploiter la différence de niveaux naturelle à notre avantage. Cette configuration présente plusieurs avantages essentiels pour notre travail :

- **Écoulement Gravitaire de l'Eau de Mer** : En plaçant le bassin en dessous du niveau de la mer, on exploite la gravité pour permettre à l'eau de mer d'entrer dans le bassin de

manière naturelle et sans besoin de pompes. Cela réduit la consommation d'énergie et les coûts associés.

- **Dilution Naturelle de la Saumure** : La saumure arrive au bassin de la même manière, par écoulement gravitaire depuis la sortie de la conduite. Cette configuration nous permet de profiter de la différence de densité entre la saumure et l'eau de mer, ce qui favorise la dilution naturelle de la saumure dans l'environnement marin. Cela contribue à minimiser les impacts environnementaux en évitant la création d'une zone de concentration élevée de saumure.
- **Simplicité et Fiabilité** : En évitant l'utilisation de pompes pour le transfert de l'eau de mer et de la saumure, nous réduisons la complexité du système. Moins de composants mécaniques signifient également moins de maintenance et moins de risques de défaillance.
- **Économie d'Énergie** : La gravité est une source d'énergie gratuite et renouvelable. En utilisant l'écoulement gravitaire, nous minimisons la consommation d'énergie du système, ce qui réduit les coûts opérationnels à long terme.

En résumé, en plaçant notre bassin en dessous du niveau de la mer, nous tirons parti de la simplicité et de l'efficacité de l'écoulement gravitaire pour le transfert de l'eau de mer et de la saumure, tout en favorisant une dilution naturelle de la saumure dans l'environnement marin. Cette approche s'inscrit dans notre engagement envers la durabilité et la préservation de l'écosystème marin.

Pour la forme du bassin, on a opté pour un bassin cylindrique en raison de l'absence des coins morts.

Dans cette variante, et dans le but d'optimiser le processus d'écoulement de l'eau de mer dans le bassin tout en favorisant un mélange efficace avec la saumure, nous avons choisi d'incorporer un déversoir de forme rectangulaire en raison du débit élevé à l'intérieur du bassin. Cette décision découle de plusieurs considérations essentielles :

- **Amélioration de la Turbulence** : Le déversoir agit comme un dispositif qui crée des turbulences dans l'écoulement de l'eau de mer lorsqu'elle entre dans le bassin. Cette turbulence favorise un meilleur mélange de l'eau de mer et de la saumure. En cassant l'écoulement uniforme de l'eau de mer, le déversoir permet de disperser plus efficacement la saumure dans l'eau de mer, contribuant ainsi à une dilution plus rapide et uniforme.
- **Réduction de la Stratification** : Dans un bassin sans dispositif de mélange, l'eau de mer peut avoir tendance à rester en couches distinctes avec la saumure s'accumulant au fond. Cela peut entraîner une dilution inégale et moins efficace de la saumure. Le déversoir agit comme un perturbateur de cette stratification, garantissant un mélange homogène des deux liquides.

Une caractéristique importante de cette conception est que la saumure est déversée en aval du déversoir, où elle entre en contact avec l'eau de mer. Cette disposition garantit que la saumure

est introduite dans une zone d'écoulement déjà turbulent, maximisant ainsi son mélange immédiat avec l'eau de mer.

En combinant la gravité pour l'écoulement initial et le déversoir pour l'amélioration de la turbulence, notre système assure un mélange efficace de la saumure avec l'eau de mer, tout en maintenant la simplicité et la fiabilité de notre approche globale. Cette configuration permet une dilution optimale de la saumure afin de minimiser l'impact sur l'environnement marin.

2.2.1 Dimensionnement du bassin

Les dimensions du bassin ont été fixées avec une hauteur (H) de 6 mètres, et un temps de dilution 2 minute ce qui a permis de déterminer le volume du bassin en utilisant la formule :

$$V = Q \times t_c \dots \dots \dots (V. 18)$$

$$V = 7.518 \times 60 \times 2$$

$$V = 902 \text{ m}^3$$

Ce calcul a donné un volume approximatif de 902.16m^3 , qui a été arrondi à 902m^3 , pour des raisons pratiques.

- Calcul du rayon :

Le rayon du bassin (R) a été calculé en utilisant l'équation :

$$V = \pi R^2 H$$

Où V représente le volume du bassin, R le rayon, et H est la hauteur du bassin fixé à 6 m.

$$R = \sqrt{\frac{V}{\pi H}}$$

$$R = \sqrt{\frac{902.16}{6\pi}} = 6.92\text{m}$$

Pour des raisons pratiques on arrondi le rayon a 7 m.

Les caractéristiques du bassin sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau V- 6 Caractéristique du bassin

$Q_{total}(\text{m}^3/\text{s})$	V (m^3)	H(m)	R(m)	D(m)
7.518	902	6	7	14

2.2.2 Dimensionnement du déversoir

Dans le cadre de notre projet, nous sommes confrontés à la tâche complexe de gérer le débit d'eau de mer extrêmement considérable, atteignant une valeur de $6.668m^3/s$. Dans cette optique, notre choix s'est orienté vers l'adoption d'un déversoir rectangulaire en tant que composant central de notre système de dilution.

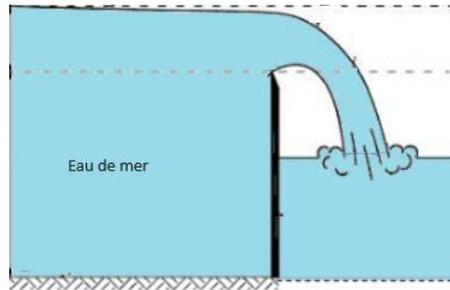


Figure V- 2 Schéma simplifié du déversoir

Pour atteindre notre objectif, qui est de déterminer les dimensions optimales du déversoir, à savoir sa largeur (L) et sa hauteur de lame d'eau (H), nous avons opté pour une approche simplifiée basée sur une configuration prédéfinie. Étant donné que le diamètre du bassin est de 14 mètres, nous avons décidé de fixer la longueur (L) du déversoir à 12 mètres. Cette décision découle de notre volonté de garantir que le déversoir occupe suffisamment d'espace pour permettre un écoulement fluide de l'eau de mer. En laissant un espace de 1 mètre de chaque côté du déversoir, nous nous assurons de la praticité de la construction et de la gestion. Cette approche élimine la nécessité de calculs itératifs complexes, simplifiant ainsi notre projet tout en répondant à nos besoins en termes de débit souhaité.

$$Q_{rectangulaire} = C_d \sqrt{2g} L H^2 \dots \dots \dots (V. 17)$$

Donc :

$$H = \left(\frac{Q}{C_d \times \sqrt{2g} \times L} \right)^{3/3}$$

- Définitions des données :

$C_d = 0.4$ pour déversoir rectangulaire

$Q =$ débit d'eau de mer

$g = 9.81$ l'accélération de la pesanteur

H : hauteur de la lame d'eau

L : largeur de déversoir

- Application numérique :

$$H = \left(\frac{6.668}{0.4\sqrt{2} \times 9.81 \times 12} \right)^{\frac{2}{3}}$$

$$H = 0.5 \text{ m}$$

Les caractéristiques du déversoir sont présentées dans le tableau V-6 ci-dessous :

Tableau V- 7 Caractéristique du deversoir

H (m)	L (m)	$Q_{\text{déversoir}}(m^3/s)$
0.5	12	6.668

V.2.3 Système de pompage

Initialement, l'approche envisagée pour le transfert du débit depuis le bassin, où une dilution s'était produite, impliquait l'utilisation d'un réservoir intermédiaire. Cependant, cette option a été réévaluée dû à plusieurs considérations cruciales. Tout d'abord, il est apparu que la création d'un réservoir de taille suffisante pour gérer le débit nécessaire aurait nécessité un volume important voir très grand, ce qui aurait des implications économiques significatives en termes de coûts de construction et d'entretien.

En outre, la nécessité d'un espace considérable pour accueillir un réservoir de grande taille aurait pu poser des problèmes logistiques et d'occupation de l'espace dans la zone en question.

Par conséquent, après une analyse approfondie des avantages et des inconvénients, on a décidé de privilégier une approche alternative, consistant en une bêche d'aspiration directe suivie d'un système de pompage pour acheminer efficacement le débit vers la mer. Cette décision repose sur des considérations techniques, économiques et environnementales visant à optimiser le processus de transfert du débit tout en minimisant les coûts.

- Caractéristiques pour choisir la pompe

Dans le cadre de ce système, nous avons choisi de conserver le même principe de configuration de pompage du canal, avec l'utilisation de 06 conduites en paire, où chaque paire est associée à une pompe (en tout 03 paires). Les 06 conduites ont une longueur de 100 mètres chacune avec un débit de $1.253 \text{ m}^3/s$ pour chaque conduite.

a. Calcul du diamètre

Pour le calcul du diamètre on utilisera la méthode de Bonin (V.16) :

$$D_{eco} = \sqrt{1.253} = 1.1193 \text{ (m)}$$

$$D_{eco} = 1119.30 \text{ mm}$$

Le diamètre normalisé, DN = 1200 mm

b. Calcul de la HMT

$$HMT = Hg + J_{Totale}$$

Avec :

- $Hg = 15 \text{ m}$
- $J_{totale} = J_{Lineaire} + J_{Singuliere}$
 $J_{totale} = J_{lineaire} + 0.1J_{Lineaire} = 1.1J_{Lineaire}$

Le calcul de la perte de charge linéaire se fait avec la même formule (V.12), ce qui nous donne :

$$J_{totale} = 0.099 \text{ m}$$

D'où :

$$HMT = 15.099 \text{ m}$$

De la même manière du système précédent, on ajoute une marge de sécurité de 2 m, nous donnons une HMT de 17 m.

Le tableau ci-dessous résumé les caractéristiques nécessaire pour le choix de la pompe :

Tableau V- 8 Caractéristiques du choix de la pompe

HMT (m)	Hg (m)	$Q_{totale}(m^3/s)$
17	15	2.506

V.2.3.1 Choix des pompes :

Avec les mêmes outils du choix précédents, la pompe choisit est KSB KWP K, avec les caractéristiques suivantes :

Tableau V- 9 Caractéristiques de la pompe KWP K

Pompe	Rendement (%)	NPSH requis (m)	Puissance absorbée (kW)	Diamètre effectif (mm)	Débit (m3/h)
KSB KWP	89.32	6.53	480.79	1079	9021.74

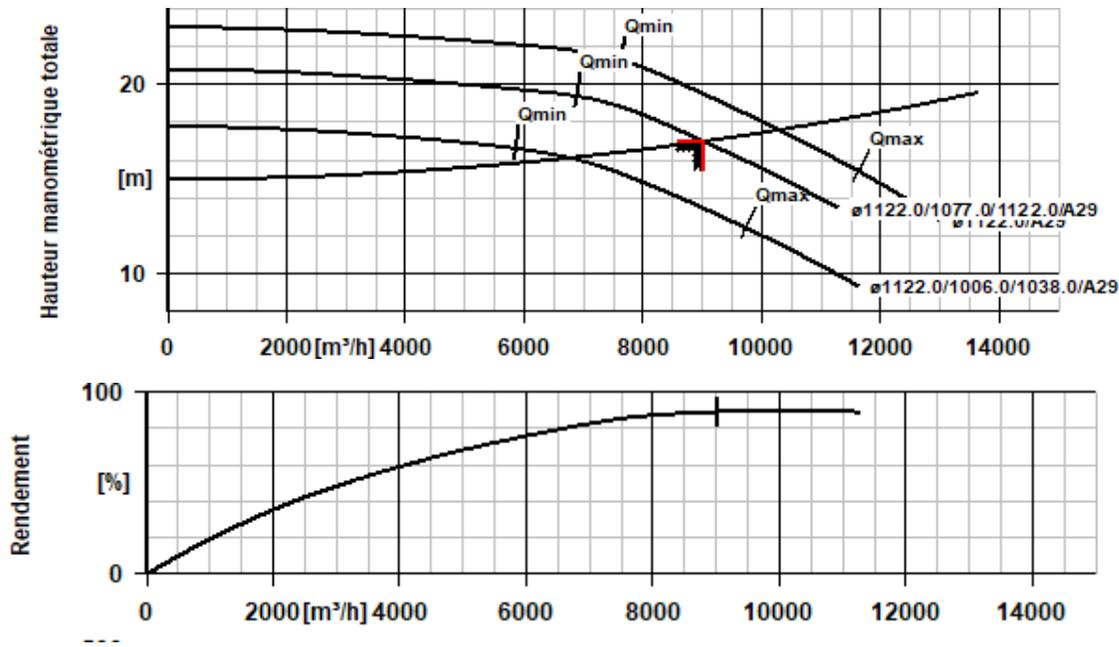


Figure V- 3 Courbe caractéristiques de la pompe KWP K

V.3 Consommation énergétique

On effectuera des calculs de consommation d'énergie pour les systèmes de pompage dans le but de déterminer le coût de la puissance nominale des pompes (kWh) en (DA) ainsi que le coût par mètre cube (m³). Sachant que le pompage fonctionne 20H et selon les factures d'El Marsa, le cout pour chaque kWh est 4.179 Da.

La consommation d'énergie est calculée comme suit :

$$kWh = Puissance \times Temps \text{ de fonctionnement} \dots\dots\dots (V.18)$$

$$kWh/m^3 = \frac{Consommation \ d'energie}{Debit \ en \ m^3/h} \dots\dots\dots (V.19)$$

Les calculs sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V- 10 Frais annuel d'exploitation de pompage

Pompes	Puissance (kW)	Temps de fonctionnement (h)	Consommation d'énergie (kWh)	Coût par kWh (DA/kWh)	Frais (DA)
KWP	808.10	7300	5899130	4.179	24652464.27
KWP K	480.79	7300	3509767	4.179	14667316.29

La première pompe (KWP) a une puissance plus élevée, une consommation d'énergie plus importante et donc des frais totaux plus élevés par rapport à la deuxième pompe (KWP K) qui a une puissance plus basse et des frais totaux moins élevés malgré un coût par kWh similaire.

Pour calculer les coûts par mètre cube (m³), nous devons d'abord établir la consommation d'énergie par mètre cube, puis multiplier ce chiffre par le tarif du kilowattheure (kWh) :

$$\text{Consommation energetique par (m}^3\text{)} = \frac{\text{consommation d'energie journaliere}}{\text{Debit journalier}}$$

Pour la première et la deuxième variante, en ce qui concerne le débit journalier respectivement :

$$Q_1 = 576188 \text{ m}^3/\text{j}$$

$$Q_2 = 649521 \text{ m}^3/\text{j}$$

Tableau V- 11 Frais d'exploitation par m3

Pompe	Consommation journalière (kWh)	consommation d'énergie par m ³	Coût par kWh (DA)	Coût par m ³ (DA)
KWP	16162	0.0280	4.179	0.117
KWP K	9615.8	0.0148	4.179	0.062

Ainsi, en ce qui concerne les coûts d'exploitation des deux pompes, la deuxième variante, qui consiste en un bassin de dilution, s'avère être l'option la plus économique, même lorsque ces valeurs sont multipliées par le nombre de paires de conduites, soit 02 paires pour la première variante et 03 paires pour la deuxième variante.

• **Troisième Option de Dilution :**

On peut également proposer une troisième variante dans le même contexte, ou un regard de jonction est conçu pour permettre la rencontre de l'eau de mer pompée et de la saumure qui s'écoule gravitairement. La dilution se produit au point de rencontre dans le regard de jonction.

Enfaite un regard de jonction est conçu de manière à ce que la saumure produite s'écoule gravitairement depuis la station de dessalement vers ce point à travers la conduite de rejet donc le regard sera placée à la sortie de la conduite donc couper la conduite vu que la conduite est en deux tronçon, le premier sur la terre le deuxième sous la mer.

L'eau de mer nécessaire au processus de dilution est pompée depuis la mer vers le regard de jonction. Les pompes sont utilisées pour acheminer l'eau de mer vers le point de rencontre.

Au niveau du regard de jonction, la saumure gravitaire provenant de la station et l'eau de mer pompée se rencontrent. C'est à ce moment précis que la dilution se produit.

Pour assurer un mélange efficace et une dilution optimale, des dispositifs de mélanges tels que des chicanes peuvent être installés au point de rencontre dans le regard de jonction. Ces dispositifs créent des zones de turbulence qui favorisent le mélange entre la saumure et l'eau de mer.

Le mélange au point de rencontre permet de diluer la saumure à la concentration ciblée, qui est généralement légèrement supérieure à la salinité de la mer environnante. Cette concentration cible est calculée pour minimiser l'impact environnemental du rejet.

Après le point de rencontre et le mélange au sein du regard de jonction, le mélange final, qui est maintenant à la concentration souhaitée, est déversé dans la mer. Comme la dilution a été contrôlée et optimisée, l'effet de panache de la saumure est réduit, ce qui minimise l'impact sur l'environnement marin.

Cette variante permet une dilution précise et contrôlée au point de rencontre, ce qui contribue à réduire l'impact environnemental du rejet de saumure. L'utilisation de dispositifs de mélange au point de rencontre peut améliorer l'efficacité de la dilution et favoriser un mélange homogène entre la saumure et l'eau de mer.

Conclusion générale

Dans le but de réduire l'impact néfaste de la saumure sur l'environnement, notre étude se concentre sur l'exploration de la possibilité de diluer la saumure en utilisant de l'eau de mer.

Nous avons pris pour exemple la station d'El Marsa, dont la capacité est de 60 000 m³/jour avec un rejet de saumure de 73 333 m³/jour, présentant une salinité de 69 g/l.

Notre démarche a débuté par une exposition théorique du processus de dessalement ainsi que de la gestion de la saumure et de ses répercussions environnementales.

Au cours de notre recherche, nous avons développé deux approches distinctes. La première consiste en la conception d'un canal trapézoïdal à surface libre d'une longueur de 187 mètres. Dans ce canal, la saumure s'écoule gravitairement tandis que l'eau de mer est pompée. Le fond de ce canal a été aménagé en escalier afin d'accroître la turbulence et, par conséquent, la dilution.

La deuxième variante implique la conception d'un bassin cylindrique. De plus, pour faciliter le mélange et atteindre la salinité souhaitée, un déversoir rectangulaire a été intégré dans le bassin, augmentant ainsi les turbulences et améliorant le mélange.

Nos calculs ont révélé que le canal a une largeur de 3 mètres et une hauteur de 1 mètre, avec une longueur totale de 187 mètres. L'eau de mer est pompée à l'aide de 2 pompes KSB KWP, une pour chaque paire (soit deux paires). En ce qui concerne le bassin, il présente une hauteur de 6 mètres et un rayon de 7 mètres. Le système de mélange, représenté par le déversoir, mesure 12 mètres de longueur et 0,5 mètre de hauteur. Cette variante requiert 3 pompes principales et 3 pompes de secours, soit une pour chaque paire (au total, trois paires).

Nous avons également exploré une troisième variante en tant qu'option supplémentaire, qui consiste en un regard de jonction où la saumure et l'eau de mer pompée se rencontrent, suivie d'un rejet gravitaire.

A la fin, on a procédé à une étude comparative basée sur la consommation énergétique des pompes, démontrant que la conception d'un bassin de dilution s'avère être la solution optimale.

Ce travail a été fait dans le but de mettre en lumière l'importance capitale de la gestion de la saumure. Notre travail s'attache à sensibiliser à la nécessité de traiter de manière réfléchie la

question de la saumure dans le contexte du dessalement de l'eau si nous souhaitons continuer à l'utiliser comme moyen de lutter contre la pénurie d'eau. Il constitue une prise de conscience essentielle quant à l'impact environnemental de nos choix en matière de gestion des ressources hydriques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. Cotruvo et al., “Desalination Technology” (2010)
- [2]. Sarah Saadoun. “Étude de gestion et valorisation de la saumure issue de la station de dessalement de Fouka w.Tipaza” (2022)
- [3]. Bousnina.F, et Mazari.I, “Étude paramétrique de procédé de dessalement et de déminéralisation d’eau de mer dans la centrale Thermique de Cap Djinet” (2021)
- [4]. Backer, S.N et al “Brine Management” (2022)
- [5]. Backer, S.N et al “Brine Solution: Current Status, Future Management and Technology Development” (2022)
- [6]. Morillo et al “Comparative Study of Brine Management Technologies for Desalination Plants.” (2014)
- [7]. Shahmansouri et al., “Feasibility of Extracting Valuable Minerals from Desalination Concentrate.” (2015)
- [8]. Bellona.C, “Extraction of Valuable Materials from Reverse Osmosis Concentrate.” (2014)
- [9]. Bello et al., “An Overview of Brine Management.” (2021)
- [10]. Arafat.H, “Desalination Sustainability” (2017).
- [11]. Saeed, Ershath, and Al-Tisan, “Perspective on Desalination Discharges and Coastal Environments of the Arabian Peninsula” Saudi-Arabia
- [12]. Ahmed et al., “Brine Disposal from Reverse Osmosis Desalination Plants in Oman and the United Arab Emirates” (2001)
- [13]. Ibrahim and Eltahir, “Impact of Brine Discharge from Seawater Desalination Plants on Persian/Arabian Gulf Salinity” J. Environ. Eng (2019)
- [14]. Amokrane and Salmi, “Surface Spreading of the Brine Discharge from the Seawater Reverse Osmosis Plants” (2021)

- [15]. Belatoui et al., “Environmental Effects of Brine Discharge from Two Desalinations Plants in Algeria (South Western Mediterranean).” (2017)
- [16]. Mehtougui, Kerfouf, and Ardjoum, “Assessment of the Quality of Water Discharges from a Desalination Plant: Case of Honaine Station (Western Algeria).” (2018)
- [17]. Palomar and J., “Impacts of Brine Discharge on the Marine Environment. Modelling as a Predictive Tool.” (2011)
- [18]. Missimer, Jones, and Maliva, “Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-Osmosis Desalination Facilities” (2015)
- [19]. Amitouche, Mourad. “Impacts des rejets des stations de dessalement sur le milieu récepteur” (2016)
- [20]. Fernández-Torquemada et al, “Dispersion of Brine Discharge from Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants” (2009)
- [21]. Manuel d'exploitation et mise en service de la station d'El Marsa (2022)
- [22]. Cosider et AEC “CONCEPTION HYDRAULIQUE d'EL Marsa” (2022)
- [23]. Mechanical Electrical Service “CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES EQUIPEMENTS VISES” (2021)