



Faculty of Sciences and Technology
Department of Process Engineering
Ref :...../U.M/F.S.T/2026

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم هندسة الطرائق
رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت/2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : **GÉNIE DES PROCÉDÉS**

Option: **GÉNIE DES PROCÉDÉS DES MATÉRIAUX**

THÈME

*Valorisation d'un déchet industrielle : Saumure et Tartre
du Complexe KAHRAMA en Engrais Agricoles*

Présenté par

1- Mlle BENMESTARI Ines Salsabil

Soutenu le 29/06/ 2026 devant le jury composé de :

Président :	FEDDAL Imene	MCA	Université de Mostaganem
Examineur :	KHELLADI Malika	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	MOHAMED SEGHIR Zahira	MCB	Université de Mostaganem
Rapporteur :	MEZOUAGH Amina	MCA	Université de Mostaganem
Co-rapporteur :	DRIOUCH Aouatef	Pr	Université de Mostaganem

Remerciement

Avant tout, je remercie Allah le Tout-Puissant de m'avoir accordé la santé, la force, la patience et la détermination nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrante **Dr MOHAMED SEGHIR Zahira** pour son accompagnement, ses conseils avisés, sa disponibilité et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce projet. Son encadrement a été précieux dans l'aboutissement de ce travail.

Mes remerciements vont également à **Dr MEZOUAGH Amina** et **Pr DRIOUCH Aouatef** ; mes co-encadrantes, pour leur aide, leur disponibilité et leur appui technique durant la réalisation de ce mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils portent à ce mémoire et pour le temps consacré à son évaluation.

Je remercie chaleureusement nos enseignants du département de Génie des Procédés qui ont contribué à ma formation universitaire et m'ont transmis les connaissances scientifiques et techniques indispensables à la réalisation de ce projet.

Je tiens également à remercier les responsables et le personnel de la station de dessalement **KAHRAMA** pour leur accueil, leur disponibilité et leur collaboration, qui m'ont permis d'accéder aux informations et aux échantillons nécessaires à cette étude.

Mes remerciements les plus sincères sont adressés au **Plateau Technique du Centre de Recherche en Analyses Physico-Chimiques (CRAPC)** pour leur précieuse contribution à la réalisation des analyses et caractérisations expérimentales. Leur accompagnement scientifique a constitué un apport essentiel à la validation des résultats obtenus.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à l'équipe du laboratoire de **la faculté des Sciences et de la Technologie** pour leur accueil et leur contribution au bon déroulement de mon stage.

J'exprime également ma profonde reconnaissance à **l'Incubateur de l'université ainsi qu'à toute son équipe**, pour leur accompagnement, leurs conseils, leurs formations et leur soutien dans le développement entrepreneurial du projet. Leur contribution a permis d'enrichir cette étude par une vision innovante orientée vers la valorisation économique et la création de valeur.

Je remercie également toutes les personnes, collègues, techniciens, chercheurs et amis qui m'ont apporté leur aide, leurs encouragements et leurs conseils, directement ou indirectement, durant la réalisation de ce travail.

Ce travail s'inscrit dans une démarche de valorisation durable des ressources marines à travers le projet **OcéanReborn**, et n'aurait pu aboutir sans l'aide et la contribution de toutes les personnes citées précédemment.

DEDICACE

Derrière ce diplôme se cachent des batailles silencieuses, des heures de doute et une volonté de fer. Ce travail n'est pas un aboutissement, mais le premier jalon d'un chemin tracé avec une foi inébranlable. Guidée par une ambition sans limites et une discipline constante, je refuse les barrières : ce que je veux, je travaille pour l'obtenir, et je l'obtiens.

À moi-même,

À la femme que je regarde aujourd'hui dans le miroir avec une fierté immense. Merci d'avoir résisté en silence lorsque c'était difficile, de n'avoir jamais baissé les bras et d'avoir honoré, par ton travail, la femme forte, unique et redoutable que tu es devenue. Merci d'avoir honoré tes promesses, d'avoir protégé tes rêves.

Je dédie ce succès avec une infinie gratitude

À ma tendre maman,

Une femme et une mère d'une fidélité absolue, dont l'amour immense et les encouragements infinis ont été mon armure. Maman, tu as cru en mes rêves les plus grands. Sache que si je devais naître cent fois, c'est toi, et toi seule, que je choisirais à chaque vie pour être ma mère.

À mon cher frère Hichem,

Mon allié et mon pilier au quotidien. Merci pour ta présence, ton soutien indéfectible et pour avoir toujours été là à mes côtés. Que cette réussite soit une fierté pour toi et le symbole de la force de nos liens.

À mon ami très proche,

Celui qui, par sa simple présence et sa foi en moi, a su me fabriquer des ailes pour m'aider à m'envoler vers mes ambitions. Merci d'être ce repère rare, cette épaule et ce complice qui rendent le chemin vers la grandeur plus beau et accessible.

À mes précieuses amies,

Qui ont partagé mes éclats de rire, mes doutes et mes victoires. Merci pour votre complicité et votre solidarité tout au long de cette aventure universitaire.

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation des ressources minérales issues des stations de dessalement d'eau de mer, à travers le développement d'une approche innovante de transformation des rejets en produits à valeur ajoutée. L'objectif principal de ce travail était de récupérer et de valoriser les composés minéraux présents dans le tartre, les matières en suspension et la saumure de rejet afin de produire des matériaux d'intérêt agricole, environnemental et industriel.

Les travaux expérimentaux ont porté sur la collecte, le traitement et la caractérisation des différents échantillons provenant d'une station de dessalement. Les analyses physico-chimiques réalisées, notamment par fluorescence X (FRX) et spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR), ont permis d'identifier la composition minérale des rejets et de mettre en évidence leur potentiel de valorisation. Les résultats ont révélé la présence de composés riches en calcium, magnésium et chlorure de sodium, ouvrant la voie à la production de nitrate de calcium, d'hydroxyde de magnésium et de sel marin valorisé.

Dans une perspective d'économie circulaire, ce travail a conduit à la conception du projet entrepreneurial **OcéanReborn**, dont la vocation est de transformer les sous-produits du dessalement en ressources utiles et commercialisables. Cette démarche contribue à la réduction de l'impact environnemental des rejets tout en créant de nouvelles opportunités économiques.

Les résultats obtenus démontrent la faisabilité technique de cette approche et soulignent le potentiel des ressources marines comme source de matières premières durables pour différents secteurs d'activité.

Mots-clés : Dessalement d'eau de mer, valorisation des rejets, tartre marin, nitrate de calcium, hydroxyde de magnésium, chlorure de sodium, FTIR, FRX, économie circulaire, OcéanReborn.

Abstract

This study focuses on the valorization of mineral resources generated by seawater desalination plants through the development of an innovative approach for converting waste streams into value-added products. The main objective was to recover and valorize mineral compounds present in scale deposits, suspended solids, and brine effluents in order to produce materials with agricultural, environmental, and industrial applications.

Experimental work involved the collection, treatment, and characterization of samples obtained from a desalination plant. Physicochemical analyses, including X-ray fluorescence (XRF) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), were performed to determine the mineral composition of the collected materials and evaluate their valorization potential. The results revealed significant amounts of calcium, magnesium, and sodium chloride compounds, enabling the production of calcium nitrate, magnesium hydroxide, and valorized marine salt.

Within a circular economy framework, this work led to the development of the entrepreneurial project **OcéanReborn**, aimed at transforming desalination by-products into useful and marketable resources. This approach contributes to reducing the environmental impact of desalination waste while creating new economic opportunities.

The obtained results demonstrate the technical feasibility of this valorization strategy and highlight the potential of marine resources as a sustainable source of raw materials for various industrial sectors.

Keywords : Seawater desalination, waste valorization, marine scale, calcium nitrate, magnesium hydroxide, sodium chloride, FTIR, XRF, circular economy, OcéanReborn.

ملخص

تندرج هذه الدراسة في إطار الاستفادة من الموارد المعدنية الناتجة عن محطات تحلية مياه البحر، من خلال تطوير نهج مبتكر لتحويل النفايات إلى منتجات ذات قيمة مضافة. كان الهدف الرئيسي من هذا العمل هو استخلاص وتثمين المركبات المعدنية الموجودة في الترسبات الكلسية والمواد العالقة والمحلول الملحي الناتج عن عملية التحلية، من أجل إنتاج مواد ذات أهمية زراعية وبيئية وصناعية.

ركزت الأعمال التجريبية على جمع ومعالجة وتحديد خصائص العينات المختلفة المستمدة من محطة لتحلية المياه. وقد والتحليل (XRF) مكنت التحليلات الفيزيائية والكيميائية التي أجريت، ولا سيما باستخدام تقنية الفلورة بالأشعة السينية ، من تحديد التركيب المعدني للمخلفات وإبراز إمكانات الاستفادة (FTIR) الطيفي بالأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه منها. وكشفت النتائج عن وجود مركبات غنية بالكالسيوم والمغنيسيوم وكلوريد الصوديوم، مما يمهد الطريق لإنتاج نترات الكالسيوم وهيدروكسيد المغنيسيوم والملح البحري المُستغل.

من منظور الاقتصاد الدائري، أدى هذا العمل إلى تصميم مشروع ريادي يهدف إلى تحويل المنتجات الثانوية لعملية تحلية المياه إلى موارد مفيدة وقابلة للتسويق. وتساهم هذه المبادرة في الحد من الأثر البيئي للمخلفات مع خلق فرص اقتصادية جديدة.

ويُظهر النتائج التي تم التوصل إليها الجدوى التقنية لهذا النهج وتسلط الضوء على إمكانات الموارد البحرية كمصدر للمواد الخام المستدامة لمختلف قطاعات النشاط.

الكلمات المفتاحية: تحلية مياه البحر، الاستفادة من النفايات، الترسبات البحرية، نترات الكالسيوم، هيدروكسيد المغنيسيوم، OcéanReborn، الاقتصاد الدائري، FRX، FTIR، كلوريد الصوديوم،

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

Symbole	Signification
%	Pourcentage
°C	Degré Celsius
pH	Potentiel Hydrogène
cm ⁻¹	Nombre d'onde
g	Gramme
kg	Kilogramme
mL	Millilitre
L	Litre
mol	Mole
mol·L ⁻¹	Concentration molaire
Ca ²⁺	Ion calcium
Mg ²⁺	Ion magnésium
Na ⁺	Ion sodium
Cl ⁻	Ion chlorure
OH ⁻	Ion hydroxyde
NO ₃ ⁻	Ion nitrate
Abréviation	Signification
MSF	Multi-Stage Flash (Dessalement multi-effets à détente instantanée)
FTIR	Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier
MEB	Microscopie Electronique à balayage
FRX	Fluorescence des Rayons X
MES	Matières En Suspension
SM	Saumure de rejet

Abréviation	Signification
TR	Tartre de la station
QR	Quick Response
CRAPC	Centre de Recherche en Analyses Physico-Chimiques
BMC	Business Model Canvas
R&D	Recherche et Développement

Formule	Désignation
CaCO ₃	Carbonate de calcium
Mg(OH) ₂	Hydroxyde de magnésium
Ca(NO ₃) ₂	Nitrate de calcium
NaCl	Chlorure de sodium
HNO ₃	Acide nitrique
CO ₂	Dioxyde de carbone
H ₂ O	Eau

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Résumé

Abréviation et Symbole

Liste des Tableaux

Liste des Figures

INTRODUCTION GENERALE 1

Chapitre I : Le dessalement de l'eau de mer en Algérie et le problème de la saumure

I.1 Définition de l'eau	4
I.2 Importance de l'eau	4
I.3 Sources des eaux	4
I.4 Composition de l'eau de mer	5
I.4.1 : Éléments principaux (chlorure, sodium, sulfate, magnésium, etc.)	5
I.4.2 : Autres éléments minéraux (traces)	5
I.4.3 : Matières organiques	6
I.4.4 : Gaz dissous (azote, oxygène, CO ₂)	6
I.5 Histoire du dessalement	6
I.6 Définition du dessalement	7
I.7 Dessalement dans le monde	7
I.8 Dessalement en Algérie	8
I.9 Les différentes technologies de dessalement	9
I.9.1 : Distillation thermique	10
I.9.1.1 : MSF (distillation éclair multiétagée)	10
I.9.1.2 : MED (distillation à effets multiples)	10
I.9.1.3 : VCD (distillation par compression de vapeur)	11
I.9.2 : Technologies membranaires	12
I.9.2.1 : Osmose inverse (avec éléments constitutifs)	12
I.9.2.2 : Nanofiltration	13
I.9.2.3 : Électrodialyse	14
I.10 Choix du procédé de dessalement	14
I.11 Choix du procédé en Algérie	15
I.12 Gestion et valorisation de la saumure	16
I.12.1 : Introduction	16
I.12.2 : Définition de la saumure	16
I.12.3 : Composition de la saumure	17
I.12.4 : Impact du dessalement	18
I.12.5 : Impact environnemental dû à la saumure	18

Sommaire

I.12.6 : Techniques de gestion de la saumure	19
I.12.6.1 : Rejet dans les eaux de surface	19
I.12.6.2 : Déversement dans les égouts sanitaires	20
I.12.6.3 : Injection en puits profond	21
I.12.6.4 : Bassin d'évaporation	21
I.12.6.5 : Irrigation par asperation	22
I.12.6.6 : Rejet sans liquide (ZLD)	23
I.12.7 : Applications bénéfiques de la saumure	24
I.12.8 : Récupération de l'énergie à partir de la saumure	25
I.12.8.1 Osmose directe	25
I.12.8.2 Electrodialyse	25
I.12.9 : Récupération des minéraux dans la saumure	26
I.12.10 : Impact environnemental du rejet de saumure en mer	27
I.12.10.1 Rejet direct dans la mer	27
I.12.10.2 Le rejet direct dans la mer en Algérie	28
I.12.11 : Les effets de la décharge de saumure dans le champ proche et lointain	28
I.12.12 : Le défi de la salinité élevée : Conséquences du rejet de saumure dans les écosystèmes marins	29

Chapitre II : Présentation du Complexe KAHRAMA

II.1 Introduction	31
II.2 Historique de création de la société	31
II.3 Situation biogéographique	32
II.4 Principales installations du complexe	33
II.5 Description du procédé de dessalement (MSF)	34
II.5.1 : Objet du système de prise d'eau de mer	34
II.5.2 : Description détaillée des sous-systèmes :	35
II.5.3 : Système de récupération de gaz CO ₂	40
II.5.4 : Système commun (filtre à charbon actif, traitement de l'eau dessalée,)	40
II.6 Techniques et méthodes de traitement à la centrale KAHRAMA	42
II.6.1 : Le phénomène d'entartrage (tartre alcalin et non-alcalin)	42
II.6.2 : Le phénomène de corrosion (causes : O ₂ dissous, CO ₂ , érosion)	42
II.7 Principales causes de corrosion	42
II.8 Relation d'interdépendance (corrosion sous dépôt)	43
II.9 Stratégies de lutte et de contrôle	43
II.10 Maintenance annuelle globale (Grand Arrêt)	44
II.11 Sécurité HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement)	44
II.11.1 : Sécurité sur site industriel	44
II.11.2 : Sécurité en laboratoire	44
II.11.3 : Gestion des déchets et protection de l'environnement	45
II.12 Zone de stockage et distribution de l'eau produite	45

Chapitre III Les engrais minéraux : contexte, types et besoin

III.1 Introduction	47
III.2 Définitions	47
III.2.1 : Définition générale d'un engrais	47
III.2.2 : Définition des engrais minéraux	47
III.2.3 : Les éléments nutritifs des plantes	48
III.3 Classification des Engrais Minéraux	48
III.3.1 : Engrais simples	48
III.3.1.1 : Engrais azotés (N) —	49
III.3.1.2 : Engrais phosphatés (P)	49
III.3.1.3 Engrais potassiques (K)	50
III.3.2 : Engrais composés	50
III.3.2.1 : Engrais NPK	50
III.3.3 : Engrais foliaires	50
III.3.4 : Engrais de fertirrigation	50
III.4 Utilisation Agronomique des Engrais Minéraux	51
III.4.1 : Rôle des éléments nutritifs dans la plante	51
III.4.1.1 : Rôle de l'azote (N)	51
III.4.1.2 : Rôle du phosphore (P)	51
III.4.1.3 : Rôle du potassium (K)	51
III.4.2 : Principes de fertilisation raisonnée	51
III.5 Modes et Périodes d'Application	52
III.6 Lien entre la Saumure de Dessalement et les Engrais Minéraux	52
III.6.1 : Composition de la saumure	52
III.6.2 : Saumure et amendement des sols	53
III.6.3 : Concept d'usine intégrée dessalement-engrais	53
III.7 Importance des Engrais Minéraux dans l'Agriculture Algérienne	54
III.7.1 : Contexte agricole algérien	54
III.7.2 : Consommation d'engrais en Algérie	54
III.7.3 : Production nationale — groupe FERTIAL d'Arzew	54
III.8 Conclusion	54

Chapitre IV Protocole expérimentale et présentations des résultats

IV.1 Échantillonnage et préparation	55
IV.1.1 Collecte multi-sources	55
IV.1.2 Matériels de laboratoire et réactifs utilisés	55
IV.2. Protocole expérimental et analyses chimiques	56
IV.2.1 Méthodes d'analyse physico-chimiques	56
IV.2.2. Dosages volumétriques	57
IV.2.3. Analyse de l'alcalinité (TAC)	58
IV.3. Procédé de récupération des solides	58
IV.3.1. Extraction par voie gravimétrique	58
IV.3.2. Traitement du tartre brut récupéré	59
IV.4 Techniques de caractérisation instrumentale	59
IV.4.1 : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FT-IR)	59
IV.4.2 : Fluorescence X (FRX)	59
IV.4.3 : Microscopie Électronique à Balayage (MEB) + analyse EDX	59
IV.5 Synthèse de l'Hydroxyde de Magnésium et du Nitrate de Calcium	59

Sommaire

IV.5.1 : Réactifs et équipements de laboratoire	60
IV.5.2 : Synthèse de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ à partir de la saumure	60
IV.5.3 : Synthèse du $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ à partir du tartre	60
IV.6 Résultats et Discussion	61
IV.6.1 : Résultats des campagnes expérimentales	61
IV.6.2 : Analyse FTIR	67
IV.6.3 : Analyse MEB + EDX	68
IV.6.4 : Analyse FRX	68
IV.6.5 Indice de Réfraction	69
IV.7 Tests réalisés	69
IV.7.1 Tests sur l'Hydroxyde de Magnésium $\text{Mg}(\text{OH})_2$	69
IV.7.1.1 Caractérisation de la pureté et des propriétés physiques	69
IV.7.1.1.2 Essai de conductivité	69
IV.7.1.2 Tests d'application : Neutralisation acide (Pouvoir Tampon)	69
IV.7.2 Test sur le Nitrate de Calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	72
IV.7.2.1 Test de solubilité commerciale	72
IV.7.2.2 Test Conductivité Électrique (CE)	82
IV.7.2.3 Essai agronomique (Application sur la menthe)	73

Conclusion Générale

Références Bibliographique

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 Schéma de distillation éclair multiétage	9
Figure I. 2 Schéma de distillation a effets multiples	10
Figure I. 3 Schéma de distillation par compression de vapeur	10
Figure I. 4 Principe de l'osmose inverse	11
Figure I. 5 Schéma de l'électrodialyse	13
Figure I. 6 Schéma de l'électrodialyse	19
Figure I. 7 Bassin d'évaporation.....	21
Figure I. 8 Schéma de bassin d'évaporation	21
Figure I. 9 Schéma d'osmose direct.....	24
Figure I. 10 Diffuseur de rejet de saumure	Figure I. 11 Système de décharge
Figure I. 12 Schéma des émissaires marins.	28
Figure II. 1 Complexe KAHRAMA.....	30
Figure II. 2 Photo de procédé du complexe KAHRAMA	31
Figure IV. 1 Echantillonnage	55
Figure IV. 2 Titrage par l'EDTA	58
Figure IV. 3 Synthèse de l'Hydroxyde de Magnésium	60
Figure IV. 4 Synthèse du Nitrate de Calcium.....	61
Figure IV. 5 Refractometre	69
Figure IV. 6 Tests de neutralisation du sol par $Mg(OH)_2$	70
Figure IV. 7 l'essai du nitrate de calcium sur la menthe	74

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Concentration des éléments principaux pour une eau de mer de salinité de 35% ...	4
Tableau I.2 Concentrations des différents éléments ($\mu\text{g/l}$) rencontrés sous forme dissoute, colloïdale ou en suspension.	5
Tableau I.3 Les grandes stations en Algérie.....	8
Tableau I.4 Avantages et défis de ZLD.....	22
Tableau I.5 Principales applications des minéraux issus des saumures	25
Tableau II.1 Valeurs de contrôle Environnemental	32
Tableau III. 1 Classification des éléments nutritifs essentiels aux plantes	45
Tableau III. 2 Principaux engrais azotés et leurs caractéristiques.....	46
Tableau III.3 Composition typique de la saumure de dessalement et valorisations potentielles	50
Tableau IV. 1 Suivi des paramètres physico-chimiques (Mesures directes).....	62
Tableau IV. 2 Résultats de la TDS Eau de mer	62
Tableau IV. 3 Résultats de la TDS saumure.....	63
Tableau IV. 4 Résultats de l'analyse ionique	63
Tableau IV. 5 Résultats de la TDS Eau de mer	64
Tableau IV. 6 Résultats de la TDS saumure.....	64
Tableau IV. 7 Résultats de l'analyse ionique	65
Tableau IV. 8 Résultats de la TDS Eau de mer	65
Tableau IV. 9 Résultats de la TDS Saumure	66
Tableau IV. 10 Résultats de l'analyse ionique	66
Tableau IV. 11 Tests de Neutralisation acide	70
Tableau IV. 12 Simulation d'amendement sur sol acide	72
Tableau IV. 13 Paramètres agronomiques relevés lors de l'essai sur la menthe	73

INTRODUCTION GENERALE

L'eau est une ressource vitale dont la disponibilité conditionne le développement économique, agricole et humain de toute société [1]. Face à la raréfaction des eaux douces conventionnelles, le dessalement de l'eau de mer s'est imposé comme une solution stratégique, notamment dans les régions arides et semi-arides comme l'Algérie [2,3]. Les stations de dessalement, à l'image de celle exploitée par KAHRAMA (Kahramaa en référence aux infrastructures de production d'eau et d'énergie), permettent de répondre à une demande croissante en eau potable [4]. Cependant, ce procédé génère inévitablement un sous-produit : la saumure, une eau hautement concentrée en sels minéraux rejetée en grande quantité dans l'environnement [5].

La saumure, longtemps considérée comme un déchet encombrant, pose de sérieux problèmes écologiques lorsqu'elle est rejetée sans traitement dans les milieux marins ou terrestres : augmentation de la salinité, perturbation des écosystèmes aquatiques, et dégradation des sols [6]. Paradoxalement, cette solution saline est d'une richesse minérale remarquable, renfermant des concentrations élevées en chlorure de sodium (NaCl), en magnésium, en potassium, en calcium, et en d'autres oligoéléments essentiels à la nutrition des plantes [7].

C'est dans cette perspective de valorisation des déchets industriels et d'économie circulaire que s'inscrit le présent travail de recherche. L'idée centrale est de transformer la saumure issue de la station de dessalement KAHRAMA, jusqu'ici traitée comme un effluent à éliminer, en une ressource valorisable sous forme d'engrais minéraux. En effet, les éléments constitutifs de la saumure correspondent en grande partie aux besoins nutritifs des cultures, notamment en sodium, en magnésium et en potassium, ce qui ouvre des perspectives intéressantes pour une application agricole raisonnée. [8]

Cette démarche s'inscrit dans un double enjeu : d'une part, réduire l'impact environnemental du rejet de la saumure, et d'autre part, contribuer à l'amélioration de la fertilisation agricole dans une région où les sols peuvent être déficients en certains minéraux. Elle répond également aux orientations mondiales en matière de développement durable, de gestion responsable des ressources et de réduction des déchets industriels. [9]

Notre étude vise donc à analyser la composition physicochimique de la saumure de la station KAHRAMA, à évaluer son potentiel fertilisant, et à proposer des pistes concrètes pour sa transformation en intrants agricoles utilisables de manière sûre et efficace.

Ce travail s'articule autour de plusieurs chapitres complémentaires : une revue de la littérature portant sur le dessalement, la composition de la saumure et les engrais minéraux ; une présentation du cadre expérimental et des méthodes d'analyse ; l'exposition et la discussion des résultats obtenus ; et enfin, une dernière partie consacrée au lancement d'une start-up de valorisation de la saumure en produits minéraux à forte valeur ajoutée, tout en réduisant l'impact environnemental et en favorisant une économie circulaire durable.

I.1 Définition de L'eau

Corps chimique très stable composé d'hydrogène et d'oxygène, de formule chimique H_2O . L'eau, solvant de première importance, peut exister sous forme de trois états physiques différents : solide, liquide et gazeux. L'eau pure est rare ; l'eau qui nous environne est en fait une solution d'eau, de différents sels minéraux et de divers autres éléments. Elle est à 65% du corps humain adulte. [10]

I.2 Importance de l'eau

L'eau est une ressource naturelle indispensable pour la survie de l'humanité et de toute espèce animale ou végétale sur terre et pour l'environnement d'une façon générale. Aucune substance liquide ne peut remplacer l'eau. Effectivement, elle a plusieurs particularités qui la rendent unique parmi les autres substances minérales. Dans sa phase liquide, elle a l'atout d'être un support des formes de vie. C'est le dissolvant des composants qui transporte les molécules clés et active les réactions chimiques. On parle aussi de l'eau en tant que molécule polaire disposant d'une terminaison positive (hydrogène) et d'une autre négative (oxygène). Ses atomes d'hydrogène ont la capacité de tendre des liaisons avec d'autres molécules. Aucun autre liquide ne peut former un réseau aussi souple et résistant et agir comme solvant à autant de substances acides ou basiques. [11]

I.3 Sources des eaux

Trois types de ressources naturelles sont utilisés par l'homme pour satisfaire ses propres besoins en eau et l'utiliser dans ses diverses activités industrielles et agricoles.

- Les eaux de surface telles que les rivières, les fleuves et les lacs.
- Les eaux de mer .

L'eau à l'état naturel (superficielle, souterraine ou saline) n'est jamais pure ; elle est un milieu vivant qui a des éléments très variés en contact avec les milieux qu'elle traverse et sur lesquels elle ruisselle.

I.4 Composition de l'eau de mer**I.4.1 Les éléments principaux**

Si la masse totale des sels dissous peut varier, le rapport des concentrations des différents éléments est stable. Les éléments principaux, c'est-à-dire ceux qui contribuent d'une façon notable à la masse de sels dissous dans les océans, représentent 11 éléments différents dont les concentrations sont mentionnées dans le tableau 1 [11].

Tableau I.1 Concentration des éléments principaux pour une eau de mer de salinité de 35% [12]

Eléments	Concentrations (mg/Kg)	Eléments	Concentrations (mg/Kg)
Chlorure	19353	Sodium	10160
Sulfate	2712	Magnésium	1249
Bicarbonate	142	Calcium	413
Bromure	67	Potassium	387
Fluorure	1	Strontium	8
Bore	4		

I.4.2 Autres éléments minéraux

L'eau de mer contient de nombreux autres éléments à des concentrations beaucoup plus faibles. Ces éléments, malgré leur faible concentration, ont une importance certaine dans des processus biologiques et organiques ; ils peuvent se trouver sous différentes formes (dissous, colloïdaux ou en suspension).

Tableau I.2. Concentrations des différents éléments ($\mu\text{g/l}$) rencontrés sous forme dissoute, colloïdale ou en suspension [13].

Elements	Concentrations en $\mu\text{g/l}$	Elements	Concentrations en $\mu\text{g/l}$
Li	170	Cu	3
Al	10	Zn	10
Si	3000	As	3
P	70	Rb	120
Ti	1	Mo	10
V	2	I	60
Mn	2	Ba	30
Fe	10	U	30
Ni	2		

Un litre d'eau de mer contient entre 30 à 40 g de sels alors que les matières en suspension représentent quelques dizaines de mg par litre [4].

I.4.3 Matières organiques

Les basses concentrations de matières organiques dans l'eau de mer rendent leur analyse chimique très compliquée. Les composés sont difficiles à isoler car dilués dans un milieu contenant beaucoup d'autres éléments à de plus fortes concentrations. Parmi les matières organiques dissoutes, on trouve des chlorophylles et caroténoïdes, de la vitamine B12, des monosaccharides, des amino-acides. Les matières organiques particulières sont principalement constituées d'animaux et végétaux du zooplancton et peuvent représenter 10 à 60% de la matière en suspension [13].

I.4.4 Gaz dissous de l'eau de mer

Les gaz dissous présents dans l'eau de mer sont l'azote (64%), l'oxygène (34%) et le dioxyde de carbone (1,8%). Les concentrations diminuent lorsque la température et la profondeur augmentent [14].

I.5 Histoire du dessalement

L'idée de fabriquer de l'eau pure à partir de l'eau de mer tourmente les populations assoiffées depuis des milliers d'années. La prémisse originale reposait sur l'idée que, par ébullition ou évaporation, l'eau pouvait être séparée du sel. Cette théorie constituait le fondement de la technologie des premières installations de dessalement à grande échelle qui apparurent dans les années 50 et 60, principalement au Moyen- Orient. Cependant, les technologies qui emploient la chaleur requièrent de grandes quantités d'énergie [15].

I.6 Définition de dessalement

Le dessalement consiste à extraire le sel et les minéraux présents dans l'eau de mer, l'eau saumâtre ou toute autre eau impropre à la consommation humaine et à l'irrigation. Face à la croissance démographique mondiale, aux effets du changement climatique et aux déficits hydriques croissants dans de nombreuses régions, cette technique s'est imposée comme une solution incontournable. Au-delà de la production d'eau potable, elle trouve également des applications dans le secteur industriel, notamment pour le refroidissement des installations ou l'irrigation des cultures. Plusieurs procédés existent à ce jour, chacun présentant ses propres atouts et limites ; les plus répandus restent l'osmose inverse, la distillation et l'électrodialyse.[16]

I.7 Dessalement dans le monde

Le dessalement de l'eau est en très forte croissance dans le monde. L'approvisionnement en eau potable sur le plan quantitatif et qualitatif s'impose de plus en plus, parallèlement aux risques de pollutions (vecteurs de maladies, toxines ou matières en suspension ou agents pathogènes) qui perdurent à chaque étape du parcours de l'eau.

Aujourd'hui, les usines de traitement concernent à 90% l'eau de mer et à 10% les eaux saumâtres (nappes souterraines salines). Près de 60 millions de m³ d'eau douce sont produites chaque jour par 17 000 installations réparties dans 120 pays, à partir des mers. Cela correspond à moins de 1% de l'eau consommée sur la planète mais au rythme actuel (doublement tous les 10 ans) elle pourrait atteindre plus de 125 millions de m³/j en 2027, soit 44 km³/an (contre 18 km³/an en 2008). Cela correspond aux 2/3 des besoins domestiques en eau des 450 millions de foyers qui seront sous le seuil minimum d'accès à l'eau en 2027 [17].

Avec plus de 17 000 unités installées sur la planète, qui représentent aujourd'hui environ 150 millions de m³/jour d'eau produite. En termes de potentialité de marché, la banque d'affaires Goldman Sachs parle de 5 milliards de dollars de chiffre d'affaires annuel, avec une progression attendue de 10 à 15 % par an [18].

En 2008, la FAO montre que la disponibilité géographique en eau douce est inégalement répartie dans le monde. Face à cette réalité, le dessalement de l'eau de mer est venu s'imposer pour pallier à ce déséquilibre. Les trois quarts issus de l'eau de mer et un quart des eaux saumâtres. Sur ces 40 millions, 75% sont destinés à la consommation humaine, 25% à un usage industriel ou agricole.

I.8 Dessalement et perspective de dessalement en Algérie

Pays d'Afrique du Nord au climat aride, l'Algérie souffre d'une pénurie d'eau structurelle liée à la raréfaction de ses ressources hydriques naturelles. Pour y faire face, elle a misé sur le dessalement de l'eau de mer comme levier stratégique de production d'eau douce.

Cette démarche a débuté dans les années 2000, en réponse à une sécheresse sévère qui avait frappé le pays. Dans un premier temps, des stations mobiles monoblocs ont été déployées en guise de solution d'urgence, avant de laisser place à des usines de grande envergure dotées de capacités de production importantes. Aujourd'hui, le dessalement répond principalement aux besoins en eau domestique et industrielle. Selon l'International Desalination Association, l'Algérie compte 25 usines opérationnelles, avec une capacité totale atteignant 2.6 millions de m³ par jour. La plus grande d'entre elles est implantée à Oran (Mactaa), avec une capacité de 500 000 m³ par jour.[16]

Sur le plan stratégique, le gouvernement algérien a fixé un objectif ambitieux : couvrir 60 % des besoins en eau potable grâce au dessalement d'ici 2030, traduisant ainsi sa volonté de faire de cette technologie un pilier durable de sa politique hydrique.

Toutefois, cette filière se heurte à d'importants défis. Le coût élevé du dessalement constitue un frein majeur, rendant l'accès à l'eau difficile pour les ménages les plus vulnérables. Par ailleurs, la forte consommation énergétique de ces installations soulève des préoccupations environnementales, notamment en matière d'émissions de gaz à effet de serre. [19]

Malgré ces contraintes, le dessalement s'est imposé comme un maillon essentiel de la sécurité hydrique de l'Algérie, et les investissements publics dans ce secteur continuent de croître afin de garantir un accès équitable à une eau potable de qualité. Les principales stations sont présentées dans le tableau ci-dessous :[20]

Tableau I.3 Les grandes stations en Algérie [21]

Station	Wilaya	Capacité (m³/jour)
Magtaa	Oran	500 000
Fouka 2	Tipaza	300 000
Cap Djinet 2	Boumerdès	300 000
KoudietEddraouche	El Tarf	300 000
Cap Blanc	Oran	300 000
Tighremt-Toudja	Béjaïa	300 000
El Hamma	Alger	200 000
Souk Tléta	Aïn Témouchent	200 000
Ténès	Chlef	200 000
Beni Saf	Aïn Témouchent	200 000
Mostaganem	Mostaganem	200 000
Fouka 1 (Douaouda)	Tipaza	120 000
Corso	Boumerdès	80 000
Arzew IWPP	Oran	90 000
Cap Djinet 1	Boumerdès	100 000

I.9 Les différentes technologies de dessalement

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.

Les deux principales technologies utilisées pour le dessalement sont : les technologies membranaires et la distillation thermique. [22,23,24]

I.9.1 Distillation thermique

I.9.1.1 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. [28]

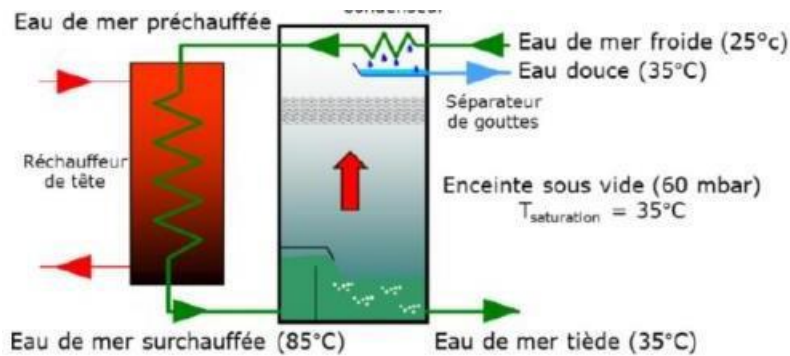


Figure I.1 Schéma de distillation éclair multiétage [27]

I.9.1.2 Multiple Effect Distillation (MED) (La distillation à effets multiples)

Comme le MSF, 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. [29,30]

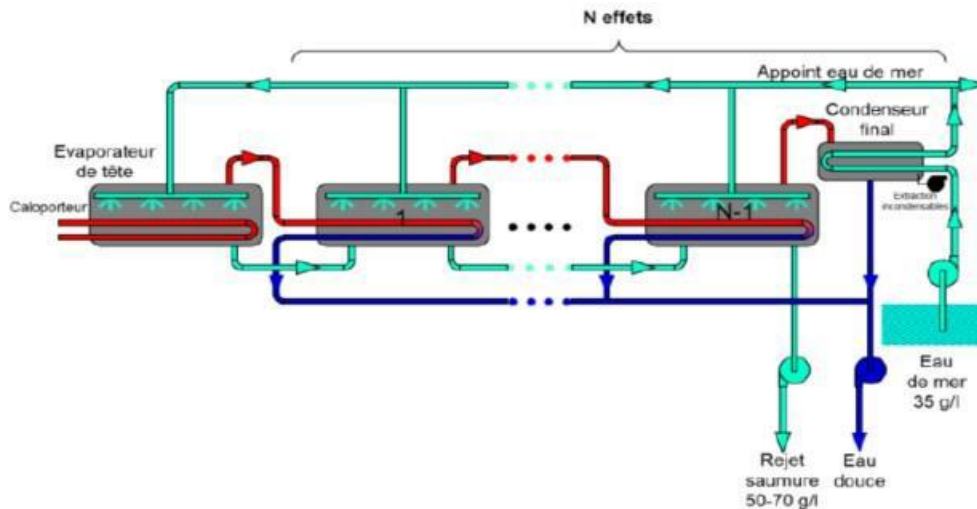


Figure I.2 Schéma de distillation à effets multiples

I.9.1.3 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.[30]

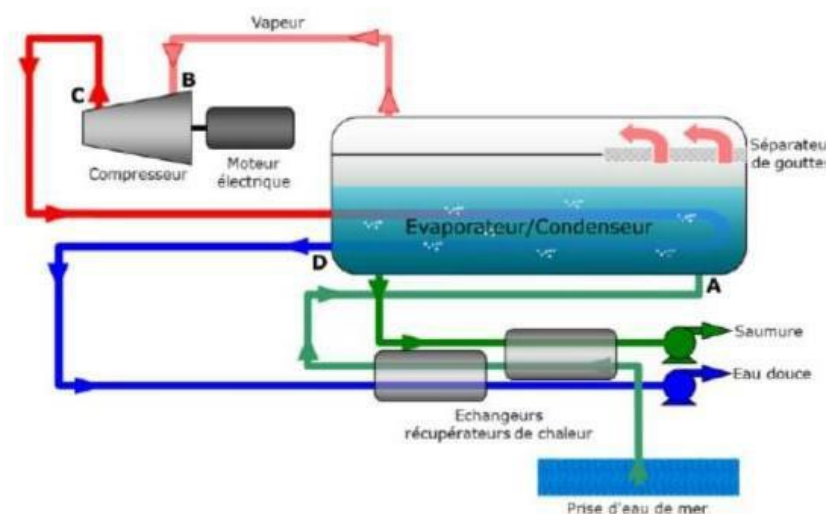


Figure I.3 Schéma de distillation par compression de vapeur

I.9.2 Les technologies membranaires**I.9.2.1 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.[31]

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 500mg/L.

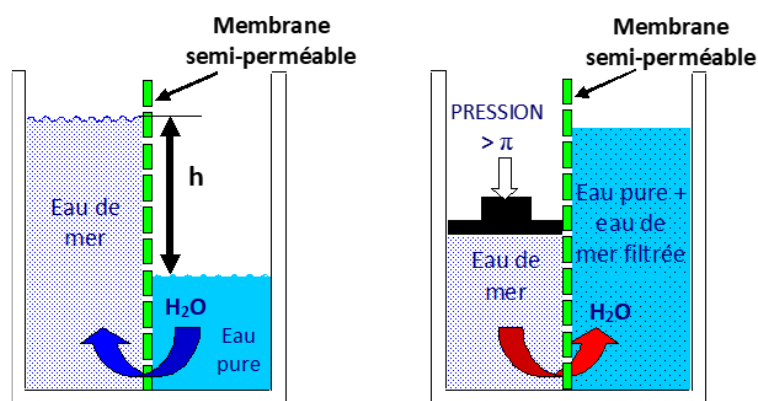


Figure I.4 Principe de l'osmose inverse [27]

I.9.2.1.1 Éléments constitutifs d'une unité d'osmose inverse :

Un système OI se compose des éléments de base suivants :

- Pré-traitement
- Pompes à haute pression
- Bloc membrane
- Post-traitement

Le dessalement nécessite au préalable un prétraitement de l'eau de mer pour éviter la sédimentation de matières en suspension sur les membranes, qui peut rapidement conduire à une réduction du débit résultant. Selon le type de module d'osmose inverse, il est crucial de réserver chaque particule d'une taille supérieure à 10 à 50 μm . Ceci est réalisé par une préfiltration grossière et une filtration sur sable pour éliminer les plus grosses matières en suspension, qui nécessitent ensuite une stérilisation et une acidification pour empêcher la croissance microbienne sur la membrane et éviter la précipitation des carbonates. Enfin, la filtration sur cartouche permet de restituer les particules d'une taille de plusieurs dizaines de μm qui n'étaient pas retenues par le filtre à sable.

La pompe haute pression permet l'injection de l'eau de mer dans le module d'osmose inverse dans lequel se trouvent les membranes. [30]

De plus, un autre phénomène se produit lors de l'osmose inverse : c'est la polarisation de concentration de la membrane. Effectivement, au fil du temps, la concentration de la solution salée augmente, car la plupart des molécules sont retenues d'un seul côté de la membrane. C'est pourquoi la pression osmotique augmente près de la couche limite, ce qui comporte des risques de précipitation des composés à faible produit de solubilité. Pour un même rendement, la pression à appliquer est donc plus élevée. Afin d'éviter ce phénomène, on procède à un balayage continu de la membrane du côté de la solution salée. Toute l'eau n'est pas filtrée, une partie sert à nettoyer la membrane. Ce processus est donc similaire à une filtration tangentielle. L'eau non filtrée est appelée retentât tandis que l'eau qui a traversé la membrane est appelée perméat. Afin de limiter la consommation d'énergie du procédé, on peut placer sur le circuit du retentât une turbine qui permet de récupérer une partie de l'énergie contenue dans ce fluide sous haute.

I.9.2.2 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.9.2.3 Electrodialyse

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). [32]

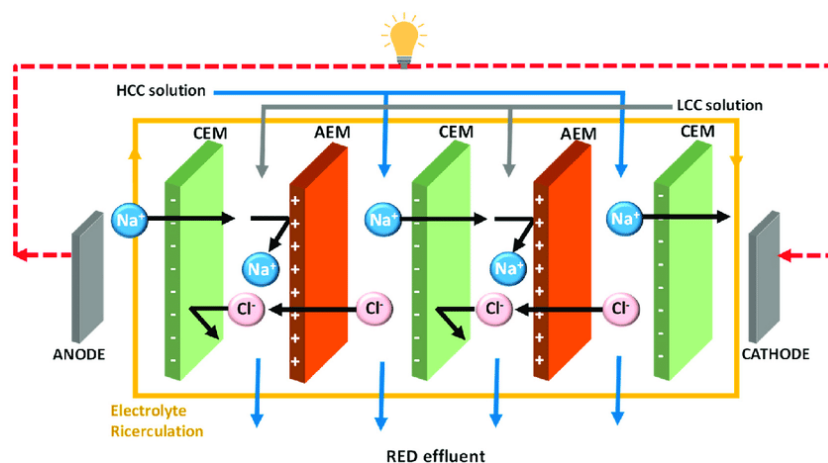


Figure I.5 Schéma de l'électrodialyse

I.10 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

économiques 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.11 Choix de procédé en Algérie

Il convient de souligner que le choix du procédé de dessalement diffère selon les pays, et repose essentiellement sur deux facteurs déterminants : l'énergie et les membranes.

Sur le plan énergétique, l'Algérie a eu recours à la distillation jusqu'au début des années 2000, une technologie particulièrement énergivore, affichant une consommation de l'ordre de 7 à 10 kWh/m³. L'osmose inverse semblait alors constituer une alternative plus économe, avec une consommation théorique de 3,5 à 5 kWh/m³. Toutefois, cette estimation ne prenait pas en compte les pertes énergétiques inhérentes au procédé. En effet, l'osmose inverse requiert des pompes à haute pression pour forcer le passage de l'eau à travers les membranes ; or, la pression résiduelle en sortie de membrane était, à l'origine, entièrement dissipée, ce qui portait la consommation réelle à un niveau comparable à celui de la distillation. C'est l'avènement des systèmes de récupération d'énergie de type PX qui a permis de concrétiser les gains attendus, ramenant effectivement la consommation de l'osmose inverse à 3,5 à 5 kWh/m³.

Concernant les membranes, leur efficacité dans l'élimination du sel et des impuretés n'est pas à remettre en cause. Néanmoins, leur utilisation implique une étape de prétraitement rigoureuse de l'eau de mer, comprenant la coagulation, la floculation et la filtration, afin d'éliminer les particules susceptibles de colmater les membranes. À cela s'ajoutent des contraintes d'entretien non négligeables : ces membranes, dont le coût est élevé, nécessitent des nettoyages réguliers à l'aide de produits chimiques spécifiques.

À ce jour, l'ensemble des stations de dessalement algériennes fonctionne selon le procédé d'osmose inverse, à l'exception d'une seule, qui recourt à la distillation flash multiétagée (MSF).

I.12. Gestion et valorisation de la saumure

I.12.1 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. [33]

I.12.2 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.[35]

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.

I.12.3 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 (MgCl_2) et du chlorure de calcium (CaCl_2). 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. [36]

I.12.4 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.[37]

I.12.5 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 antisalissures
- 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.[38]

I.12.6 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.[40]

I.12.6.1 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 :[41]

- 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 I.6 Rejet de saumure dans la mer

I.12.6.2 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. [43]

I.12.6.3 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.[44]

I.12.6.4 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.[45]

- 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 I.7 Bassin d'évaporation

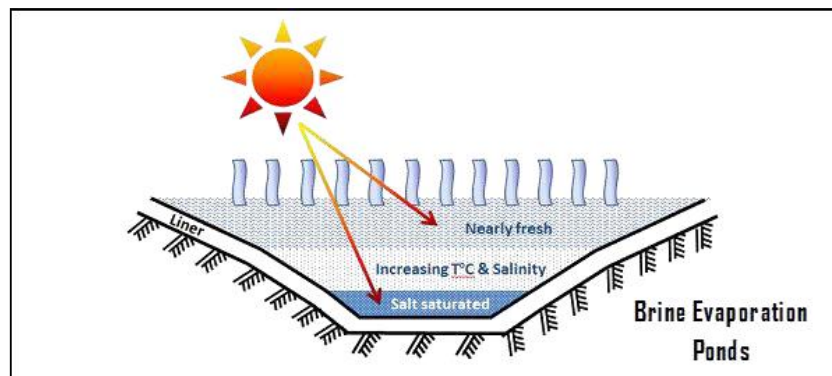


Figure I.8 Schéma de bassin d'évaporation

I.12.6.5 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.

I.12.6.6 Rejet sans liquide (Zero Liquid Discharge ZLD)

Le rejet nul de liquide (ZLD) est un procédé de traitement visant à éliminer tout rejet liquide d'une station de dessalement en traitant et réutilisant l'intégralité de la saumure produite. Les technologies utilisées incluent :

- **Technologies classiques** : concentrateurs de saumure et cristalliseurs par évaporation thermique, produisant de l'eau purifiée et des solides récupérables.
- **Technologies émergentes** : osmose directe, électrodialyse/inversion d'électrodialyse et distillation sur membrane, utilisées en combinaison pour réduire les coûts et améliorer l'efficacité. [45,46]

Malgré un coût élevé et une complexité de mise en œuvre, le ZLD offre des avantages considérables :

Tableau I.4 Avantages et défis de ZLD

Avantages	Défis
Réduction de l'impact environnemental	Équipements spécialisés coûteux
Minimisation de la consommation d'eau douce	Gestion complexe du procédé
Réutilisation optimale des ressources	Investissement initial important
Solution efficace en zones de pénurie d'eau	—

Le ZLD représente ainsi une approche prometteuse pour une gestion durable et responsable de la saumure issue du dessalement.

I.12.6.6.1 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 mises 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. [38]

I.12.6.6.2 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.[38]

I.12.7 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.[42]

- 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.

I.12.8 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.

I.12.8.1 Osmose directe

L'osmose directe est un procédé de séparation membranaire qui exploite la différence de pression osmotique naturelle (plutôt qu'une pression hydraulique comme en osmose inverse) pour extraire l'eau de la saumure de dessalement. Une solution concentrée dite "d'aspiration" ou "d'extraction" (à base de NaCl, MgCl₂, sucres ou autres composés organiques) est placée d'un côté de la membrane semi-perméable, créant un gradient qui attire les molécules d'eau depuis la saumure vers cette solution, permettant ainsi la récupération d'énergie ou d'autres ressources précieuses.

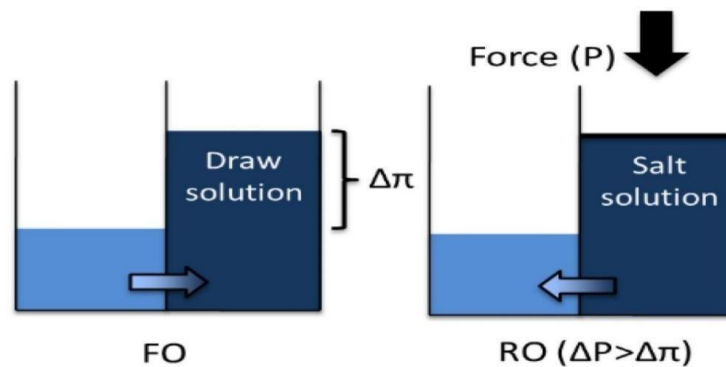


Figure I.9 Schéma d'osmose direct

I.12.8.2 Electrodialyse

L'électrodialyse est une technique de récupération de la saumure qui sépare efficacement les ions (cations : Na⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ et anions : chlorures, sulfates, nitrates) à travers une membrane, réduisant ainsi la teneur en sel de l'eau restante pour la réutiliser. Les minéraux extraits peuvent être valorisés dans des applications industrielles ou comme

matières premières chimiques. Comparée à l'évaporation thermique, cette méthode est plus économe en énergie, bien qu'elle reste limitée aux eaux de faible à moyenne salinité et moins performante pour les saumures très concentrées.

I.12.9 Récupération des minéraux dans la saumure

La récupération des minéraux issus des saumures de dessalement représente une approche durable permettant à la fois de réduire l'impact environnemental, de générer des revenus et de limiter la dépendance aux ressources non renouvelables. Plusieurs minéraux valorisables peuvent en être extraits :

Tableau I.5 Principales applications des minéraux issus des saumures

Minéral	Principales applications
NaCl	Sel de table, production de chlore et soude caustique
Magnésium (Mg)	Alliages, engrais, pharmaceutique
Calcium (Ca)	Ciment, acier, produits industriels
Potassium (K)	Engrais agricoles
Lithium (Li)	Batteries, électronique
Bore (B)	Verre borosilicaté, retardateurs de flamme
Strontium (Sr)	Aimants en ferrite, industrie
Brome (Br)	Retardateurs de flamme, agrochimie, pharmaceutique
Césium, Uranium, Azote	Présents en faibles concentrations

Toutefois, ce processus reste complexe et dépend de plusieurs facteurs : le type de dessalement, la concentration des minéraux dans la saumure et la faisabilité économique de leur extraction.

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

I.12.10 Impact environnemental du rejet de saumure en mer

Bien que le dessalement soit une solution efficace pour pallier le manque d'eau douce, il génère d'importantes quantités de saumure dont la gestion reste problématique. Malgré l'existence de plusieurs méthodes de traitement, leurs limites en termes de coût et d'efficacité poussent la majorité des pays à opter pour le rejet direct en mer, une pratique qui soulève néanmoins de sérieuses inquiétudes quant à ses impacts sur les écosystèmes marins.[38]

I.12.10.1 Rejet direct dans la mer

Le rejet de saumure en mer via des émissaires est la solution la plus couramment adoptée par les stations de dessalement côtières, en raison de sa rentabilité et de la capacité naturelle de la mer à diluer les concentrés. Pour minimiser l'impact sur les zones de forte salinité, deux approches sont utilisées : exploiter le mélange naturel par les vagues, ou installer des diffuseurs au-delà de la zone de marée. Cependant, ce rejet peut altérer la salinité, la température et la vie marine, ce qui impose une surveillance rigoureuse et encourage le développement de solutions alternatives telles que la réutilisation ou la valorisation industrielle de la saumure. [38]



Figure I.10 Diffuseur de rejet de saumure

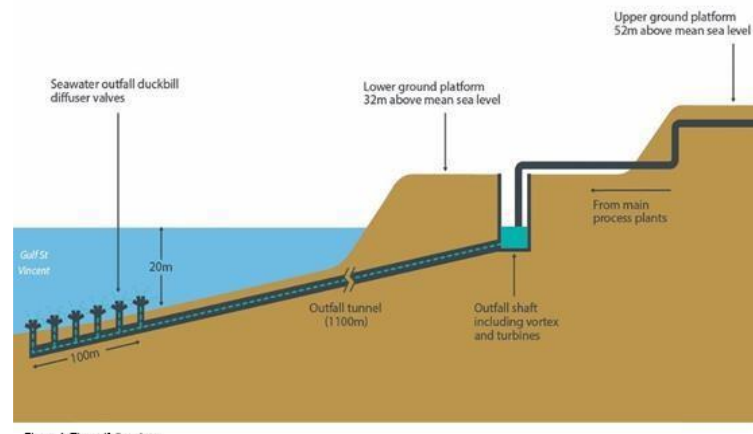


Figure 4. The outfall system

Figure I.11 Système de décharge

I.12.10.2 Le rejet direct dans la mer en Algérie

L'Algérie dispose de 25 stations de dessalement, toutes situées sur la côte méditerranéenne, qui rejettent leur saumure en mer. La comparaison entre les stations de Beni Saf et Mostaganem, toutes deux d'une capacité de 200 000 m³/jour avec un rejet de saumure d'environ 220 000 m³/jour à 68 g/l, illustre clairement l'importance du système d'évacuation :

- **Beni Saf** rejette via une simple sortie de 1,8 m de diamètre, entraînant une salinité de fond atteignant **62,8 g/l** et une perturbation s'étendant sur plus de **1,5 km** autour du point de rejet.
- **Mostaganem** est équipée d'un émissaire avec **50 diffuseurs**, limitant la salinité maximale à **39,8 g/l** avec un impact réduit à seulement **200 m**.

Cette différence significative démontre que l'utilisation de diffuseurs permet un meilleur mélange de la saumure avec l'eau de mer, assurant une dilution bien plus acceptable et réduisant considérablement l'impact environnemental sur l'écosystème marin.

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.

I.12.11 Les effets de décharge de saumure dans le champ proche et lointain

Le rejet de saumure en mer, méthode courante d'élimination des déchets de dessalement, peut engendrer deux problèmes majeurs : une pollution environnementale et un risque de recirculation affectant l'eau d'alimentation. Son impact s'analyse à travers deux zones distinctes :

- **Champ proche** : zone directement autour du point de rejet, où la conception du système de décharge joue un rôle crucial dans l'augmentation du taux de dilution.
- **Champ lointain** : zone éloignée du point de rejet, où la saumure, plus dense, s'écoule vers le fond marin par gravité.

Une gestion rigoureuse de ces deux zones est donc indispensable pour limiter l'impact négatif de la saumure sur les écosystèmes marins.

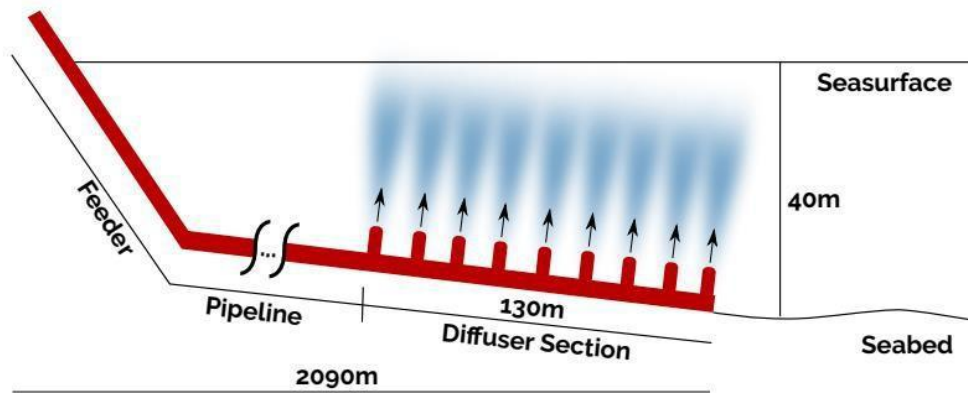


Figure I.12 Schéma des émissaires marins.

I.12.12 Le défi de la salinité élevée : Conséquences du rejet de saumure dans les écosystèmes marins

Le rejet de saumure en mer engendre une salinité élevée qui provoque un stress osmotique chez les organismes marins, affectant leur croissance, leur reproduction et leur survie. Les trois principales régions concernées tel que la mer dans le golfe arabe, la mer Rouge et la mer Méditerranée présentent déjà des TDS naturellement élevés par rapport à l'eau de mer typique d'environ 34,5 g/l, 45, 41 g/l et 38,6 respectivement.

La Méditerranée abrite notamment la Posidonie, une plante marine emblématique formant de vastes prairies sous-marines essentielles à l'écosystème, dont la vitalité est altérée dès 38,4 g/l et la structure à partir de 39,1 g/l, des seuils facilement atteints par les rejets de saumure.

Face à ces constats, le rejet direct en mer s'avère être une solution inadaptée et dangereuse pour les écosystèmes aquatiques et pour les stations elles-mêmes. Une approche combinant analyse environnementale et technique est indispensable pour développer des alternatives viables, parmi lesquelles la dilution préalable de la saumure avec de l'eau de mer est proposée comme solution prometteuse pour atténuer ces impacts négatifs.

II.1 Introduction

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

Le Complexe KAHRAMA est justement inscrit dans l'ambitieux programme national de Dessalement d'Eau de Mer », qui est composé de quinze projets. Totalisant une capacité approximative de 2 500 000 m³/jour, ces projets placent l'Algérie, à l'horizon 2011 – 2012, parmi les pays ayant des capacités les plus importantes au monde.

Le Complexe KAHRAMA étant le 1er à être réalisé, nous nous sommes permis de le nommer "Complexe Pionnier du Dessalement d'Eau de Mer en Algérie"

II.2 Historique de création de la société

KAHRAMA SPA est une entreprise par action de droit algérien détenue à 95 % par Algérien Energy Company (AEC) et à 05 % par John Burrow Ltd (Afrique de sud).

Elle est créée le 22/01/2002 avec une capitale sociale de 4000 000,00 U\$ (équivalent à 316 200 000 ,00DA). Ses activités principalement la production et la commercialisation de ses produits stratégiques et sensibles ; l'eau et l'électricité aux deux clients unique SONATRACH et SONEGAS.

Un contrat O&M (Exploitation et Maintenance) a été signé le 27.10.2004 pour une durée de 24 ans, durée pendant laquelle l'Exploitant devra exploiter, assurer la maintenance et réparer le complexe et exécuter ses obligations au titre de ce contrat conformément aux normes et exigences qui y sont stipulées.

Le 24.06.2005 un avenant a été signé, à demande de KAHRAMA, pour réduire la durée de 12 à 24 ans. Le complexe KAHRAMA de production d'eau dessalée et d'électricité a été conçu par la société japonaise IHI.[46]

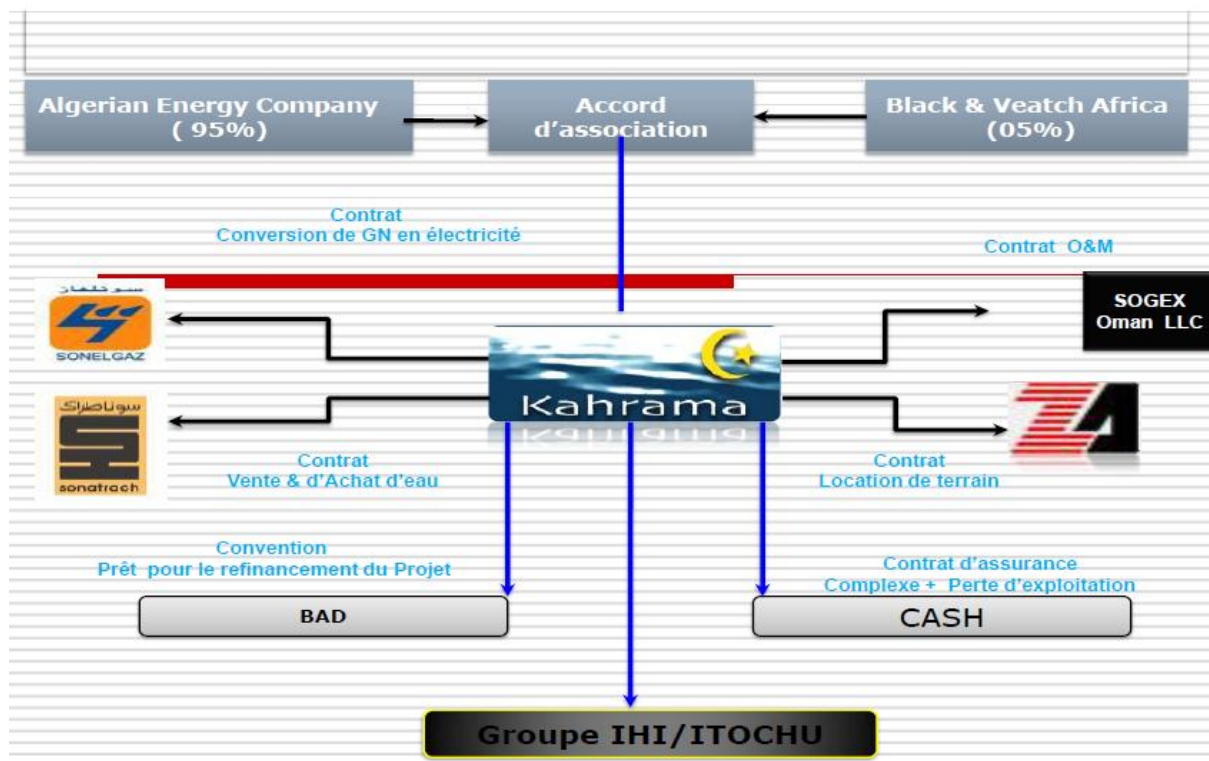


Figure II.1 Complexe KAHRAMA

II.3 Situation biogéographique

Le Complexe KAHRAMA est implanté dans la Zone Industrielle d'Arzew à proximité du port industriel de Béthioua, à 40Km de la ville d'Oran. Il s'étend sur une superficie de 12,5 hectares et est délimité par:[47]

- Le Complexe GL2/Z à l'Ouest,
- Le site du Projet GNL3 à l'Est,
- La mer méditerranée au Nord,
- La route nationale N°11 au Sud.

-L'eau produite (86.880 m³/j) est vendue à Sonatrach pour être livrée à:

A.D.E:66.880m³/j et UDE(DRIA):20.000 m³/j

- L'électricité produite (321MWH) est vendue à SONELGAZ via le poste de réception 220KV de Hassi Aneur.

- Effectif total : 19

- Exploitant SOGEX : Effectif total contractuel : 116 et Effectif total actuel : 127
- Elle est composée de trois directions
 - La Direction de la production ;
 - La Direction de la maintenance ;
 - La Direction de l'administration et des finances



Figure II.2 Le complexe KAHRAMA.

II.4 Principales installations du complexe de dessalement

Le complexe produit et fournit de l'eau potable, de l'eau de process et de l'électricité. Il est composé des unités suivantes :

- Unité de prise d'eau de mer
- 03 unités de dessalement
- Unité de potabilisation et stockage d'eau potable et d'eau de process,
- 03 groupes turbo générateurs,
- Sous-station électrique
- Les utilités : chaudières, système de gaz naturel, système d'eau de refroidissement, système d'eau de refroidissement, système d'air de servie et air d'instrument.

L'usine de dessalement et centrale électrique d'Arzew est un complexe qui produit et fournit l'eau douce et l'électricité. Elle comprend un système de surveillance, de contrôle et de traitement des sous-produits tels que les eaux usées, la saumure condensée et le gaz

d'échappement afin que l'environnement puisse être maintenu aux conditions acceptables [46] (Tableau II.1).

Tableau II.1 Valeurs de contrôle Environnemental

Centrale électrique	
NOx	50 mg/Nm ³ à 15% O ₂
CO	25 mg/Nm ³ à 15% O ₂
Ensemble de l'usine et système commun	
Niveau sonore	55 dB (A) sur la route de la zone industrielle d'Arzew, à la limite sud du site
Eaux usées (pH)	5,5 à 8,5

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

- Système de la Centrale Electrique qui consiste en production d'électricité,
- Système de Dessalement qui consiste en production d'eau douce,
- D'autres systèmes : fourniture des utilités, le système de vapeur d'eau, etc. Le procédé de dessalement demande la fourniture de vapeur d'eau produite par les turbines à gaz et les chaudières (HRSG).

II.5 Description du procédé de dessalement (MSF) KAHRAMA/Oran

Le système de prise d'eau de mer comprend les systèmes suivants :

- Système de filtrage d'eau de mer
- Système de pompage d'eau de mer
- Système de pompes d'eau de mer d'incendie
- Système d'électro chloration d'eau de mer

L'eau de mer filtrée et chlorée est fournie aux trois (03) unités de dessalement et aux autres. L'eau de mer et la saumure provenant des unités de dessalement et des autres ainsi que l'eau de mer sont déchargées à la mer à travers le système d'émissaire de rejet. [46]

II.5.1 Objet de système

Système de prise d'eau de mer fournit l'eau de mer filtrée et chlorée à :

- Unités de dessalement
- Système d'eau de refroidissement
- Système d'eau d'incendie
- Système d'électro chloration

Le système d'émissaire de rejet décharge l'eau de mer, la saumure et les effluents à la mer, provenant de :

- Unités de dessalement
- Système d'eau de refroidissement
- Système d'égout d'eaux générales
- Système d'égout d'eau huileuse (eau sans huile)
- Système d'égout d'eau chimique (eau neutralisée)

II.5.2 Description de système**a- Système de filtrage d'eau de mer**

Le système de filtrage d'eau de mer est composé de deux (02) lignes de grillage ; chaque ligne est pourvue d'un crible à grosses mailles pour la canalisation de prise d'eau de mer, des batardeaux, d'un mécanisme de dégrilleur et d'un filtre à chaîne.

Chaque dégrilleur est composé d'une grille à barreaux et d'un mécanisme de dégrilleur équipé d'un système indépendant de détecteur de perte de hauteur.

Le filtre à chaîne est composé d'une bande de panneaux de tamisage suspendu au niveau de deck sur un arbre entraîné et équipé d'un dispositif indépendant de mesure de perte de hauteur.

Le système d'eau de lavage est composé de deux pompes (2X100%) ; chacune est dimensionnée pour envoyer l'eau à deux filtres à chaîne simultanément. L'opération est commandée en mode "LOCAL" par le tableau de commande local et les boîtes de commande, ou en mode "A DISTANCE" par DCS. [47]

b- Système de pompage d'eau de mer

Le système de pompage d'eau de mer est composé des pompes suivantes :

- 04 pompes alimentaires d'eau de mer (l'une est en réserve avec capacité 100%)
- 02 pompes d'eau de mer de refroidissement (l'une est en réserve avec capacité est 100%)

Les pompes alimentaires d'eau de mer fournissent l'eau de mer aux unités de dessalement comme eau de refroidissement.

La pompe d'eau de mer de refroidissement fournit l'eau de mer au refroidisseur d'eau de mer de refroidissement.

L'eau de mer venant des unités de dessalement et du refroidisseur d'eau de mer de refroidissement est retournée à la mer à travers le ponceau de rejet.[47]

c- Système de pompes d'eau de mer d'incendie

Le système d'eau de mer d'incendie est composé de :

- 01 pompe d'eau de mer d'incendie (entraînée par moteur électrique)
- 01 pompe d'eau de mer d'incendie (entraînée par moteur diesel)

Les deux pompes (entraînées par moteur électrique et diesel respectivement) démarrent automatiquement et séquentiellement lors que la pression du réseau d'incendie chute au-dessous de valeur de consigne. Les temporisateurs séquentiels réglés à l'intervalle de 5 à 10 secondes sont prévus dans chaque contrôleur pour empêcher le démarrage simultané des deux pompes.

d- Système électro chloration d'eau de mer

Le système électro chloration d'eau de mer utilise l'eau de mer comme matière première pour produire l'hypochlorite de sodium (NaCl) pour empêcher la croissance biologique et le tartrage dans l'eau de mer.

L'eau de mer, comme alimentation d'hypochlorite de sodium, est pris dans ce système à partir de la pompe d'eau de mer de refroidissement.

L'eau de mer est filtrée pour enlever des solides suspendus et composé organique par le filtre d'eau de mer automatique ou manuel, et puis introduite dans l'électrolyseur qui produit l'hypochlorite de sodium.

L'électrolyseur est conçu pour produire l'hypochlorite sur la base suivante :

1. Eau de mer à traiter : **41700 t/h (40723 m³/h)**
2. Concentration maximale de solution d'hypochlorite : **2000 ppm**
3. Taux de dosage continu : **2,0 ppm**
4. Taux de dosage par impact : **3,5 ppm (pour 10 min, chaque 4 heures)**

Les produits d'électrolyse sont essentiellement l'hypochlorite de sodium (NaCl) et le gaz hydrogène (H₂). La solution d'hypochlorite de sodium contenant l'hydrogène est transférée au réservoir dégazeur de stockage d'hypochlorite. Le gaz hydrogène, dégagé de la solution dans le réservoir, est dilué au mélange inférieur à 1% par la soufflante d'air, et le mélange air/gaz dilué est dégagé de manière sûre dans l'atmosphère à partir du sommet du réservoir.

La solution d'hypochlorite dans le réservoir est pompée par la pompe d'injection d'hypochlorite, et fournie à la canalisation de prise d'eau de mer en amont du système de filtrage d'eau de mer.

Après certain temps d'opération, quelques dépôts composés d'hydroxyde et carbonates causés par la dureté d'eau de mer, sont formés à l'intérieur de l'électrolyseur notamment sur les cathodes. Ces dépôts sont enlevés par leur dissolution dans une solution diluée d'acide chlorhydrique. L'unité de nettoyage par acide est prévue pour le nettoyage périodique. [47]

e- Système d'émissaire de rejet

L'eau de mer déchargée et la saumure évacuée des unités de dessalement ainsi que l'eau de mer de refroidissement du refroidisseur d'eau de mer de refroidissement sont retournées à la mer à travers le ponceau d'émissaire de rejet.

Les eaux suivantes sont également déchargées dans le ponceau d'émissaire de rejet :

1. Eaux générales d'égout
2. Eau sans huile du système d'eau huileuse
3. Eau neutralisée du système d'eau chimique

Le chlore résidu dans les effluents d'eau de mer venant du refroidisseur d'eau de refroidissement et dans le ponceau d'émissaire de rejet est surveillé pour le contrôle d'émission.

Après l'étape de chloration et de filtration primaire, l'eau de mer est acheminée vers l'unité MSF via des pompes d'alimentation à haute performance.

f- Système de dessalement

Système de dessalement consiste en 03 unités identiques de dessalement, et les systèmes communs qui comportent le système de nettoyage par acide, les filtres.

g- Objet de système

Chaque unité de dessalement produit l'eau distillée à taux de 29.629 m³/jour avec la qualité de 5ppm TDS en moyenne. La plupart d'eau produite est traitée pour être potable, et le reste d'eau non-traitée est utilisé pour l'eau d'appoint de chaudière et d'autres utilisations.

h- Description de système - *Principe de dessalement par "détente (Flash)"*

Un liquide à sa propre température de saturation à une température donnée, et cette température descend au fur et à mesure que la pression baisse. Le liquide sous condition de saturation contient la quantité maximum d'énergie calorifique et bout se vaporise, soit lorsque la chaleur additionnelle est fournie, soit que la pression est réduite.

Lorsqu'un liquide à la température de saturation est introduit dans une chambre non chauffée où la pression est maintenue plus bas que celle de saturation du liquide, ce dernier bout et se vaporise immédiatement. Ce phénomène est appelé "évaporation par détente". Autrement dit, il produit le distillat à haute pureté en condensant la vapeur détendue. L'usine de dessalement utilise ce principe pour produire le distillat à partir de L'eau de mer. Pour

mettre en œuvre ce phénomène au maximum, l'évaporateur à détente de multi-étage (Multi-Stage Flash) est divisé en un certain nombre d'étages dont chacun est à pression successivement plus basse. Ces pressions respectives sont maintenues par le système de vide. [47]

L'unité de dessalement se compose des composantes et systèmes suivants :

- 1. Evaporateur :** L'évaporateur est construit comme échangeur de chaleur horizontal à calandre et faisceau tubulaire en une seule passe avec la vapeur se condensant au côté calandre et la saumure se véhiculant à l'intérieur du faisceau tubulaire. Les premiers 14 étages constituent la section de récupération de chaleur (HRC), tandis que les derniers 03 étages constituent la section de rejet de chaleur (HRJ). La boîte d'eau en avant et en arrière de chaque étage de l'évaporateur dirige l'écoulement vers le faisceau tubulaire.
- 2. Réchauffeur de saumure :** Le réchauffeur de saumure est prévu pour réchauffer la saumure recyclée. C'est un échangeur de chaleur horizontal à calandre et faisceau tubulaire en une seule passe avec la vapeur se condensant au côté calandre et la saumure se véhiculant à l'intérieur du faisceau tubulaire.
- 3. Dégazeur :** Le dégazeur enlève l'air dissous de l'eau d'appoint avant que ce dernier entre dans l'évaporateur. Le dégazeur minimise la possibilité de corrosion des composantes de l'évaporateur, surtout la calandre d'évaporateur, en dégazant la teneur en oxygène dans l'eau d'appoint.
- 4. Système de vide :** Le système de vide est utilisé pour maintenir le système évaporateur aux conditions de vide en aspirant les gaz non-condensables générés de l'eau d'appoint ou de la saumure. Le système de vide aspire également l'air fuit dans le système évaporateur des environs atmosphériques. Le système de vide se compose de 02 éjecteurs de vapeur d'eau, du pré condenseur, du condenseur de premier étage et du condenseur de second étage. L'éjecteur de vapeur hogging est utilisé pour évacuer le système évaporateur durant le démarrage.
- 5. Pompes :** Les pompes jouent un rôle majeur dans l'usine de dessalement. Les pompes suivantes sont installées dans chaque unité de dessalement.[48]

II.5.3 Système de récupération de gaz CO₂

Les gaz non-condensables (NCG) générés dans l'unité de dessalement sont utilisés pour être injectés dans le distillat au système de traitement d'eau. Le système de récupération de gaz CO₂ est prévu pour récupérer ce gaz non condensable (NCG), et envoyer ce dernier dans les filtres de charbon activé pour être désodorisé.

II.5.4Système commun

II.5.4.1 Composant du système

1. Filtre à charbon actif

Les gaz non-condensables provenant de l'évaporateur sont récupérés par le système de récupération de CO₂ de chaque unité de dessalement. Les filtres à charbon actif sont utilisés pour désodoriser les gaz non-condensables provenant des unités de dessalement.

2. Système de traitement d'eau dessalée

Ce système a pour l'objet d'ajouter la dureté et de neutraliser l'eau distillée provenant des unités de dessalement comme suit :

- Alcalinité : 35 à 65 ppm as CaCO₃
- Dureté totale : 50 à 60 ppm as CaCO₃
- pH : 8.0 à 8.5
- Saturation Langelier : 0.0 à 0.4

II.5.4.2 Description de système :[48]

❖ Filtre à charbon activé

Deux (2 *100%) filtres à charbon actif sont installés au collecteur de gaz d'évent situé près de pipe-rack nord au côté nord-est de l'unité-3 de dessalement. Le gaz passant par le filtre à charbon actif est envoyé ver le système de traitement d'eau dessalée.

❖ Système de traitement d'eau dessalée

Le système de traitement d'eau dessalée est divisé, du point de vue de procédé, en des systèmes principaux suivants :

- Système d'absorption de dioxyde de carbone
- Dissolution de calcaire, dégazage, lavage par inversion du courant, soufflage à l'air
- Système de traitement chimique.

En particulier, les points les plus remarquables dans le schéma de procédé sont récapitulés comme suit :

- Addition de dureté par dissolution de calcaire dans l'eau distillée acidifiée par dioxyde de carbone pour former le bicarbonate de calcium.
- Enlèvement de CO_2 (par le dégazeur) et neutralisation finale (par la soude caustique) afin d'enlever l'excès de CO_2 après les dégazeurs et d'obtenir pH et LSI requis.
- Pour optimiser les exigences de mélange d'eau potable, le système est conçu en mode by-pass, si bien qu'une seule partie de distillat est amenée à l'absorbeur de CO_2 et aux filtres de calcaire avec le mélange final dans le mélangeur statique avec l'eau non-traitée pour atteindre l'alcalinité requise.
- Système d'injection d'hypochlorite pour obtenir l'eau exempte de bactérie.

La capacité totale conçue de traitement est $3705 \text{ m}^3/\text{h}$ d'eau distillée de l'usine de dessalement. Ce système peut être contrôlé dans une portée de 375 à $3705 \text{ m}^3/\text{h}$. Dans la portée de 926 à $3705 \text{ m}^3/\text{h}$, l'ensemble de système est en mode d'exploitation automatique, tandis que dans la portée de 375 à $926 \text{ m}^3/\text{h}$, il se trouve en mode d'exploitation manuelle. [47]

- Compresseur d'air pour permettre l'arrêt total de l'usine en toute sécurité
- Source : Eau Potable
- Stockage : Bac d'Eau Potable 25.000 m^3
- Pompage : Pompes de Distribution d'Eau Potable ($3 \times 50\%$)
- Destinations : Camion-citerne, Bac d'Eau de Service, Réseau Incendie, EPEOR, Complexes SH, Eau de Refroidissement de Secours.

II.6 Techniques et Méthodes de Traitement à la Centrale KAHRAMA

La centrale de KAHRAMA opère dans un environnement complexe dû au traitement d'une eau de mer à forte salinité et à haute température. Ces conditions critiques engendrent deux phénomènes techniques interdépendants qui impactent directement la durée de vie des équipements et le rendement de production : l'entartrage et la corrosion. [46]

II.6.1 Le Phénomène d'Entartrage

Ce phénomène résulte du dépôt de sels minéraux sur les parois internes des tubes d'échangeurs thermiques lorsque leur seuil de solubilité est dépassé sous l'effet de la chaleur.

II.6.1.1 Types de tartre à KAHRAMA

- **Tartre alcalin** : Composé de carbonate de calcium (CaCO_3) et d'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). Il se forme suite à la décomposition des bicarbonates.
- **Tartre non-alcalin** : Principalement le sulfate de calcium (CaSO_4). C'est le type le plus dangereux car il est très difficile à éliminer et se forme à des températures dépassant 115°C . [46]

II.6.1.2 Facteurs influents

Élévation excessive de la température (notamment dans le réchauffeur de saumure – BrineHeater). Augmentation de la concentration saline dans la saumure recyclée. Fluctuations du potentiel hydrogène (pH).

II.6.2 Le Phénomène de Corrosion

La corrosion est la détérioration chimique ou électrochimique des métaux (cuivre, nickel, acier) résultant de leur interaction avec le milieu marin agressif.

II.7 Principales causes au sein de la centrale

- **Oxygène dissous (O_2)** : Le principal catalyseur de la corrosion par piqûres (Pitting).
- **Dioxyde de carbone (CO_2)** : Sa dissolution forme de l'acide carbonique, abaissant le pH et augmentant l'acidité, ce qui attaque les surfaces métalliques.

- **Érosion-Corrosion** : La vitesse élevée du flux détruit la couche protectrice naturelle du métal.

II.8 Relation d'interdépendance (Corrosion sous dépôt)

Les dépôts de tartre irréguliers créent des cellules de concentration électrochimique, provoquant une "corrosion sous dépôt". Cela se manifeste par des perforations localisées dans les zones recouvertes de tartre.

II.9 Stratégies de Lutte et de Contrôle à KAHRAMA

La centrale adopte un système intégré combinant des solutions chimiques, mécaniques et structurelles :

A- Traitement chimique continu (Injection)

- **Antitartre (BELGARD EV2030)** : pour modifier la structure cristalline et empêcher l'adhérence.
- **Anti-mousse (Belite M8)** : pour stabiliser les niveaux de liquide et éviter l'entraînement des sels vers les turbines.

B- Traitement mécanique (Système Taprogge)

Utilisation de 600 balles en caoutchouc (300 bleues et 300 rouges) de densités différentes pour un nettoyage continu des tubes, évitant ainsi l'accumulation de dépôts initiateurs de corrosion.

C- Solutions structurelles (Matériaux et Revêtements)

Utilisation d'alliages Cupro-Nickel et de Titane pour les zones critiques. Utilisation d'acier inoxydable 316L pour les circuits d'eau distillée. Application de revêtements Epoxy pour isoler les métaux non résistants.

D- Dégazage (Degassing)

Le dégazeur constitue la première ligne de défense en éliminant l'oxygène et le CO₂ avant l'entrée de l'eau dans les étapes de dessalement.

II.10 Maintenance Annuelle Globale (Grand Arrêt)

La centrale subit un cycle de maintenance de 45 jours (15 jours par unité), comprenant :

- **Réduction de charge** : Arrêt progressif des turbines et tests de performance.
Nettoyage chimique : Injection d'acide pour dissoudre les dépôts calcaires tenaces.
- **Démontage et Inspection** : Ouverture des évaporateurs et inspection des composants majeurs (chaudières).
- **Nettoyage des filtres** : Extraction des filtres colmatés.
- **Nettoyage dans deux bacs** : un bain d'acide pour la dissolution et un bain d'eau distillée pour le rinçage final.
- **Lavage haute pression** : Utilisation de pompes HP pour décolmater les canaux d'écoulement.

II.11 Sécurité HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement) [47]

II.11.1 Sécurité sur site industriel

La sécurité est régie par la prévention des risques thermiques (surfaces brûlantes), chimiques (acides) et mécaniques.

- **EPI obligatoires** : Casque, chaussures de sécurité, gilet haute visibilité, protections auditives et lunettes de protection.
- **Consignation** : Procédure obligatoire de condamnation avant toute intervention sur les équipements (ex : demisteurs).

II.11.2 Sécurité en laboratoire

- **Bonnes Pratiques de Laboratoire** : Manipulation des acides sous hotte (toujours verser l'acide dans l'eau), étiquetage rigoureux des réactifs (EDTA, NaOH) et stockage séparé des produits incompatibles.
- **Protections spécifiques** : Port de la blouse boutonnée, gants en nitrile et utilisation systématique de poires d'aspiration (pro pipettes).

II.11.3 Gestion des déchets et environnement

Le volet environnemental assure la neutralisation des solutions acides avant évacuation et le confinement des échantillons de saumure et résidus de titrage dans des bidons de récupération spécifiques.

II.12 Zone de stockage et distribution d'eau produite

L'eau potable produite est envoyée au bac de stockage d'eau potable, d'une capacité de stockage de 25000m³, pour sa distribution aux clients et équipements suivants : DRIZ, SEOR et Utilisation interne pour les systèmes d'eau incendie, d'eau de service et d'eau de refroidissement de secours pour compresseur d'air. Une partie de l'eau dessalée produite est envoyée vers le bac de stockage d'eau de process, d'une capacité de stockage de 25000m³, pour sa distribution aux clients (DRIZ, GRTE ...) et son utilisation en interne (système de traitement d'eau dessalée, système de refroidissement des équipements, ...[47])

III.1 Introduction

L'agriculture mondiale fait face à un défi majeur : nourrir une population qui devrait atteindre 10 milliards d'habitants d'ici 2050, sur des surfaces agricoles limitées et soumises aux stress climatiques croissants. Dans ce contexte, les engrais minéraux constituent un levier essentiel pour maintenir et améliorer la productivité agricole. Ils apportent aux plantes les éléments nutritifs nécessaires à leur croissance de manière rapide, précise et contrôlée.

Depuis la synthèse industrielle de l'ammoniac au début du XXe siècle, la production et l'utilisation des engrais minéraux n'ont cessé de croître. Aujourd'hui, environ 190 millions de tonnes de nutriments sont appliquées annuellement sur les cultures à travers le monde, faisant des engrais minéraux l'un des intrants agricoles les plus utilisés et les plus stratégiques. [50]

Ce chapitre présente de manière structurée les engrais minéraux : leurs définitions, leur classification, leurs procédés de fabrication, leur utilisation agronomique, ainsi que le lien innovant entre la valorisation de la saumure issue du dessalement et la production d'engrais. Une attention particulière est accordée à l'importance des engrais dans l'agriculture algérienne.

III.2 Définitions

III.2.1 Définition générale d'un engrais

Un engrais est toute substance naturelle ou synthétique apportée au sol ou directement aux plantes dans le but d'améliorer leur nutrition et d'augmenter les rendements agricoles. Un engrais contient un ou plusieurs éléments chimiques indispensables à la croissance et au développement des plantes, appelés éléments nutritifs ou éléments fertilisants.

Selon la norme ISO et les réglementations européennes, un engrais doit répondre à plusieurs critères : avoir une composition chimique définie et garantie, être assimilable par les plantes dans un délai raisonnable, et ne pas dégrader la fertilité du sol à long terme. [51]

III.2.2 Définition des engrais minéraux

Les engrais minéraux, également appelés engrais chimiques ou synthétiques, sont des produits fabriqués par synthèse chimique industrielle ou extraits de gisements minéraux. Ils contiennent les éléments nutritifs sous forme de sels minéraux solubles ou peu solubles, directement assimilables par les plantes. [51]

Leur composition est précise, garantie et contrôlée, ce qui les distingue des engrais organiques (fumier, compost) dont la composition est variable.

Leurs caractéristiques principales sont:

- Teneur en éléments nutritifs élevée et garantie sur l'étiquette.
- Action rapide grâce à la solubilité élevée de la plupart des formes.
- Possibilité de formuler des produits adaptés aux besoins spécifiques des cultures.
- Facilité de stockage, de transport et d'application.

III.2.3 Les éléments nutritifs des plantes

Les plantes ont besoin de 17 éléments essentiels à leur croissance, classés en trois catégories :

Tableau III.1 Classification des éléments nutritifs essentiels aux plantes

Catégorie	Éléments	Rôle principal
Macronutriments primaires	Azote (N), Phosphore (P), Potassium (K)	Croissance, énergie, fructification
Macronutriments secondaires	Calcium (Ca), Magnésium (Mg), Soufre (S)	Structure cellulaire, photosynthèse
Micronutriments (oligoéléments)	Fe, Zn, Mn, Cu, B, Mo, Cl, Ni	Enzymes, catalyseurs métaboliques

III.3 Classification des Engrais Minéraux

Les engrais minéraux peuvent être classés selon plusieurs critères : leur composition chimique, leur teneur en éléments nutritifs, leur origine ou leur mode d'action. La classification la plus utilisée en agronomie est celle basée sur les éléments nutritifs apportés.[52]

III.3.1 Engrais simples

Les engrais simples n'apportent qu'un seul élément nutritif majeur. On distingue

III.3.1.1 Engrais azotés(N)

L'azote est l'élément nutritif le plus consommé dans le monde. Il est présent dans les engrais sous trois formes chimiques aux comportements agronomiques différents :

- Forme nitrique (NO_3^-) : immédiatement assimilable, mobile dans le sol, risque de lessivage (ex : nitrate de calcium, nitrate de potassium).
- Forme ammoniacale (NH_4^+) : moins mobile, doit être nitrifié avant absorption, moins de risque de lessivage (ex : sulfate d'ammonium).
- Forme uréique ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) : doit être hydrolysée dans le sol avant d'être assimilée, action plus lente (ex : urée).

Tableau III.2 – Principaux engrais azotés et leurs caractéristiques [52]

Engrais azoté	Forme de N	Teneur en N (%)	Remarques
Urée	Uréique	46 %	Engrais le plus concentré
Nitrate d'ammonium	Nitrique + amm.	33–34 %	Très utilisé en céréaliculture
Sulfate d'ammonium	Ammoniacale	21 %	Apporte du soufre
Nitrate de calcium	Nitrique	15,5 %	Maraîchage, serre
Ammonitrate	Nitrique + amm.	27–33 %	Usage agricole courant
Solution azotée (UAN)	Triple forme	28–32 %	Application liquide

III.3.1.2 Engrais phosphatés(P)

Le phosphore joue un rôle fondamental dans le développement racinaire, la floraison, la fructification et la maturation. Les principaux engrais phosphatés sont :

- Superphosphate simple (SSP) : 16–20 % de P_2O_5 , contient également du calcium et du soufre.
- Superphosphate triple (TSP) : 44–48 % de P_2O_5 , engrais phosphaté le plus concentré.
- Phosphate bicalcique (DCP) : peu soluble, action lente, adapté aux sols acides.
- Phosphate naturel brut : peu soluble, réservé aux sols acides en agriculture biologique.

III.3.1.3 Engrais potassiques(K)

Le potassium améliore la résistance au froid, aux maladies et au stress hydrique, et améliore la qualité des récoltes (sucres, amidon, protéines) :

- Chlorure de potassium (KCl) : 60 % de K₂O, le plus produit et le moins coûteux.
- Sulfate de potassium (K₂SO₄) : 50–52 % de K₂O, recommandé pour les cultures sensibles au chlore (pomme de terre, tabac, vigne).
- Nitrate de potassium (KNO₃) : 44 % de K₂O et 13 % de N, idéal en fertigation.
- Sulfate de potassé-magnésium (Kieserite) : apporte K, S et Mg.

III.3.2 Engrais composés

Les engrais composés contiennent au moins deux éléments nutritifs majeurs. On distingue les engrais binaires (NP, NK, PK) et les engrais ternaires (NPK).

III.3.2.1 Engrais NPK

Les engrais NPK sont les plus utilisés dans le monde en raison de leur polyvalence. Ils sont fabriqués soit par mélange physique de composants (engrais de mélange), soit par réaction chimique (engrais complexes). Leur formule est exprimée par trois chiffres indiquant les teneurs en N, P₂O₅ et K₂O.[53]

III.3.3 Engrais foliaires

Les engrais foliaires sont appliqués directement sur les feuilles par pulvérisation. Ils permettent une correction rapide des carences en macronutriments et micronutriments, notamment en conditions de stress (sécheresse, froid) qui limitent l'absorption racinaire. Ils sont particulièrement utilisés en maraîchage, viticulture et arboriculture.

III.3.4 Engrais de fertirrigation

La fertirrigation consiste à apporter les engrais dissous dans l'eau d'irrigation. Elle est particulièrement adaptée aux systèmes d'irrigation localisée (goutte-à-goutte, micro-

aspersion). Elle permet une grande précision dans l'apport nutritif, une réduction des doses et une meilleure efficacité de l'eau et des nutriments.

III.4 Utilisation Agronomique des Engrais Minéraux

III.4.1 Rôle des éléments nutritifs dans la plante

III.4.1.1 Rôle de l'azote (N)

L'azote est un constituant fondamental des protéines, des acides nucléiques (ADN, ARN), de la chlorophylle et de nombreuses enzymes. Il est le moteur de la croissance végétative : une carence en azote se manifeste par un jaunissement des feuilles les plus âgées (chlorose) et un nanisme général de la plante. Un excès d'azote, en revanche, favorise une croissance excessive de la masse végétative au détriment de la fructification et augmente la sensibilité aux maladies.[54]

III.4.1.2 Rôle du phosphore(P)

Le phosphore intervient dans le stockage et le transfert de l'énergie cellulaire (ATP, ADP), dans la composition des membranes cellulaires (phospholipides) et dans la synthèse des acides nucléiques. Il est essentiel pour le développement racinaire, la floraison et la maturation des graines. Une carence en phosphore se traduit par une coloration pourpre ou violacée des feuilles et un retard de maturité.[54]

III.4.1.3 Rôle du potassium (K)

Le potassium joue un rôle régulateur dans de nombreux processus physiologiques : ouverture et fermeture des stomates, transport des sucres, activation des enzymes, régulation de la pression osmotique. Il améliore la résistance au gel, à la sécheresse, aux maladies et améliore la qualité des récoltes (teneur en sucres, amidon, huiles). Une carence en potassium se manifeste par une nécrose des bords des feuilles (brûlure marginale).[54]

III.4.2 Principes de fertilisation raisonnée

La fertilisation raisonnée vise à apporter les éléments nutritifs en quantité nécessaire et suffisante, au bon moment et sous la bonne forme, en tenant compte de l'objectif de rendement, des fournitures du sol et des besoins de la culture. Elle repose sur quatre principes fondamentaux :

- Principe de l'équilibre: équilibrer les apports entre eux et avec la disponibilité du sol.

- Principe du minimum (loi de Liebig): c'est l'élément le moins disponible qui limite la croissance.

III.5 Modes et périodes d'application

L'efficacité des engrais dépend largement du mode et du moment d'application. On distingue :

- Application au fond (engrais de fond) : avant ou au semis, pour les éléments peu mobiles (P, K). Favorise l'enracinement précoce.
- Application en couverture : en cours de végétation pour les éléments mobiles (N). Permet de répondre aux besoins au moment de la croissance active.
- Fractionnement des apports azotés : diviser l'apport total en 2–3 applications réduit les pertes par lessivage et volatilisation.
- Fertirrigation : apports dissous dans l'eau d'irrigation, réservée aux systèmes localisés. Haute précision et haute efficacité.
- Application foliaire : correction rapide de carences en cours de végétation.

III.6 Lien entre la Saumure de Dessalement et les Engrais Minéraux

III.6.1 Composition de la saumure : un gisement minéral inexploité

La saumure générée par les stations de dessalement d'eau de mer est un effluent très concentré en sels minéraux. Loin d'être un simple déchet, elle représente une source potentielle de matières premières précieuses pour l'industrie chimique et la production d'engrais. La saumure issue du dessalement par osmose inverse ou par distillation MSF contient notamment la composition présentée dans le tableau III.3:[55]

Tableau III.3 Composition typique de la saumure de dessalement et valorisations potentielles

Composé	Symbole	Conc. typique (g/L)	Valorisation possible
Chlorure de sodium	NaCl	40–70	Chlore, soude, engrais N
Chlorure de magnésium	MgCl ₂	5–15	Engrais Mg, ciment

Sulfate de magnésium	MgSO ₄	3–8	Engrais Mg, pharmacie
Chlorure de calcium	CaCl ₂	2–6	Déverglaçage, amélioration sols
Sulfate de sodium	Na ₂ SO ₄	3–7	Industrie papier, détergents
Potassium	K ⁺	0,5–1,5	Engrais potassiques
Brome	Br ⁻	0,1–0,3	Industrie pharmaceutique

III.6.2 Saumure et amendement des sols : utilisation directe

Dans certains contextes, des fractions diluées de saumure traitée peuvent être utilisées comme source de magnésium et de calcium pour amender les sols déficientes en ces éléments. Cependant, cette pratique doit être strictement contrôlée pour éviter la salinisation des terres agricoles. Elle est envisageable uniquement après des traitements de dessalage partiel et dans des sols bien drainés.

III.6.3 Concept d'usine intégrée dessalement-engrais

Plusieurs pays du Golfe Persique (Arabie Saoudite, Émirats Arabes Unis) ont développé des complexes industriels intégrés combinant :

- Une station de dessalement d'eau de mer.
- Une unité de valorisation de la saumure.
- Une unité de production d'engrais.

Ce modèle est économiquement intéressant car il mutualisé les infrastructures, réduit le coût de traitement de la saumure et génère une valeur ajoutée significative. Il représente une voie d'avenir pour l'Algérie, compte tenu de ses importantes capacités de dessalement (notamment à Arzew où est implanté le complexe KAHRAMA).

III.7 Importance des Engrais Minéraux dans l'Agriculture Algérienne**III.7.1 Contexte agricole algérien**

L'Algérie s'étend sur 2,38 millions de km², dont seulement environ 8,5 millions d'hectares de terres arables concentrées dans le nord du pays (Tell, Hauts Plateaux). Le climat méditerranéen et semi-aride qui caractérise ces régions impose de fortes contraintes hydriques et thermiques aux cultures. La superficie irriguée ne dépasse pas 1,2 million d'hectares, soit environ 14 % des terres arables.

L'agriculture algérienne emploie environ 20 % de la population active et contribue à environ 12 % du PIB. Les principales productions sont les céréales (blé dur, blé tendre, orge), les légumes secs, les maraîchages, les agrumes, la vigne et les dattes. Malgré d'importants potentiels, les rendements demeurent en deçà des moyennes méditerranéennes, en partie à cause d'une fertilisation insuffisante ou inadaptée.[56]

III.7.2 Consommation d'engrais en Algérie

La consommation moyenne d'engrais en Algérie est estimée à environ 30–40 kg/ha de surface agricole utile (SAU), un niveau très inférieur aux moyennes mondiales (135 kg/ha) et européennes (~200 kg/ha). Cette sous-fertilisation constitue l'une des causes principales de la faiblesse des rendements algériens, notamment en céréaliculture.[56]

III.7.3 Production nationale d'engrais : le groupe FERTIAL

L'Algérie produit une partie de ses engrais minéraux à travers le groupe FERTIAL (Fertilisants d'Algérie), issue de la fusion de ASMIDAL et ENGRAIS, implanté principalement à Arzew (wilaya d'Oran) et à Annaba. Les principales productions sont :

- Ammoniac anhydre (NH_3) : capacité de production de 1 million de tonnes/an.
- Urée (granulée et prillée) : 500 000 tonnes/an, en partie exportée.
- Nitrate d'ammonium (ammonitrate) : utilisé en agriculture et dans l'industrie minière.
- Acide nitrique et acide phosphorique : intermédiaires industriels.

La proximité géographique de l'usine FERTIAL d'Arzew et du complexe KAHRAMA (dessalement) représente une opportunité unique de synergies industrielles, notamment pour la valorisation de la saumure dans la production d'engrais.[56]

III.8 Conclusion

Les engrais minéraux représentent un pilier incontournable de l'agriculture moderne. Leur diversité — engrais azotés, phosphatés, potassiques, composés NPK — permet de répondre à la grande variété des besoins des cultures et des sols. Leur efficacité agronomique, lorsqu'ils sont appliqués de manière raisonnée et adaptée, est démontrée par d'innombrables essais scientifiques et par les gains de rendement observés à l'échelle mondiale.

L'angle novateur de ce chapitre réside dans le lien établi entre le dessalement de l'eau de mer et la production d'engrais. La saumure, sous-produit inévitable des stations de dessalement, constitue un gisement minéral riche en magnésium, potassium, sodium et autres éléments valorisables dans la chaîne de production des engrais. Cette approche d'économie circulaire, déjà explorée dans les pays du Golfe, est particulièrement pertinente pour l'Algérie qui dispose à la fois d'importantes capacités de dessalement (notamment à Arzew) et de ressources en phosphate naturel (Tebessa).

En Algérie, la sous-fertilisation des cultures représente un frein majeur à l'augmentation des rendements agricoles. Comblar ce déficit de fertilisation, en s'appuyant sur une production nationale renforcée et une valorisation intégrale des ressources minérales disponibles, constitue l'un des défis stratégiques de la politique agricole et industrielle du pays pour les prochaines décennies.

Ce chapitre détaille la démarche expérimentale adoptée pour caractériser les différentes matrices prélevées à la station de dessalement KAHRAMA. Il décrit les protocoles d'échantillonnage, les méthodes d'analyses physico-chimiques, les processus de récupération des solides et les techniques de caractérisation instrumentale.

IV.1 Échantillonnage et préparation

IV.1.1. Collecte multi-sources : Eau de mer, saumure de rejet et tartre des démisteurs

L'étude s'appuie sur une surveillance rigoureuse de trois types de matrices :

- **Eau de mer (prise)** : Sert d'échantillon de référence pour définir la ligne de base chimique.
- **Saumure de rejet** : Fluide concentré issu du processus de dessalement, au cours de notre étude de valorisation.
- **Tartre (blocs solides)** : Prélevé directement au niveau des demisteurs de la station pour l'analyse des phases minérales précipitées.

Les prélèvements liquides ont été effectués dans des flacons en polyéthylène haute densité, préalablement rincés avec l'eau à prélever pour éviter toute contamination.



Figure IV.1 Echantillonnage

IV.1.2. Matériels de laboratoire et réactifs utilisés

Les analyses ont nécessité l'utilisation d'un matériel de précision :

- **Matériel de mesure** : Appareil multi paramètre doté de sondes avec compensation automatique de température (ATC), pH-mètre, conductimètre, balance analytique (précision 0,1 mg).
- **Verrerie** : Fioles jaugées de 100 ml, pipettes de 1 ml et 20 ml, erlenmeyers de 50 ml et 250 ml, capsules d'évaporation en porcelaine.
- **Réactifs** : EDTA N/50 (0,01 mol/L), indicateurs colorés (NET, Murexide, indicateur mixte), solutions tampons (pH 10), NaOH 2N et acide sulfurique (H_2SO_4 10 mmol/L).

IV.2. Protocole expérimental et analyses chimiques

IV.2.1. Méthodes d'analyse physico-chimiques

Les paramètres labiles ont été mesurés directement sur site ou immédiatement après le prélèvement :

- **Mesure du pH** : Déterminée à l'aide d'un pH-mètre étalonné en trois points (pH 4,00, 7,00 et 10,00).
- **Température** : Relevée simultanément lors des analyses in situ à l'aide d'une sonde thermique intégrée, afin de corriger les valeurs de conductivité et de pH et de caractériser l'état thermique de l'effluent au moment du prélèvement.
- **Conductivité** : Mesurée pour évaluer la concentration globale en sels. La cellule de conductivité est systématiquement rincée avant chaque mesure.
- **Calcul des Solides Totaux Dissous (TDS)**

L'estimation des **Solides Totaux Dissous (TDS)** est une étape fondamentale pour quantifier la charge saline globale de l'eau. Le TDS représente la masse totale des substances organiques et inorganiques (sels, métaux, ions) présentes en solution.

Contrairement à la mesure directe par gravimétrie, cette méthode indirecte évalue la capacité de l'eau à conduire le courant électrique. La conductivité mesurée est ensuite convertie en TDS (mg/L) en appliquant des facteurs de conversion (k) spécifiques à la nature de la matrice :

- **Eau de mer** : $k = 0,72$
- **Saumure (rejet)** : $k = 0,78$

Méthode du calcul des TDS (usage des facteurs de conversion (conductivité et TDS))

$$\text{TDS (mg/l)} = \text{Conductivité } \mu\text{S/cm} *$$

Eau distillée : 0.5

Eau potable : 0.55

Eau de mer : 0.72

Eau saumâtre : 0.78

IV.2.2. Dosages volumétriques

A. Protocole de dilution

Compte tenu de la charge minérale extrêmement élevée des saumures, nous appliquons systématiquement une **dilution au 1/100ème** (Facteur F=100) : 1 ml d'échantillon est prélevé à la pipette jaugée et complété à 100 ml avec de l'eau distillée dans une fiole jaugée.

B. Méthodes de titrage par complexométrie (EDTA)

- **Dureté Totale (TH)** : Dosage de Ca^{2+} et Mg^{2+} . Nous introduisons 10 ml de l'échantillon dilué, 1 ml de solution tampon (pH=10) et une pincée de NET. Le titrage à l'EDTA se fait jusqu'au virage du rose au **bleu**.

Expression : $\text{TH (mg/l en CaCO}_3\text{)} = V\{\text{EDTA}\} (\text{ml}) * 100$

- **Dosage du Calcium (Ca^{2+})** : 20 ml d'échantillon dilué + 1 ml de NaOH + une pincée de Murexide. Titrage jusqu'au virage du rose au **violet**.

Expression : $\text{Ca}^{2+} (\text{mg/l en CaCO}_3) = V\{\text{EDTA}\} (\text{ml}) * 50$

- **Calcul du Magnésium (Mg^{2+})** : Déduit par différence :

- $\text{Mg}^{2+} (\text{mg/l}) = [\text{TH (mg/l en CaCO}_3\text{)} - \text{Ca}^{2+} (\text{mg/l en CaCO}_3\text{)}] * 0,243.$



Figure IV.2 Titrage par l'EDTA

IV.2.3. Analyse de l'alcalinité (TAC)

Le Titre Alcalimétrique Complet est déterminé par volumétrie acide. On utilise 50 ml d'échantillon et quelques gouttes d'indicateur mixte. Le titrage par H_2SO_4 (10 mmol/l) s'effectue jusqu'au virage du bleu au **rose**.

- Expression : $\text{Alk (mg/l)} = V\{\text{acide}\} \text{ (ml)} * 20$.

IV.3. Procédé de récupération des solides

IV.3.1. Extraction par voie gravimétrique

Cette méthode simule la transformation d'un rejet liquide en ressource minérale solide :

- 1.Préparation** : Nettoyage et séchage des capsules à l'étuve, pesée de la masse initiale (M1).
- 2.Évaporation et Séchage** : 50 ml d'échantillon sont placés à l'étuve à **180 °C pendant 4 heures** (plus une heure supplémentaire pour garantir une dessiccation totale).
- 3.Pesée finale** : Après refroidissement en dessiccateur, pesée de la masse finale (M2).
- 4.Calcul du TDS** : $\text{TDS (mg/l)} = (M2 - M1) * 1000 / V\{\text{échantillon}\}$.

IV.3.2. Traitement du tartre brut récupéré

Le tartre prélevé sous forme de blocs solides à la station KAHRAMA a subi une préparation spécifique au laboratoire de l'Université de Mostaganem. Il a été **broyé manuellement** à l'aide d'un mortier et d'un pilon jusqu'à l'obtention d'un résidu blanc pulvérulent très fin, garantissant l'homogénéité nécessaire pour les analyses FT-IR.

IV.4. Techniques de caractérisation instrumentale

Les analyses ont été réalisées au Plateau Technique d'Analyses Physico-Chimiques (CRAPC) de l'Université de Mostaganem :

IV.4.1. Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FT-IR)

La caractérisation par spectroscopie FTIR a été réalisée sur trois échantillons issus de la station de dessalement KAHRAMA : le tartre de chaudière (TR), la saumure filtrée (SM) et la saumure non filtrée contenant les matières en suspension (MES). Les spectres ont été enregistrés dans la gamme $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$, puis traités par Python (correction de baseline, lissage, soustraction du bruit de fond et détection automatique des pics).

IV.4.2. Fluorescence X (FRX).

Méthode d'analyse élémentaire permettant de quantifier précisément les pourcentages de Calcium, Magnésium, Soufre et Sodium.

IV.4.3. Microscopie électronique à balayage (MEB)

Soufre Afin d'étudier la morphologie des cristaux de tartre, leur structure et obtenir une microanalyse chimique locale des dépôts.

IV.5 Synthèse de l'Hydroxyde de Magnésium et Nitrate de Calcium

Afin de valider concrètement le potentiel de valorisation identifié lors des analyses structurales, une campagne d'essais expérimentaux a été initiée au sein du laboratoire de recherche de l'université. Cette phase pratique vise à concevoir et à optimiser des protocoles de synthèse à petite échelle, en exploitant directement les propriétés chimiques du sel de saumure et du tartre récupérés. L'objectif est de transposer les données théoriques en un procédé chimique viable, permettant de contrôler la pureté et le rendement de l'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et du nitrate de calcium obtenus. Le mode opératoire détaillé ci-après

formalise l'ensemble des étapes méthodologiques, des conditions opératoires (pH, température, agitation) et des étapes de purification rigoureusement appliquées lors de nos manipulations en laboratoire.

IV.5.1 Réactifs et Équipements de Laboratoire

Les essais ont été réalisés au sein du laboratoire de recherche de l'université en utilisant la verrerie et les équipements standards d'analyse :

Agitateurs magnétiques, pH-mètre de précision, balances analytiques, système de filtration et étuve de séchage.

IV.5.2 Synthèse et Récupération de l'Hydroxyde de Magnésium ($Mg(OH)_2$)

Le procédé de précipitation sélective du magnésium à partir de la saumure de rejet de la station KAHRAMA a été exécuté selon les étapes suivantes :

1. Prélèvement et Échantillonnage
2. Précipitation Chimique
3. Séparation (Filtration)
4. Lavage du Précipité
5. Séchage et Conditionnement



Figure IV.3 Synthèse de l'Hydroxyde de Magnésium

IV.5.3 Synthèse du Nitrate de Calcium à partir du Tartre Industrielle

La valorisation du tartre (composé majoritairement de carbonate de calcium $CaCO_3$) récupéré sur site a été réalisée par voie d'attaque acide :

1. Préparation de la Matrice
2. Attaque Acide Contrôlée
3. Filtration des Insolubles
4. Cristallisation et Séchage



Figure IV.4 Synthèse du Nitrate de Calcium

IV.6 Résultats et discussion

IV.6.1 Résultats des campagnes expérimentales

Afin d'évaluer la stabilité opérationnelle de la station KAHRAMA et de caractériser précisément le potentiel de valorisation minérale des rejets, une campagne d'analyses a été menée sur trois journées distinctes (les 8, 10 et 15 mars 2026). Des mesures directes de pH, de température et de conductivité ont été effectuées in situ pour chaque échantillon (eau de mer et saumure). Une étape de dilution au $1/100^{\wedge}(e)$ a ensuite été réalisée au laboratoire afin de permettre le dosage précis des ions divalents (Ca^{2+} , Mg^{2+}) et de l'alcalinité. Le tableau IV.1 synthétise les mesures effectuées :

Tableau IV.1 : Suivi des paramètres physico-chimiques (Mesures directes) :

Échantillon	Date	Heure	Conductivité	pH	T° (°C)	TDS (mesure)
Eau de mer	08/03/2026	09 :32	54400	8.10	19.80	39168
Eau de rejetée	08/03/2026	09 :34	86100	8.93	28.02	67158
Eau de mer	10/03/2026	09 :35	54400	7.96	22.00	39168
Eau de rejetée	10/03/2026	09 :40	86000	8.93	25.7	67080
Eau de mer	15 /03/2026	10 :00	54300	8.03	21.30	39096
Eau de rejetée	15/03/2026	10 :07	85900	8.97	23.80	67002

Les mesures directes montrent une concentration significative entre l'entrée et le rejet.

Après avoir établi la caractérisation physique initiale des échantillons directement sur le site de la station KAHRAMA, une analyse chimique approfondie a été menée en laboratoire afin d'identifier la composition ionique précise de la saumure. Cette seconde phase expérimentale, réalisée après une dilution au 1/100^e pour stabiliser les mesures, a permis de quantifier par titrage les concentrations en calcium (Ca^{2+}), en magnésium (Mg^{2+}) et en alcalinité (Alk). Ces dosages sont essentiels pour établir un lien entre la charge saline globale (TDS) et la présence spécifique des ions responsables du tartre, et pour évaluer de manière quantitative le potentiel de valorisation minérale du rejet.

- **Résultats du séchage à 180°C (08/03/2026) :**

Ces données correspondent à 5 essais pour le calcul du résidu sec pour un volume de V=50 ml

- **EAU DE MER (solution mer)**

TableauIV.2 Résultats de la TDS Eau de mer

Essai	MasseM1 (avant)	MasseM2 (après)	Masse Résidu (mg))	TDS (mg/L)
1	200.20g	202.07g	1870	37400
2	204.16g	206.10g	1940	38800
3	200.28g	202.19g	1910	38200
4	205.03g	206.99g	1960	39200
5	202.15g	204.08g	1930	38600
Moyenne				38440

- **EAU DE Rejetée (saumure)**

TableauIV.3 Résultats de la TDS saumure

Essai	Masse M1(avant)	MasseM2 (après)	Masse résidu(mg)	TDS (mg/L)
B1	204.63g	208.07g	3440	68800
B2	204.54g	207.95g	3410	68200
B3	200.34g	203.78g	3440	68800
B4	206.25g	209.68g	3430	68600
B5	204.23g	207.70g	3470	69400
Moyenne				68900

❖ **Analyse Ionique (Solution mère)**

D'après les calculs de dilution ($f = 100$) et **Pour un volume de 50 ml séché à 180°C** les concentrations réelles dans échantillons et les **masses de résidus solides (sels)** sont illustrés dans le tableau IV.4

Tableau IV.4 Résultats de l'analyse ionique

Ions	Eau de mer	Eau de Rejetée (Saumure)
Ca^{2+} (mg/L)	1500	1850
Mg^{2+} (mg/L)	1421.55	1956.15
Dureté totale TH (mg/L)	7350	9900
Alcalinité (Alk)(mg/L)	120	420
TDS moyen(mg/L)	38440	68900

- **Résultats du séchage à 180°C (10/03/2026) :**

Ces données correspondent à 5 essais pour le calcul du résidu sec pour un volume de $V=50$ ml

- **EAU DE MERE (solution mère)**

Tableau IV.5 Résultats de la TDS Eau de mer

Essai	MasseM1 (avant)	MasseM2 (après)	Masse Résidu(mg)	TDS (mg/L)
1	202.15g	204.22g	2070	41400
2	200.20g	202.28g	2080	41600
3	204.23g	206.31g	2080	41600
4	205.02g	207.10g	2080	41600
5	204.63g	206.68g	2050	41000
Moyenne				41600

- **EAU DE Rejetée (saumure)**

Tableau IV.6 Résultats de la TDS saumure

Essai	Masse M1(avant)	Masse (après)	M2 Masse Résidu(mg)	TDS (mg/L)
B1	202,29g	205,89g	3600	72000
B2	204.15g	207.82g	3660	73200
B3	206,25g	209,94g	3690	73800
B4	211,90g	215,54g	3640	72800
B5	200,28g	203,94g	3660	73200
MOYENNE				

Les concentrations réelles dans échantillons et les **masses de résidus solides (sels)** sont illustrés dans le tableau IV.7

Tableau IV.7 Résultats de l'analyse ionique

Ions	Eau de mer	Eau de Rejetée (Saumure)
Ca ²⁺ (mg/L)	3100	2150
Mg ²⁺ (mg/L)	2041.2	2162.7
Dureté totale TH (mg/L)	8400	11050
Alcalinité(Alk)(mg/L)	115	420
TDS moyen	41600	73200

- **Résultats du séchage à 180°C (15/03/2026) :**

Ces données correspondent à 5 essais pour le calcul du résidu sec pour un volume de V=50 ml

- **EAU DE MERE (solution mère)**

Tableau IV.8 Résultats de la TDS Eau de mer

Essai	MasseM1 (avant)	MasseM2 (après)	Masse résidu(mg)	TDS (mg/L)
1	202.14g	204.19g	2050	41000
2	211.89g	213.96g	2070	41400
3	204.16g	206.22g	2060	41200
4	202.29g	204.35g	2060	41200
5	202.19g	202.24g	2050	41000
Moyenne				41100

- *EAU DE Rejetée (saumure)*

Tableau IV.9 Résultats de la TDS Saumure

Essai	Masse M1(avant)	MasseM2 (après)	Masse résidu(mg)	TDS (mg/L)
B1	200.27g	203.90g	3630	72600
B2	204.62g	208.27g	3650	73000
B3	205.02g	208.71g	3690	73800
B4	206.25g	209.72g	3470	69400
B5	204.22g	207.86g	3640	72800
MOYENNE				72800

Tableau IV.10 Résultats de l'analyse ionique

	Eau de mer	Eau de Rejetée (Saumure)
Ca ²⁺ (mg/L)	1500	2175
Mg ²⁺ (mg/L)	1397	9075
Dureté totale TH(mg/L)	7250	11250
Alcalinité(Alk)(mg/L)	117	420
TDSmyen(mg/L)	41100	72800

IV.6.2 Analyses par spectroscopie infrarouge

Suite à la caractérisation physico-chimique rigoureuse des effluents de la station KAHRAMA, les analyses ont mis en évidence une saumure de rejet et des dépôts de tartre particulièrement riches en espèces ioniques, notamment en ions calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}) et en charge saline globale (TDS). Afin de déterminer précisément la structure chimique et moléculaire de ces résidus solides, des analyses par spectroscopie infrarouge (FT-IR) ont été menées .

IV.6.2.1 Analyse du spectre du tartre (TR)

Le spectre FTIR du tartre révèle une signature spectrale caractéristique du carbonate

IV.6.2.2 Analyse des spectres de MES

Les MES présentent des profils similaires, témoignant d'une composition chimique de base identique.

Le tartre présente une signature minérale dominée par les carbonates, tandis que les saumures sont caractérisées par des signatures de chlorures et d'eau d'hydratation, sans pics carbonatés significatifs.

Cette distinction spectrale confirme la pertinence de la stratégie de double valorisation développée dans le cadre du projet OcéanReborn.

- Le tartre (TR), riche en CaCO_3 , constitue la matière première pour la synthèse du nitrate de calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$;
 - La saumure (SM/MES), riche en MgCl_2 , constitue la matière première pour la précipitation de l'hydroxyde de magnésium $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

L'analyse FTIR valide ainsi, à l'échelle moléculaire, la présence des précurseurs chimiques nécessaires aux deux voies de synthèse envisagées, et confirme que les deux flux de déchets de la station KAHRAMA présentent des compositions distinctes et complémentaires, justifiant leur traitement différencié.

IV.6.2.3 Analyse des spectres de $\text{Mg}(\text{OH})_2$

L'analyse FTIR montre les bandes caractéristiques du $\text{Mg}(\text{OH})_2$ et confirme la formation de l'hydroxyde de magnésium.

IV.6.2.4 Analyse des spectres de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

L'analyse FTIR du $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ met en évidence une large bande d'absorption entre 3355 et 3245 cm^{-1} , attribuée aux molécules d'eau de cristallisation. Les bandes observées à 1350 cm^{-1} et 1645 cm^{-1} sont caractéristiques du groupement nitrate (NO_3^-), confirmant ainsi la présence du nitrate de calcium dans l'échantillon.

IV.6.3 Analyse par Microscopie électronique à balayage

Le MEB révèle une morphologie cristalline irrégulière caractéristique des dépôts minéraux issus du procédé de dessalement.

L'analyse EDX confirme la présence majoritaire de Mg, Ca, C et O éléments essentiels pour la synthèse de produits à valeur ajoutée.

IV.6.4 FRX

La FT-IR nous a révélé les liaisons chimiques présentes. Pour aller plus loin et quantifier précisément les éléments, nous avons complété cette analyse par la FRX. Les résultats confirment et renforcent ce que la FT-IR nous avait suggéré.

Ces deux analyses ensemble FT-IR pour les liaisons, FRX pour les teneurs nous donnent une connaissance complète et fiable de nos matières premières, et justifient scientifiquement le choix de nos voies de valorisation.

IV.6.5 Indice de réfraction

Afin de confirmer l'identité des produits synthétisés et d'évaluer leur degré de pureté, une mesure de l'indice de réfraction a été réalisée pour chaque échantillon obtenu. Les valeurs expérimentales mesurées ont été comparées aux données rapportées dans la littérature. La bonne concordance observée entre les valeurs expérimentales et théoriques confirme non seulement la présence des composés synthétisés, mais témoigne également de leur bonne pureté, indiquant ainsi l'efficacité de la méthode de synthèse adoptée.

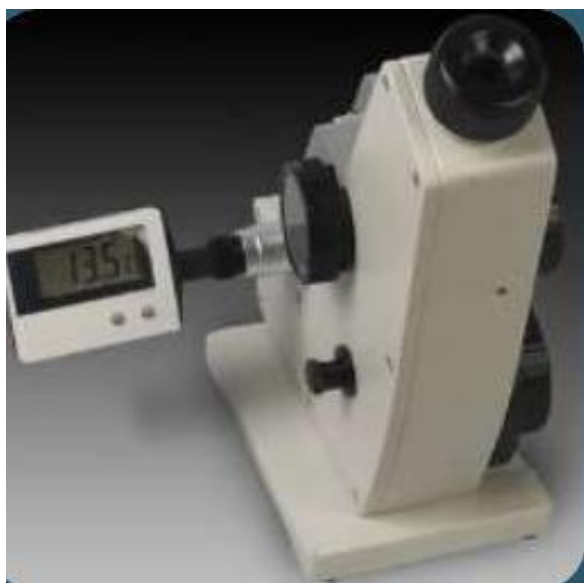


Figure IV.5 Refractomètre

IV.7 Tests réalisés

IV.7.1 Tests sur l'Hydroxyde de Magnésium $Mg(OH)_2$

IV.7.1.1 Caractérisation de la pureté et des propriétés physiques

IV.7.1.1.1 Mesure du pH d'une suspension aqueuse.

Objectif : Évaluer le potentiel basique et l'adsorption/neutralisation de surface.

IV.7.1.1.2 Essai de conductivité

IV.7.1.2 Tests d'application : Neutralisation acide (Pouvoir Tampon)

Test 1 — Action directe sur solution aqueuse acide (Cinétique de neutralisation)

Objectif : montrer l'action neutralisante progressive du produit en milieu liquide.



Figure IV.6 Tests de neutralisation du sol par $\text{Mg}(\text{OH})_2$

Tableaux IV.11 Tests de Neutralisation acide

Paramètre	Eau distillé	ED+ Acide	ED+ acide+ $\text{Mg}(\text{OH})_2$	pH mesuré
Témoin eau	Pur	-	-	7.23
Solution initial	-	Oui	0.0 g	3.60
Essai1	-	Oui	+0.2 g	4.24
Essai 2	-	Oui	+0.2 g	5.10
Essai 3	-	Oui	+0.2 g	6.68
Essai 4	-	Oui	+0.2 g	9.91
Essai 5	-	Oui	+0.2 g	10.22

❖ Action neutralisante du $\text{Mg}(\text{OH})_2$

L'analyse des résultats expérimentaux du **Test 1** met clairement en évidence le fort pouvoir neutralisant et alcalinisant de l'hydroxyde de magnésium $\text{Mg}(\text{OH})_2$ synthétisé, lorsqu'il est introduit de manière progressive dans un milieu aqueux acide.

L'évolution du pH de la solution se décompose en trois phases distinctes :

1. Une phase de neutralisation progressive (de 0,0 g à 0,6 g) : L'ajout des premières fractions de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ induit une élévation régulière et modérée du pH, passant de 3,60 à 6,68. Cette étape correspond à la consommation des ions hydronium H^+ , O^+ libres de l'acide acétique par les ions hydroxyde (OH^-) libérés par la base.

2. Un saut de pH marqué (entre 0,6 g et 0,8 g) : On observe une transition brutale où le pH bondit de 6,68 à 9,91. Ce saut cinétique net indique le dépassement du point d'équivalence chimique, confirmant que l'acidité initiale de la solution de vinaigre a été entièrement neutralisée.

3. Une phase de saturation basique (au-delà de 0,8 g) : L'ajout final de 0,2g supplémentaires n'entraîne qu'une variation mineure du pH (de 9,91 à 10,22). Ce palier final s'explique par la limite de solubilité du $\text{Mg}(\text{OH})_2$ dans l'eau.

Une fois la solution saturée, l'excès de produit reste sous forme de suspension solide, stabilisant le milieu à son pH de saturation caractéristique (légèrement supérieur à 10).

En conclusion, ce test d'application valide de façon rigoureuse l'efficacité de notre produit comme agent de neutralisation acide. Sa capacité à faire passer un milieu d'un état fortement acide (pH 3,60) à un état alcalin stable (pH ~10) démontre son potentiel remarquable pour des applications environnementales ou industrielles, notamment dans le traitement d'effluents acides ou la formulation de solutions tampons.

Test 2 — Simulation d'amendement sur sol acide

Matériel requis : pH-mètre (ou papier pH de précision), $\text{Mg}(\text{OH})_2$ synthétisé, eau distillée, balance de précision, 3 béchers.

❖ Préparation des 2 échantillons comparatifs :

- Échantillon A (Témoin acide) : Sol seul + eau distillée.
- Échantillon B (Essai de neutralisation) : Sol + $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

Tableaux IV.12 Simulation d'amendement sur sol acide

Echantillon	Nature de matrice	Masse de $\text{Mg}(\text{OH})_2$	pH mesuré
Témoin A	Sol acide + eau distillée	0.0	6.28
Témoin B	Sol acide + eau distillée+ $\text{Mg}(\text{OH})_2$	+0.2	6.70
Essai 2	-	+0.2	8.02
Essai 3	-	+0.2	8.93
Essai 4	-	+0.2	9.40
Essai5	-	+0.2	9.90

❖ Action neutralisante du $\text{Mg}(\text{OH})_2$

L'analyse des résultats expérimentaux du **Test 2** met clairement en évidence le fort pouvoir neutralisant et alcalinisant de l'hydroxyde de magnésium $\text{Mg}(\text{OH})_2$ synthétisé, lorsqu'il est introduit de manière progressive dans un milieu aqueux acide.

IV.7.2 Test sur le Nitrate de Calcium $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$

IV.7.2.1 Test de solubilité commerciale (Argument Qualité)

Objectif : Valider la pureté et la vitesse de dissolution de votre nitrate de calcium par rapport à un étalon commercial standard (engrais ou grade laboratoire).

Paramètres comparatifs à mesurer obligatoirement :

Temps de dissolution exact (chronométré à agitation constante).

Aspect de la solution (limpidité, transparence).

Présence ou absence de résidus/insolubles au fond du récipient.

IV.7.2.2 Test Conductivité Électrique (CE)

Test de pureté et de concentration ionique (Argument Qualité / Performance)

Objectif : Évaluer la conductivité électrique de notre nitrate de calcium à différentes concentrations afin de vérifier sa solubilité ionique totale, sa pureté (absence d'impuretés non

conductrices ou d'excès de sels indésirables) et de le comparer à un étalon commercial standard.

Paramètres comparatifs à mesurer obligatoirement :

Conductivité électrique exacte (mesurée à l'aide d'un conductimètre étalonné).

Stabilité de la mesure sous agitation modérée.

Température de la solution (facteur d'influence critique pour la CE).

IV.7.2.3 Essai agronomique (Application sur la menthe)

Pourquoi ***lamente*** ? C'est une plante à croissance rapide, très sensible et réactive aux apports azotés (N), ce qui en fait un excellent bio-indicateur à court terme.

Tableau IV.13 Paramètres agronomiques relevés lors de l'essai sur la menthe

Paramètre observe	Pots A (témoins sans apport)	Pots B (avec nitrate de calcium)
Hauteur de la tige (cm)	5	7
Couleur des feuilles (vert pale/vert foncé)	Vert clair	Vert plus foncé
Vigueur générale (échelle de 1 à 5)	2/5	4/5
Intensité de l'odeur de menthe (faible/forte)	Faible à moyenne	Moyenne à forte
Nombre de feuilles	8 feuilles	15 feuilles

Après deux semaines d'expérimentation, la menthe cultivée dans le pot recevant le nitrate de calcium a montré une croissance plus rapide que celle du pot témoin. Une augmentation de la hauteur de la tige, du nombre de feuilles et de l'intensité de la couleur verte a été observée. Ces résultats préliminaires suggèrent que l'apport de nitrate de calcium favorise le développement végétatif de la menthe grâce à la disponibilité simultanée de l'azote nitrique et du calcium.



Figure IV.7 l'essai du nitrate de calcium sur la menthe

Références Bibliographiques

- [1] UNESCO. (2021). *T*. UNESCO Publishing.
- [2] Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. L. (2013). Technical review and evaluation of the economics of water desalination : Current and future challenges for better water supply sustainability. *Des*, 197–207.
- [3] Ministère des Ressources en Eau et de la Sécurité Hydrique. (2023). *S* Ministère des Ressources en Eau, Alger.
- [4] KAHRAMA. (2022). *RKAHRAMA*, Oran.
- [5] Lattemann, S., & Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *D*(1–3), 1–15.
- [6] Tularam, G. A., & Ilahee, M. (2007). Environmental concerns of desalinating seawater using reverse osmosis. , 805–813.
- [7] Pramanik, B. K., Shu, L., & Jegatheesan, V. (2017). A review of the management and treatment of brine solutions. *E* 3(4), 625–658.
- [8] Ellen MacArthur Foundation. (2013). Ellen MacArthur Foundation.
- [9] FAO. (2022). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [10] Clément, J. (1979). *e* (p. 48). Éditions Larousse.
- [11] Michelle, D., & Dominique, R. (1994). (p. 99). Éditions Maloine.
- [12] Belhadj, H. (2012, novembre).. Communication présentée au IXe Congrès International AEDyR, Palacio de Congresos de Madrid, Espagne.
- [13] Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production du Pétrole et du Gaz Naturel — Comité des Techniques. (1993).. Éditions Techniques.

Reference Bibliographiques

- [14] Meriq, J.-P. (2009). [Thèse de doctorat, École Doctorale MEGeP, Université de Toulouse].
- [15] Hadjali, Y. (2012). [Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen].
- [16] Dunglas, J. (2014). Groupe Eau, Académie d'Agriculture de France.
- [17] Salomon, J. (2012). Le dessalement de l'eau de mer est-il une voie d'avenir ? *O*, 237–262.
- [18] Kehal, S. (2001). Rétrospective et perspective du dessalement en Algérie., 35–42.
- [19] Khirani, A. (2013). Élimination des substances humiques en présence de l'histidine et la tyrosine par adsorption. *C* 25–31. Université de Biskra.
- [20] Bessenasse, M., & Filali, M. B. (2014). Impact du dessalement sur l'environnement en Algérie., 75–81.
- [21] Zouini, D. (2009). Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse : une solution pour l'alimentation en eau des villes côtières d'Algérie. *Revue HTE*, 142, 1–10.
- [22] Zfaty, A. (1997). *Report submitted to Israel Water Commissioner*. [Document en hébreu].
- [23] Adan. (2000). *Report submitted to Israel Water Commissioner*. [Document en hébreu].
- [24] Adan. (1998). *Report submitted to Israel Water Commissioner* (Réf. ADN4285a). [Document en hébreu].
- [25] Maurel, A. (2001). *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres*. Éditions Techniques et Documentation.
- [26] Altman, T. (2000). *New power and water co-generation concept with application of reverse osmosis (RO) desalination*. Salzgitter Anlagenbau GmbH.
- [27] Habbet, L. (2009–2010). *Contribution à l'étude des impacts du dessalement des eaux de mer sur l'environnement : cas du littoral de Boumerdès* [Mémoire de magister, Université M'Hamed Bougara, Boumerdès].
- [28] Danis, P. (s.d.). Dessalement de l'eau de mer. *Techniques de l'Ingénieur*, Doc. J2700.
- [29] Al-Subaie, K. Z. (2007). Precise way to select a desalination technology. *Desalination*, 206, 29–35.
- [30] Renaudin, V. (2003). *Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres*. CNRS, Nancy.

Reference Bibliographiques

- [31] Einav, R., Hamssib, K., & Periy, D. (2002). The footprint of the desalination processes on the environment. *Desalination*, 152, 141–154.
- [32] Brun, J. P. (1989). *Procédés de séparation par membranes*. Masson.
- [33] UNEP/MAP. (2003). *Dessalement de l'eau de mer en Méditerranée : évaluation et lignes directrices*. United Nations Environment Programme Mediterranean Action Plan.
- [34] Bissonnette, A. (2008). *Utilisation de nanomembranes pour le dessalement de l'eau et comparaison avec l'osmose inverse et la distillation* [Rapport de recherche]. Centre Universitaire de Formation en Environnement, Université de Sherbrooke, Québec, Canada.
- [35] Lee, A., et al. (2024). Total resource circulation of desalination brine : A review. *Advanced Sustainable Systems*, 8, 2300460.
- [36] Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V., & Kang, S.-M. (2019). The state of desalination and brine production : A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343–1356.
- [37] Lattemann, S., & Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination*, 220(1–3), 1–15.
- [38] Université de Biskra. (2023). *Impacts des rejets des stations de dessalement sur le milieu récepteur* [Thèse de doctorat]. Récupéré de <http://thesis.univ-biskra.dz/2529/>
- [39] IWRA. (2008). *Impact environnemental de la station de dessalement* [Communication au Congrès IWRA 2008]. Récupéré de https://www.iwra.org/congress/2008/resource/authors/abs398_article.pdf
- [40] Pramanik, B. K., Shu, L., & Jegatheesan, V. (2017). A review of the management and treatment of brine solutions. *Environmental Science : Water Research & Technology*, 3(4), 625–658.
- [41] Kumari, P., et al. (2024). Brine valorization through resource mining and CO₂ utilization in the Middle East — a perspective. *Desalination*, 582, 117598.
- [42] La Nouvelle République Algérie. (s.d.). *La saumure, une ressource secondaire pour les minéraux et l'énergie : production mondiale dépassant 51,7 milliards de m³ annuellement*. La Nouvelle République.
- [46] KAHRAMA. (s.d.). *Présentation du complexe de dessalement d'Arzew*. Récupéré de www.kahrama.dz/674/presentation
- [47] KAHRAMA. (2002). *Manuel opératoire KAHRAMA*. KAHRAMA, Béthioua.
- [48] KAHRAMA. (2025). *Document interne d'exploitation*. KAHRAMA, Béthioua. [Document non publié].
- [49] Lee, A., et al. (2024). Total resource circulation of desalination brine : A review. *Advanced Sustainable Systems*, 8, 2300460.

Reference Bibliographiques

- [50] Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V., & Kang, S.-M. (2019). The state of desalination and brine production : A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343–1356.
- [51] Soltner, D. (1999). *Les bases de la production végétale — Tome I : Le sol et son amélioration*. Collection Sciences et Techniques Agricoles.
- [52] Bliefert, C., & Perraud, R. (1997). *Chimie de l'environnement : Air, eau, sols, déchets*. De Boeck Université.
- [53] Anonyme. (2003). *Réglementation sur les engrais et matières fertilisantes*. Ministère de l'Agriculture, Paris.
- [54] Mazoyer, M., & Roudart, L. (2002). *Histoire des agricultures du monde : Du néolithique à la crise contemporaine*. Éditions du Seuil.
- [55] Benbouali, A., & Ziane, M. (2019). Fertilisation minérale et productivité agricole en Algérie. *Revue Algérienne des Sciences Agronomiques*, 12(2), 45–58.
- [56] CHADLI, M. et al. (2022). Présentation du complexe FERTIAL — Annaba : Production d'engrais azotés et phosphatés. Mémoire d'ingénieur, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie.