

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de Génie Civil et d'Architecture

Département d'Hydraulique



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT

Filière : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique urbaine

Par

Abdelghani BOUTHIBA

Thème :

**Gestion et valorisation rationnelles des rejets de saumure des usines
de dessalement de l'eau de mer. Cas de l'Algérie.**

Soutenue le 06/07/2024, devant le jury composé de :

Karim EZZIANE	Professeur	UHB Chlef	Président
Abdelwahab LEFKIR	Professeur	ENSTP, Alger	Examinateur
Ahmed KASSOUL	MCA	UHB Chlef	Examinateur
Taieb HADBI	MCA	UHB Chlef	Examinateur
Mourad AMITOUCHE	Professeur	UMB Boumerdes	Rapporteur
Hacene MAHMOUDI	Professeur	UHB Chlef	Co-rapporteur

Dédicaces

Je dédie ce Travail :

A l'âme de ma mère

A mon père

A ma femme

A mes enfants (Sanaa et Sid Ahmed et

Wissem)

A mes sœurs

A toute la famille

Bouthiba Abdelghani

Remerciement

En premier lieu, je tiens à exprimer ma gratitude envers tous les enseignants qui ont joué un rôle essentiel dans mon parcours éducatif. Un immense merci à mon directeur de thèse, Monsieur AMITOUCHE Mourad, pour son expertise, sa patience et sa guidance précieuse. Cette aventure académique a été rendue possible grâce à la contribution précieuse de chacun d'entre vous.

Je souhaite également exprimer ma sincère reconnaissance envers M.Mahmoudi Hacem, mon co-encadreur, pour son soutien inébranlable et sa contribution essentielle à la réussite de ma thèse.

Je remercie aussi chaleureusement les membres de mon jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail. Leur expertise et leurs commentaires seront d'une grande valeur pour l'amélioration de cette recherche.

Mes remerciements vont également à ma famille et à mes amis pour leur encouragement infailible tout au long de ce parcours académique."

ملخص

في السياق الحالي حيث تواجه الجزائر، مثل العديد من المناطق الجافة، نقصًا متزايدًا في المياه، يمثل تحلية مياه البحر حلاً حيويًا. ومع ذلك، تطرح هذه التكنولوجيا تحديًا بيئيًا كبيرًا في إدارة تصريف المياه المالحة. تركز هذه الدراسة على تحليل أنظمة تصريف المياه المالحة في محطتين لتحلية المياه في الجزائر «تنس» و«مقطع». تعتمد منهجيتنا على نمذجة باستخدام برنامج (Cornell Mixing Expert System CORMIX)، مع مراعاة التغيرات في الأحوال الجوية وموقع نقطة أخذ المياه. الهدف هو تقييم أداء أنظمة التصريف وتحليل التفاعل بين تصريفات المياه المالحة والمياه الموجهة للمعالجة.

لقد لاحظنا زيادة كبيرة في ملوحة المياه، تصل أحيانًا إلى 42 غ/ لتر على مستوى نقطة سحب المياه في محطة تحلية مياه البحر في تنس بسبب عدم كفاية تخفيف تصريف المياه المالحة. بالمقابل، أظهرت نتائج المحاكاة فعالية تخفيف قناة تفريغ المياه الناتجة عن المعالجة تحت الماء في محطة «مقطع». كما تم إكشاف أيضًا على أن تقارب الثقوب في قناة تصريف المياه المالحة يحد من كفاءته في التخفيف. تضمنت إعادة التكوين المقترحة، التي تتضمن تقليل عدد الفتحات مع الحفاظ على طول الموزع، تقليلًا في الملوحة يلبي المعايير بعد 300 متر من الانتشار. ردًا على هذه التحديات، استكشفت الدراسة تصميم أعمال التخفيف مثل قناة مفتوحة وحوض التخفيف.

إن دمج نظام المعلومات الجغرافية (SIG) مكن من تراكب نتائج المحاكاة على خرائط واقعية، مما يوفر بذلك تصورًا دقيقًا وسياقًا للتأثيرات البيئية لتصريف المحلول الملحي وتطوير توصيات لتحسين إدارة التصريف. لقد أثبتت التعديلات المقترحة فعاليتها، حيث خففت التركيز الزائد للمحلول الملحي من 6 جرام/لتر إلى 1.8 جرام/لتر عند نقطة الضخ لمحطة تحلية المياه تنس.

يوفر هذا العمل فهمًا عميقًا للآثار البيئية لمخلفات محطتين لتحلية المياه في الجزائر، بالإضافة إلى الحلول العملية لتقليل هذه الآثار مع ضمان الكفاءة التشغيلية للمرافق.

الكلمات مفتاحية: تحلية، الجزائر، تنس، مقطع، محلول الملح، آثار، بيئة، موزع، بحر، CORMIX، SIG.

Abstract

In the current context where Algeria, like many arid regions, is facing an increasing water shortage, seawater desalination represents a vital solution. However, this technology poses a major environmental challenge in managing brine discharges. This study focuses on analyzing the brine discharge systems of two desalination plants in Algeria, Ténès and Magtaa. Our approach relies on modeling using the CORMIX (Cornell Mixing Expert System) code, taking into account meteorological variations and the position of the water intake point. The goal is to evaluate the performance of the discharge systems and analyze the interaction between brine discharges and intake waters.

We observed a significant increase in salinity, sometimes reaching 42 g/l, in the water catchment zone of the Ténès desalination station due to inadequate dilution of brine discharge. In contrast, simulation results demonstrated the effectiveness of the underwater diffuser dilution at the Magtaa station. We also identified that the close proximity of the diffuser outlets limits its dilution efficiency. A proposed reconfiguration, involving reducing the number of orifices while maintaining the length of the diffuser, resulted in reduced salinity meeting the standards after 300 meters of dispersion. In response to these challenges, the study explored the sizing of dilution structures such as a trapezoidal open-channel and a dilution basin. These solutions aim to optimize dispersion.

The integration of the Geographic Information System (GIS) allowed for the overlaying of simulation results on real maps, thus providing a precise and contextual visualization of the environmental impacts of brine discharge and the development of recommendations for improving discharge management. The suggested adjustments have proven effective, reducing the excess brine concentration from 6 g/L to 1.8 g/L at the intake point of the Ténès desalination station.

This work provides an in-depth understanding of the environmental implications of brine discharges from two desalination stations in Algeria, along with practical solutions to minimize these impacts while ensuring the operational efficiency of the facilities.

Keywords : desalination, Algeria, Tenes, Magtaa, brine, impacts, environment, diffuser, sea, Cormix, GIS.

Résumé

Dans le contexte actuel où l'Algérie, comme de nombreuses régions arides, fait face à une pénurie d'eau croissante, le dessalement de l'eau de mer représente une solution vitale. Cependant, cette technologie pose le défi environnemental majeur de gestion des rejets de saumure. Cette étude se concentre sur l'analyse des systèmes de rejet de saumure de deux stations de dessalement en Algérie, Ténès et Magtaa. Notre approche repose sur une modélisation utilisant le code CORMIX (Cornell Mixing Expert System) prenant en compte les variations météorologiques et la position du point de prélèvement d'eau. L'objectif est d'évaluer les performances des systèmes de rejet et d'analyser l'interaction entre les rejets de saumure et les eaux de captage.

Nous avons constaté une augmentation considérable de la salinité, atteignant parfois 42 g/l, au niveau de la zone de captage des eaux de la station de dessalement de Ténès en raison d'une dilution insuffisante du rejet de saumure. En revanche, les résultats de la simulation ont démontré l'efficacité de la dilution du diffuseur sous-marin de la station de Magtaa. Nous avons également identifié que le rapprochement des orifices de ce diffuseur limite son rendement de dilution. Une reconfiguration proposée, consistant à réduire le nombre d'orifices tout en conservant la longueur du diffuseur, a abouti à une salinité réduite respectant les normes après 300 mètres de dispersion. En réponse à ces défis, l'étude a exploré le dimensionnement d'ouvrages de dilution tels qu'un canal trapézoïdal à surface libre et un bassin de dilution.

L'intégration du Système d'Information Géographique (SIG) a permis de superposer les résultats de simulation sur des cartes réelles, offrant ainsi une visualisation précise et contextuelle des impacts environnementaux des rejets de saumure et l'élaboration des recommandations pour améliorer la gestion des rejets. Les ajustements suggérés ont prouvé leur efficacité, réduisant la concentration excédentaire de saumure de 6 g/l à 1,8 g/l au point de captage de la station de Ténès.

Ce travail fournit une compréhension approfondie des implications environnementales des rejets de saumures des stations de deux dessalements en Algérie, ainsi que des solutions pratiques pour minimiser ces impacts tout en assurant l'efficacité opérationnelle des installations.

Mot clé : dessalement, Algérie, Tenes, Megtaa, saumure, impacts, environnement, diffuseur, mer, Cormix, SIG, ouvrages de dilution.

Liste des abréviations :

ANBT : Agence nationale des barrages et transfère

BW : Brackish Water

CORMIX : Cornel Mixing Zone Expert System

ED : Electrodialyse

EDMB : L'électrodialyse à membranes bipolaires

EM : L'électrodialyse à membranes

Km : Kilomètre

MATE : Ministère de l'aménagement du territoire Et de l'environnement

MED : Distillation à effets multiples

MSF : Distillation par détente à étages multiples (flash)

MVC : Mechanical Vapor Compression

OMI : Organisation maritime internationale

OMS : Organisation mondiale de la santé

Psu: Practical Salinity Unit

RO : revers osmosis

SDEM : Station de dessalement de l'eau de mer

SEAAL : Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger

STEP : Station d'épuration

SW : Seawater

SWRO : Seawater reverse osmosis

TAC : titre alcalimétrique Complet

TDS : Total Dissolved Solids

TH : titre hydrotimétrique

UF : Ultrafiltration

VC : Vapor compression

ZLD : Zéro liquid discharge

Table des matières :	
ملخص	3
Abstract.....	4
Résumé.....	5
Liste des abréviations :	6
Table des matières :	7
Liste des figures.....	10
Liste des tableaux.....	13
Introduction générale :	15
Chapitre I: Bilan hydrique et recours au dessalement	19
I.1 Introduction :	19
I.2 Le changement Climatique Mondial :	19
I.2.1 Bases Scientifiques du Changement Climatique.....	20
I.2.2 Impacts, Adaptation et Vulnérabilité.....	20
I.2.3 Atténuation du Changement Climatique	20
I.3 Relation entre le Changement Climatique et le Dessalement	21
I.4 Changement Climatique en Algérie et Problématique de l'Eau.....	21
I.4.1 Impacts du Changement Climatique en Algérie	22
I.5 Problématique de l'Eau Liée au Changement Climatique	22
I.5.1 Défis Actuels	22
I.5.2 Stratégies et Solutions	23
I.6 Le dessalement à l'échelle nationale et mondiale :	24
I.6.1 Introduction :	24
I.6.2 La nécessité du dessalement de l'eau de mer :	26
I.6.3 Les pays producteurs d'eau douce dans le monde :	27
I.7 Le dessalement en Algérie :	28
I.7.1 Les stations monoblocs :	29
I.7.2 Les grandes stations de dessalement en Algérie :	31
Chapitre II: Techniques de dessalement de l'eau de mer	33
II.1 Introduction :	33
II.2 Définition du dessalement :	33
II.3 Classification des différents procédés de dessalement.....	33
II.3.1 Les procédés thermiques.....	35
II.3.2 Technique membranaire :	38
II.4 Description des différents composants	41
II.5 Procédés de prise d'eau de mer	45
II.5.1 Prise par puits côtiers	45
II.5.2 Prise par puits maritimes ou champs drainants.....	46
II.5.3 Prise directe.....	47

II.6	Les membranes	49
II.6.1	Définition de la membrane	49
II.6.2	Matériaux constitutifs	49
II.7	Les modules	51
II.7.1	Les modules tubulaires	51
II.7.2	Les modules fibres creuses	51
II.7.3	Les modules plans.....	52
II.7.4	Les modules spirales.....	53
II.8	Les différents systèmes membranaires	54
II.8.1	Système de filtration membranaire sous pression	54
II.8.2	Système à membranes immergées	55
II.8.3	Principes de maintenance pour conserver l'intégrité des membranes.....	56
II.8.4	Prévention du colmatage.....	58
II.8.5	Techniques de nettoyage des membranes.....	59
II.9	Rejets du procédé	59
II.10	Apport d'un suivi à long terme	60
II.10.1	Limites des procédés membranaires.....	60
II.10.2	Contrôle du colmatage et de la polarisation de concentration	61
II.11	Comparaison entre osmose inverse et distillation	62
II.11.1	Procédés hybrides	63
II.12	Autres procédés	64
II.12.1	Congélation.....	64
II.12.2	Séparation par formation d'hydrates.....	64
II.12.3	Échange d'ions.....	64
II.12.4	Chauffage solaire	65
II.12.5	Dessalements par les réacteurs nucléaires	65
II.12.6	Dessalements par les énergies renouvelables	65
II.13	Conclusion	65
Chapitre III:	Impact des rejets de saumure sur le milieu marin	68
III.1	Introduction	68
III.2	Compréhension des Rejets de Saumures	68
III.3	Origine des Saumures :	69
III.4	Composition Chimique des Saumures :	69
III.5	Impacts positifs du dessalement :	70
III.6	Impacts négatifs des rejets de saumures :	71
III.7	Rejets de produits chimiques	72
III.8	Impacts des rejets en mer	76
III.9	L'influence de l'énergie dégagée par le dessalement sur la de l'air	79
III.10	Moyens pour réduire les impacts des rejets en mer	80
III.11	Indicateurs de suivi des rejets de stations de dessalement	81

III.12 Impacts énergétiques	83
III.12.1 Origine de la consommation d'énergie.....	83
III.12.2 Coût d'énergie	84
III.13 Impacts atmosphériques	86
III.14 Conclusion.....	86
Chapitre IV: Gestion et valorisation des rejets de saumure	88
IV.1 Introduction :	88
IV.2 Réglementation et Normes :.....	88
IV.2.1 Réglementations Nationales :	88
IV.2.2 Réglementations Internationales :.....	89
IV.3 Méthodes actuelles d'élimination de la Saumure :	89
IV.3.1 Rejet direct.....	89
IV.3.2 Rejet dans les égouts des eaux usées	90
IV.3.3 Injection dans un puits profond	91
IV.3.4 Bassins d'évaporation	91
IV.3.5 Évaluation et comparaison des méthodes d'élimination de la saumure	92
IV.4 Approche de traitement de la saumure et zéro rejet de liquide (ZLD)	93
IV.5 Méthodes de Gestion de Saumures :	94
IV.5.1 Techniques de Dilution et Dispersion :.....	94
IV.5.2 Options de Réutilisation et Récupération d'Énergie :	94
IV.5.3 La méthode SOL-BRINE :	94
IV.6 Exemple de Cas en Gestion des Rejets de Saumures :	95
IV.6.1 La Station de Dessalement de Perth, Australie.....	95
IV.6.2 L'Usine de Dessalement d'Al Jubail, Arabie Saoudite :	96
IV.6.3 L'Usine de Dessalement de Carlsbad, Californie, États-Unis :.....	97
IV.7 Recommandations et Perspectives :	98
IV.7.1 Recommandations :.....	98
IV.7.2 Perspectives Futures	102
IV.8 Conclusion :	108
Chapitre V: Optimisation des Systèmes de Rejet des Stations de Dessalement	111
V.1 Introduction :	111
V.2 Présentation de la zone d'étude	112
V.2.1 Situation géographique de Ténès	112
V.2.2 Situation géographique et la topographie de la station de dessalement.....	112
V.2.3 Topographie du site	113
V.3 Présentation de l'unité de dessalement de l'eau de mer (Ténès)	113
V.3.1 La captation de l'eau de mer.....	114
V.3.2 System de rejet des eaux de saumure :	115
V.4 Matériels et méthodes	115
V.4.1 Modèle CORMIX.	115
V.4.2 Utilisation Conjointe de CORMIX et du SIG :.....	116

V.4.3	Paramètres de simulation :	117
V.5	Résultats et discussions.....	121
V.5.1	Diagnostic du comportement du diffuseur dans le milieu récepteur :	121
V.5.2	Améliorations et configuration alternative du diffuseur actuel :	128
V.5.3	Comparaison entre la dilution dans la configuration initiale et finale	134
V.5.4	Décalage du point de rejet	134
V.5.5	La station de Megtaa :	136
V.6	Dimensionnement des ouvrages de dilution	140
V.6.1	Présentation de zone d'étude	140
V.6.2	Canal trapézoïdal à surface libre.....	140
V.6.3	Le dimensionnement du canal	141
V.6.4	Système de pompage	141
V.6.5	Choix des pompes	142
V.6.6	Bassin de dilution.....	143
V.6.7	Dimensionnement du bassin	145
V.6.8	Dimensionnement du déversoir	145
V.6.9	Système de pompage	146
V.6.10	Choix des pompes :	146
V.7	Conclusion :	148
Chapitre VI:	Durabilité du Dessalement - Une Approche Durable et Sécurisée	150
VI.1	Introduction.....	150
VI.2	Cadre Théorique et Contexte.....	151
VI.3	Facteurs de Durabilité et de Sécurité.....	151
VI.3.1	Impact Environnemental.....	151
VI.3.2	Consommation Énergétique.....	151
VI.3.3	Gestion des Résidus	154
VI.3.4	Sécurité Opérationnelle.....	158
VI.4	Approches Innovantes et Technologies Durables	159
VI.4.1	Technologies d'Osiose Inverse de Nouvelle Génération	159
VI.4.2	Dessalement Assisté par Énergie Solaire.....	160
VI.4.3	Techniques d'Électrodialyse	160
VI.4.4	Systèmes de Pressurisation Osmotique.....	161
VI.4.5	Utilisation de l'Intelligence Artificielle (IA).....	161
VI.4.6	Développement de Matériaux Innovants	161
Conclusion générale :	164
Références bibliographiques :	166

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1: Taux de remplissage des barrages du 2006 au 2023 Source : ANBT	24
Figure I-2 : Utilisation de dessalement travers le monde (OMS & UNICEF, 2021).	25
Figure I-3 : Les pays producteurs d'eau douce dans le monde.....	27
Figure I-4: Répartition des stations de dessalement de l'eau de mer en l'Algérie.....	29

Chapitre II

Figure II-1 : Les procédés de dessalement selon différents principes	34
Figure II-2 : Les procédés de dessalement selon le type d'énergie consommée	34
Figure II-3: Comparaison des deux principales techniques.....	34
Figure II-4 : Schéma d'une usine de type MSF	35
Figure II-5 : Principe de distillation à simple effet.....	36
Figure II-6 : Distillation à effets multiples	37
Figure II-7 : Schéma d'une installation MVC	38
Figure II-8: Technique de l'électrodialyse.....	39
Figure II-9: Osmose naturelle	40
Figure II-10: Equilibre Osmotique	40
Figure II-11: Osmose inverse (OI).....	41
Figure II-12: Schéma de principe d'une usine d'osmose inverse	41
Figure II-13: Récupération d'énergie hydraulique	43
Figure II-14: Equipement d'un osmoseur	44
Figure II-15: Coupe type d'un puits de captage	45
Figure II-16: Coupe longitudinale type d'une tranchée drainante	46
Figure II-17: Prise d'eau directe en canal Côtier	47
Figure II-18: Prise d'eau directe en surface à travers une crépine.....	48
Figure II-19: Prise d'eau directe au fond de l'eau	48
Figure II-20: Membrane sélective.....	49
Figure II-21: Modules à fibres creuses	52
Figure II-22: Structure interne d'une membrane à spirale.....	53
Figure II-23: Système membranaires (Configuration multi étages)	54
Figure II-24: Système membranaires (Configuration avec circulation)	55
Figure II-25: Système à membranes immergées.....	55
Figure II-26: Séparation membranaire : concept de base	60
Figure II-27: Polarisation de concentration	61
Figure II-28: Schéma de principe des procédés hybrides	64

Chapitre III

Figure III-1: Rejet de saumure de la station de dessalement de Mainis	69
Figure III-2: Image de la Posidonie océanique	78
Figure III-3: Résultat d'expérience de croissance de Posidonie Australie.....	78
Figure III-4: Principaux postes de consommation d'énergie	84
Figure III-5: Production eaux de dessalement (m ³ /mois) Source : SEAAL.....	85
Figure III-6: Consommation d'énergie (kWh) Source : SEAAL	85

Chapitre IV

Figure IV-1 : Station de dessalement de Perth, Australie.....	95
Figure IV-2: Station de d'Al Jubail, Arabie Saoudite	96
Figure IV-3 : Station de Dessalement de Carlsbad, Californie, États-Unis	97

Chapitre V

Figure V-1: Localité de la station de dessalement de Mainis	113
Figure V-2: La gestion de la station de Mainis.....	114
Figure V-3: Conduites de captage de l'eau de mer de la station de Mainis.....	114
Figure V-4: point de rejet de la station de dessalement de Ténès.....	115
Figure V-5: Schéma du Processus d'Analyse des Rejets de CORMIX avec SIG	117
Figure V-6: Diffuseur de la station de Mainis -Image 3D sur CORMIX 11.0.....	118
Figure V-7: Image sur google Earth du point de rejet et de captage	119
Figure V-8: Carte des courbes à niveau des profondeurs sur SAS Planet.....	120
Figure V-9: Graphiques des dilutions en fonction de vitesses.....	122
Figure V-10: Graphiques des concentrations en fonction de vitesses.	123
Figure V-11: Affichage du panache du scénario N°1 sur CORMIX.....	124
Figure V-12:Présentation des résultats de simulation CORMIX de panache sur SIG	125
Figure V-13:Présentation des résultats de simulation CORMIX de panache sur SIG	125
Figure V-14:Affichage du panache du scénario N°2 sur CORMIX.....	126
Figure V-15: Affichage du panache du scénario N°2 sur CORMIX.....	127
Figure V-16:Affichage du panache du scénario N°3 sur CORMIX.....	127
Figure V-17: Affichage du panache du scénario N°3 sur CORMIX.....	128
Figure V-18: Graphiques des dilutions en fonction des différents diamètres des ports	128
Figure V-19: Présentation des résultats de simulation sur SIG	130
Figure V-20: Image 3D d'un diffuseur sur CORMIX	130
Figure V-21: Graphiques des concentrations (variation distance ports).....	131
Figure V-22: Graphiques de dilution (variation distance entre ports).	131
Figure V-23: Graph des concentrations (changement hauteur diffuseur).....	132
Figure V-24: Graphiques de dilution (changement hauteur du diffuseur).....	133
Figure V-25: Présentation des résultats de CORMIX GT 11 sur SIG.....	133
Figure V-26: Comparaison entre la dilution initiale et la dilution finale.....	134
Figure V-27: Position initiale A et finale B du point de captage sur SAS Planet	135
Figure V-28: Présentation des résultats de simulation de CORMIX sur SIG	136
Figure V-29: Diffuseur de la station de Magtaa en 3D.....	137
Figure V-30: carte lever bathymétrique de la conduite de rejet de Magtaa.....	138
Figure V-31: Graphiques comparatif des concentrations (Ténès et Magtaa)	138
Figure V-32: Graphique des concentrations (changement distance entre ports)	139
Figure V-33: Augmentation de distance entre les ports en élimination 30 ports.	140
Figure V-34:Schéma simplifié du déversoir	145

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I-2: Station Mono bloc en Algérie	30
Tableau I-3: Les grandes stations de dessalement en Algérie	31

Chapitre II

Tableau II-1: Techniques utilisées pour la vérification de l'intégrité des systèmes membranaires - Méthodes indirectes	56
Tableau II-2: Techniques utilisées pour la vérification de l'intégrité des systèmes membranaires - Méthodes directes	57

Chapitre III

Tableau III-1: Résultats d'analyse de rejet de saumure (SDEM Mainis-Algerie)	70
Tableau III-2: Propriétés chimiques des saumures de différentes sources mondial.	70
Tableau III-3: Caractéristiques des eaux produites et rejetées par le dessalement	72
Tableau III-4: Produits chimiques utilisés dans les procédés de dessalement	73

Chapitre V

Tableau V-1: Caractéristiques de la station de dessalement de MAINIS	118
Tableau V-2: Cas de vitesses environnementales étudiées	122
Tableau V-3: caractéristiques du scénario N°1	123
Tableau V-4 Scénario N°2	126
Tableau V-5 : Scénario N°3	127
Tableau V-6: Caractéristique du scénario N° 4	129
Tableau V-7: scénario N°2	131
Tableau V-8: Scénario N°3	132
Tableau V-9: tableau comparatif entre l'état initiale et finale du diffuseur	134
Tableau V-10: tableau comparatif entre la position initial et la position proposé :	135
Tableau V-11: Données d'entrée pour les simulations de CORMIX	136
Tableau V-12: changement de distance entre les ports	139
Tableau V-13: Calcul du canal II	141
Tableau V-14: Données du choix de la pompe	142
Tableau V-15: Caractéristique de la pompe	143
Tableau V-16: Caractéristique du bassin	145
Tableau V-17: Caractéristique du deversoir	146
Tableau V-18: Caractéristiques du choix de la pompe	146
Tableau V-19: Caractéristiques de la pompe KWP K	147

Introduction générale

Introduction générale :

La recherche de solutions durables face aux défis hydriques mondiaux a conduit à l'adoption généralisée du dessalement de l'eau de mer, une technologie qui transforme l'eau salée en eau douce. Avec plus de 16 000 usines de dessalement opérationnelles à travers le monde, produisant quotidiennement plus de 103 millions de m³ d'eau dessalée et 142 millions de m³ de saumure (Voutchkov, 2020), cette technologie joue un rôle crucial dans la sécurisation de l'approvisionnement en eau douce, particulièrement dans les régions arides et semi-arides. Cependant, l'osmose inverse étant la plus utilisée en raison de son efficacité énergétique et de son faible coût de production d'eau douce (Shahzad et al., 2017; Sola et al., 2020), ce processus génère également une quantité significative de saumure, un sous-produit à haute concentration saline comprises entre 40 et 90 g/L (Fernández-Torquemada et al., 2019 ; Sola et al., 2020) qui, s'il n'est pas géré de manière adéquate, peut avoir des effets délétères sur les écosystèmes marins et côtiers. La gestion efficace de ces rejets est donc devenue un enjeu environnemental majeur, nécessitant des solutions innovantes pour minimiser leur impact.

L'Algérie se trouve au cœur de cette problématique. Dotée de 13 grandes stations de dessalement opérationnelles le long de son littoral de 1200 km, le pays est un acteur majeur dans le domaine du dessalement en Méditerranée. Générant chaque jour plus de 2,4 millions de m³ de saumure, l'Algérie est confrontée à la nécessité de développer des stratégies efficaces pour la gestion de ces rejets dans un contexte de protection environnementale et de durabilité.

Ce travail de recherche s'inscrit dans cette perspective, en se concentrant spécifiquement sur l'analyse des systèmes de rejet de saumure de deux importantes stations de dessalement en Algérie, Ténès et Magtaa utilisant le code CORMIX. À travers une approche méthodologique rigoureuse, comprenant la modélisation environnementale avancée et l'utilisation du Système d'Information Géographique (SIG), cette étude vise à évaluer l'efficacité des systèmes de rejet actuels et à proposer des améliorations significatives pour réduire l'impact environnemental des rejets de saumure, une attention particulière est portée à l'étude des méthodes de traitement des effluents industriels, en particulier celles impliquant l'utilisation d'ouvrages de dilution. Ces ouvrages jouent un rôle crucial dans le processus de dilution des saumures avant leur rejet dans le milieu marin, en permettant leur mélange avec les eaux de mer. Cette pratique vise à minimiser l'impact environnemental tout en assurant la conformité aux normes réglementaires. Une analyse approfondie de ces

techniques sera abordée dans les sections suivantes, mettant en lumière leur importance dans la préservation de l'écosystème marin et la protection de la santé publique.

Des travaux récents dans le domaine du dessalement mettent en lumière les impacts complexes et étendus de ces rejets de saumure. (Amitouche et al., 2022) Ont utilisé des simulations numériques pour explorer les effets du rejet de saumure de dans la station de FOUKA en Algérie. Leurs découvertes révèlent que les anomalies de salinité se propagent autour de point de captage des eaux, affectant potentiellement la circulation sur la plateforme continentale et nécessitant une évaluation approfondie des impacts environnementaux.

Dans le même esprit, (Pereira et al., 2021) ont analysé les rejets de saumure dans la région de Fortaleza, au Brésil, en utilisant une combinaison de modèles pour évaluer la dilution à la fois dans le champ proche et lointain. Leurs résultats suggèrent que l'installation d'une usine de dessalement proposée n'altérerait pas significativement la qualité de l'eau, corroborant ainsi l'importance d'une modélisation environnementale précise pour informer les décisions de planification et de gestion.

Parallèlement, (Purnama et al., 2011) ont effectué des simulations CORMIX pour examiner les rejets de saumure chauffée et concentrée de l'usine de Barka, constatant que les normes de qualité de l'eau étaient respectées dans la zone réglementaire. Cependant, ils soulignent la nécessité de surveiller l'impact potentiel sur le benthos, indiquant l'importance d'une évaluation environnementale holistique.

Ces études récentes illustrent l'importance cruciale de la modélisation environnementale et des évaluations d'impact pour comprendre et atténuer les effets des rejets de saumure. Notre recherche s'inscrit dans cette lignée, en se concentrant sur l'analyse des systèmes de rejet de saumure des stations de dessalement en Algérie, Ténès et Magtaa, à travers une modélisation avancée utilisant le code CORMIX. À travers une approche méthodologique rigoureuse, comprenant l'utilisation du Système d'Information Géographique (SIG).

L'intégration du Système d'Information Géographique (SIG) a enrichi notre analyse en permettant une superposition précise de nos résultats de simulation sur des cartes réelles. Cette approche novatrice a offert une visualisation détaillée des interactions entre les rejets de saumure et l'environnement marin, facilitant ainsi l'élaboration de recommandations ciblées pour améliorer les pratiques de gestion des rejets, Cette étude vise à évaluer l'efficacité des systèmes de rejet actuels et à proposer des améliorations significatives pour réduire l'impact environnemental des rejets de saumure.

Introduction générale

En naviguant à travers les différents chapitres de cette thèse, nous explorerons en profondeur les techniques de dessalement, les impacts environnementaux des rejets de saumure, ainsi que les stratégies de gestion et de valorisation possibles. Cette recherche aspire non seulement à contribuer à la littérature existante sur le dessalement mais également à proposer des pratiques plus respectueuses de l'environnement, promouvant une gestion durable des ressources en eau dans les régions arides et au-delà.

Chapitre I:

Bilan hydrique et recours au dessalement

Chapitre I: Bilan hydrique et recours au dessalement

I.1 Introduction :

La crise mondiale de l'eau est un phénomène majeur qui préoccupe les gouvernements, les organisations internationales et la communauté scientifique. Elle est caractérisée par une diminution de la disponibilité en eau douce, due à la croissance démographique, à l'urbanisation, à l'industrialisation, à l'agriculture intensive et aux changements climatiques. Selon les experts, cette crise pourrait s'aggraver dans les décennies à venir, entraînant des conséquences économiques, sociales et environnementales graves.

Les chiffres parlent d'eux-mêmes : environ 2,2 milliards de personnes dans le monde n'ont pas accès à de l'eau potable et 4,2 milliards n'ont pas accès à des installations sanitaires adéquates. Les régions les plus touchées par la crise de l'eau sont l'Afrique, le Moyen-Orient, l'Asie centrale, l'Inde et la Chine. Les sécheresses, les inondations, les pollutions des cours d'eau et des nappes phréatiques, la surexploitation des ressources en eau et la concurrence entre les usages sont autant de facteurs qui contribuent à cette crise (OMS & UNICEF, 2021).

Face à cette situation, de nombreuses solutions ont été proposées pour tenter de répondre à la demande en eau douce. Parmi celles-ci, le dessalement de l'eau de mer, la réutilisation des eaux usées traitées, la gestion intégrée des ressources en eau, la réduction de la consommation d'eau et l'amélioration de l'efficacité des systèmes d'irrigation.

La crise mondiale de l'eau est un défi majeur pour l'humanité, qui nécessite une action collective et coordonnée à l'échelle mondiale. Il est essentiel de promouvoir une gestion durable des ressources en eau, en prenant en compte les dimensions économiques, sociales et environnementales de cette question cruciale pour l'avenir de la planète.

I.2 Le changement Climatique Mondial :

Le changement climatique est une menace globale qui requiert une attention immédiate et concertée. Le sixième rapport d'évaluation (AR6) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2023), publié entre 2021 et 2023, présente une analyse exhaustive des bases scientifiques du changement climatique, de ses impacts observés et projetés, ainsi que des stratégies nécessaires pour atténuer ses effets et s'y adapter. Une compréhension approfondie de ces éléments est essentielle pour élaborer des politiques efficaces et durables.

I.2.1 Bases Scientifiques du Changement Climatique

Le rapport du Groupe de Travail I (GTI) du GIEC confirme sans équivoque que le réchauffement climatique est dû aux activités humaines, principalement les émissions de gaz à effet de serre (GES) tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O). Depuis la période préindustrielle, la température moyenne globale a augmenté d'environ 1,1°C. Cette augmentation de température a engendré des changements significatifs dans le système climatique, notamment la fonte des glaciers et des calottes glaciaires, l'élévation du niveau de la mer, et des modifications des régimes de précipitations. Les modèles climatiques utilisés par le GIEC projettent que, sans réduction substantielle des émissions, le réchauffement pourrait atteindre 1,5°C d'ici 2030 et dépasser 2°C d'ici la fin du siècle.

I.2.2 Impacts, Adaptation et Vulnérabilité

Le Groupe de Travail II (GTII) se concentre sur les impacts du changement climatique sur les systèmes humains et naturels, ainsi que sur les capacités d'adaptation des sociétés et des écosystèmes. Les impacts observés incluent une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes tels que les vagues de chaleur, les sécheresses, les inondations et les cyclones tropicaux. Ces événements causent des pertes économiques significatives, des déplacements de populations et des crises sanitaires. Les écosystèmes naturels, notamment les coraux, les forêts, les zones humides et les systèmes arctiques, sont particulièrement vulnérables. La perte de biodiversité et la perturbation des cycles de vie des espèces sont quelques-uns des effets observés.

L'adaptation au changement climatique est cruciale pour réduire la vulnérabilité des sociétés et des écosystèmes. Le GTII propose des stratégies d'adaptation incluant l'amélioration des infrastructures résilientes, la gestion durable des ressources en eau, la protection des écosystèmes et l'intégration des considérations climatiques dans les politiques de développement. Cependant, les capacités d'adaptation varient considérablement selon les régions et les communautés, en fonction de leur niveau de développement, de leurs ressources et de leur gouvernance.

I.2.3 Atténuation du Changement Climatique

Le Groupe de Travail III (GTIII) se concentre sur les moyens de réduire les émissions de GES et d'atténuer le changement climatique. Pour limiter le réchauffement à 1,5°C ou 2°C au-dessus des niveaux préindustriels, il est nécessaire de réduire les émissions globales de GES de manière rapide et drastique. Le rapport GTIII explore diverses stratégies pour

atteindre cet objectif, incluant la transition vers les énergies renouvelables, l'amélioration de l'efficacité énergétique, le développement de technologies de capture et de stockage du carbone, et la promotion de modes de consommation et de production durables. La coopération internationale est cruciale pour la mise en œuvre des mesures d'atténuation, avec des accords comme l'Accord de Paris fournissant un cadre pour les actions concertées.

I.3 Relation entre le Changement Climatique et les Rejets des Stations de Dessalement

Les stations de dessalement jouent un rôle de plus en plus important dans la fourniture d'eau douce, surtout dans les régions arides et semi-arides. Cependant, leur fonctionnement et leurs rejets ont des implications pour le changement climatique et les écosystèmes marins.

Les stations de dessalement consomment une quantité significative d'énergie, souvent provenant de sources fossiles, ce qui contribue aux émissions de GES. L'utilisation de technologies de dessalement plus efficaces et le passage à des sources d'énergie renouvelable sont essentiels pour minimiser cet impact. Les stations de dessalement peuvent également être affectées par les impacts du changement climatique, tels que l'élévation du niveau de la mer et les variations de la salinité de l'eau.

Les rejets des stations de dessalement, principalement la saumure concentrée, peuvent augmenter la salinité locale de l'eau de mer et affecter la faune et la flore marine. Les stratégies de gestion durable des rejets, telles que la dilution avant le rejet et l'utilisation de la saumure pour extraire des minéraux utiles, peuvent aider à atténuer ces impacts.

Le changement climatique mondial pose des défis complexes nécessitant une action urgente et coordonnée. Le sixième rapport d'évaluation du GIEC fournit une base solide de connaissances scientifiques pour informer les décisions politiques et les actions visant à atténuer les effets du changement climatique et à s'y adapter. La réduction des émissions de GES, le renforcement des capacités d'adaptation et la promotion du développement durable sont essentiels pour garantir un avenir résilient face aux impacts du changement climatique. Les stations de dessalement, bien qu'importantes pour la sécurité en eau, doivent être gérées de manière à minimiser leur impact sur le climat et les écosystèmes marins.

I.4 Changement Climatique en Algérie et Problématique de l'Eau

Le changement climatique est une réalité mondiale ayant des répercussions spécifiques sur chaque région, et l'Algérie ne fait pas exception. Ce pays nord-africain,

caractérisé par un climat aride à semi-aride, fait face à des défis uniques liés au changement climatique, particulièrement en ce qui concerne la disponibilité et la gestion des ressources en eau. Les impacts du changement climatique en Algérie se manifestent par des modifications des régimes de précipitations, des vagues de chaleur plus fréquentes et intenses, et une augmentation de l'évapotranspiration, ce qui exacerbe la problématique de l'eau.

I.4.1 Impacts du Changement Climatique en Algérie

Selon les rapports récents, notamment ceux de Le Ministère de l'Environnement et des Energies Renouvelables en octobre 2023 (MEER, 2023), l'Algérie a enregistré une tendance au réchauffement au cours des dernières décennies. La température moyenne a augmenté d'environ 1,5°C depuis les années 1960, avec des projections indiquant une hausse supplémentaire de 2 à 3°C d'ici 2050 si les émissions de gaz à effet de serre (GES) continuent à augmenter à un rythme soutenu.

Les régimes de précipitations ont également été affectés, avec une réduction des précipitations annuelles et une variabilité accrue. Cette diminution des précipitations, couplée à une augmentation des événements météorologiques extrêmes tels que les sécheresses prolongées et les inondations soudaines, pose de sérieux défis à la gestion de l'eau et à l'agriculture, qui est un secteur clé de l'économie algérienne.

I.5 Problématique de l'Eau Liée au Changement Climatique

L'Algérie est un pays confronté à une rareté structurelle de l'eau. Avec une disponibilité en eau douce par habitant bien en dessous du seuil de stress hydrique, le changement climatique exacerbe cette situation en affectant les ressources en eau superficielles et souterraines. Les nappes phréatiques, qui sont une source cruciale d'eau douce, voient leur recharge diminuée en raison de la baisse des précipitations et de l'augmentation de l'évapotranspiration.

I.5.1 Défis Actuels

1. **Diminution des Ressources en Eau** : La réduction des précipitations et l'augmentation de la température entraînent une diminution des ressources en eau disponibles. Les rivières et les barrages voient leurs niveaux d'eau baisser, affectant la distribution de l'eau pour l'irrigation, l'industrie et la consommation domestique.
2. **Augmentation de la Demande** : La croissance démographique et le développement économique augmentent la demande en eau. Les besoins en eau pour l'agriculture,

qui consomme environ 70% des ressources en eau du pays, sont particulièrement élevés.

3. **Salinisation des Sols et des Eaux** : L'utilisation intensive des nappes phréatiques entraîne une salinisation progressive, affectant la qualité de l'eau et la fertilité des sols agricoles, ce qui réduit les rendements et menace la sécurité alimentaire.

I.5.2 Stratégies et Solutions

Pour faire face à ces défis, l'Algérie a adopté plusieurs stratégies et initiatives visant à améliorer la gestion de l'eau et à atténuer les impacts du changement climatique.

1. **Développement des Infrastructures Hydrauliques** : La construction de barrages et de réservoirs pour stocker l'eau pendant les périodes de pluies est essentielle. Des projets de transfert inter-bassins permettent de redistribuer l'eau des régions excédentaires vers les régions déficitaires.
2. **Dessalement de l'Eau de Mer** : Compte tenu des limitations des ressources en eau douce, l'Algérie investit dans des technologies de dessalement pour fournir de l'eau potable. Cependant, ces installations doivent être gérées de manière à minimiser leur impact environnemental et énergétique.
3. **Gestion Durable des Ressources en Eau** : La mise en œuvre de pratiques agricoles durables, telles que l'irrigation au goutte-à-goutte, et la promotion de cultures résistantes à la sécheresse peuvent améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans l'agriculture.
4. **Politiques et Cadres Institutionnels** : Le gouvernement algérien a mis en place des politiques visant à renforcer la résilience face au changement climatique. Cela inclut l'intégration des considérations climatiques dans les plans de développement national et la promotion de la recherche scientifique pour mieux comprendre et prévoir les impacts du changement climatique.

Le changement climatique pose des défis complexes à la gestion des ressources en eau en Algérie. Les impacts sur les précipitations, les températures et la disponibilité en eau exacerbent les problèmes existants et en créent de nouveaux. Des efforts concertés pour développer des infrastructures adaptées, promouvoir des technologies durables et mettre en œuvre des politiques efficaces sont essentiels pour assurer un avenir résilient face aux changements climatiques. Les stratégies d'adaptation et de gestion durable des ressources en eau sont cruciales pour protéger les écosystèmes, soutenir l'agriculture et garantir la sécurité en eau pour les générations futures.

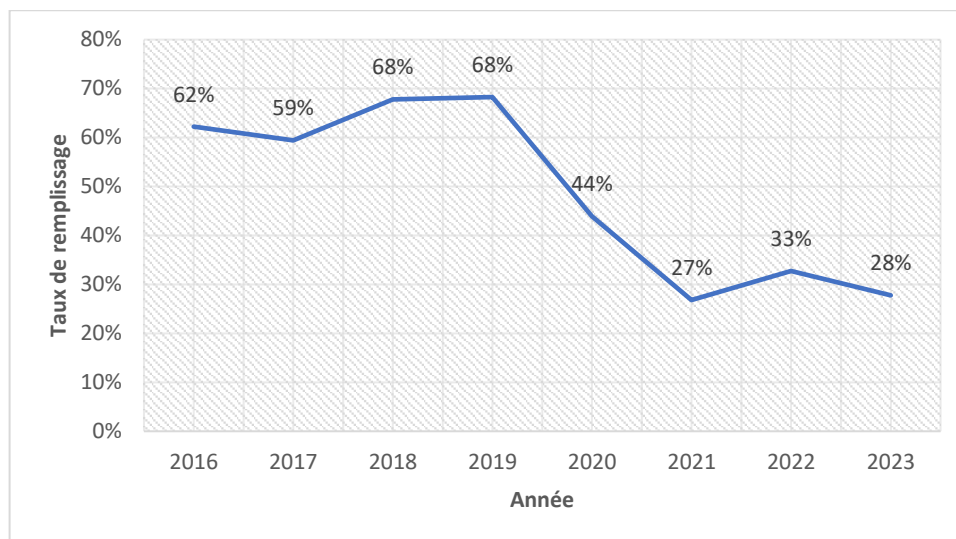


Figure I-1: Taux de remplissage des barrages du 2006 au 2023 Source : ANBT

La figure (figure I-1) ci-dessus présente de manière succincte les taux de remplissage des barrages de la région Cheliff Zahrez de l'année 2016 à 2023, tandis que la courbe d'évolution ci-jointe met en lumière la tendance générale au cours de cette période.

L'observation de la courbe révèle une tendance descendante marquée, soulignant une diminution constante du taux de remplissage des barrages au fil de ces années. Cette tendance s'aligne étroitement avec les conditions de sécheresse persistante pendant cette période.

Les données indiquent un déclin significatif des réserves d'eau dans les barrages, soulignant les défis liés à la gestion des ressources hydriques face à des conditions climatiques défavorables. Ces chiffres soulignent l'impact direct de la sécheresse sur la disponibilité des ressources en eau, soulignant la nécessité de politiques de gestion de l'eau adaptées pour faire face à de telles variations climatiques.

I.6 Le dessalement à l'échelle nationale et mondiale :

I.6.1 Introduction :

Depuis plusieurs années, dans le monde, un manque d'eau commence à se faire sentir, Ce manque d'eau est dû à plusieurs facteurs : un accroissement démographique important, avec augmentation de 50% de la population en 50 ans ce qui engendre une augmentation considérable en demande d'eau potable par habitant.

En 2050 nous seront plus de 10 milliards sur Terre et 60% de la population mondiale vivra dans des régions connaissant un fort stress hydrique, pourtant plus de 40 % de la population vit à proximité des côtes (figure I-2).

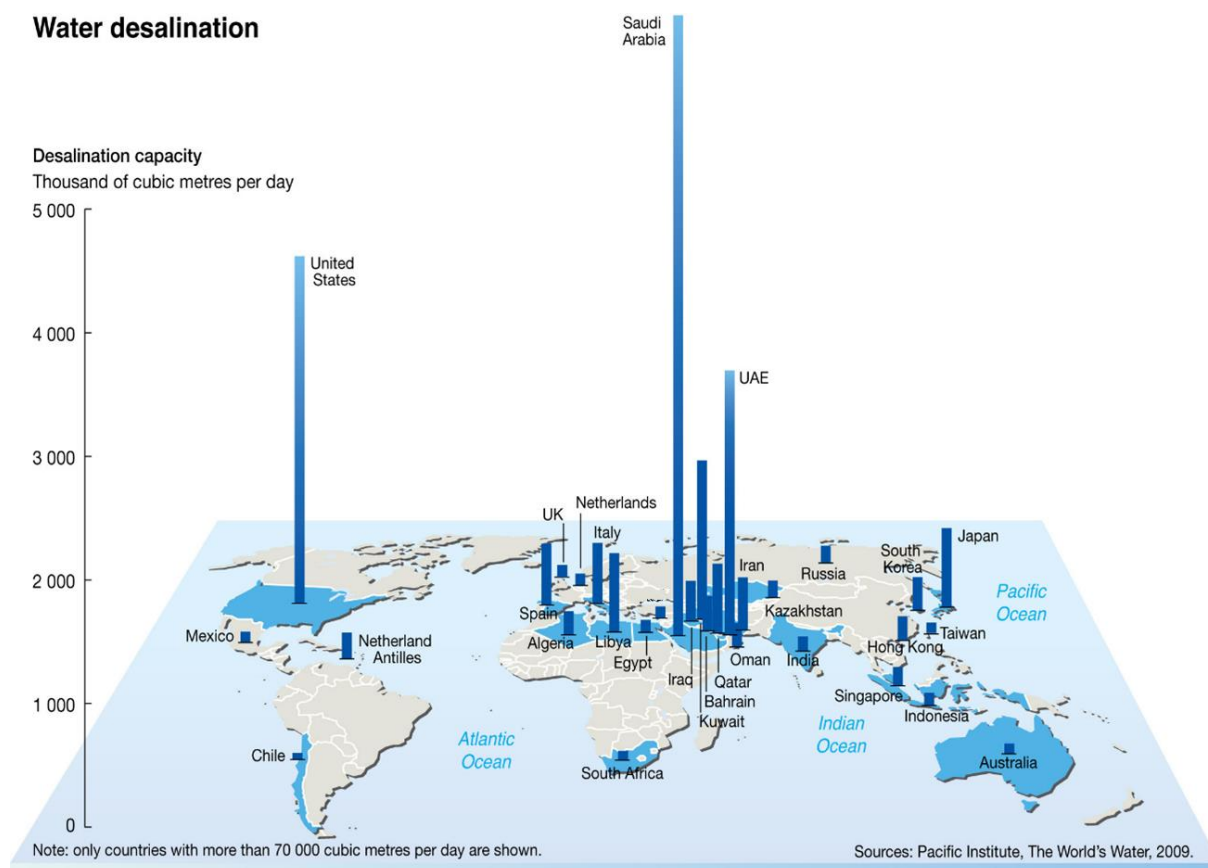


Figure I-2 : Utilisation de dessalement travers le monde (OMS & UNICEF, 2021).

Afin de satisfaire cette demande en eau qui ne cesse d'accroître, la quasi-totalité des eaux douces naturelles disponibles sont exploitées, sauf que ces quantités restent insuffisantes. En effet, bien que les $\frac{3}{4}$ de la surface de notre planète soient recouverts d'eau, seulement deux centièmes de cette dernière sont exploitables. Le reste, qui ne représente pas moins de 98% est non potable ou salée, ce qui fait d'elle une ressource inutilisable, ou du moins, avant que des experts ne pensent à trouver le moyen de l'exploiter, il y a de cela quelques décennies.

Aujourd'hui, Face aux besoins d'eau douce dans le monde, pour la consommation des populations, l'irrigation, et le développement touristique, il parait fort séduisant et même logique d'avoir recours au dessalement de l'eau de mer. En effet, le dessalement des eaux de mer ou des eaux saumâtres constitue l'une des réponses possibles pour faire face aux crises et pénuries d'eau.

En Méditerranée, la production artificielle d'eau douce par dessalement d'eau de mer ou d'eau saumâtre souterraine a débuté principalement dans des situations d'isolement insulaire (Malte, Baléares, Chypre...), littorales (Libye) et désertiques (Maghreb). Ces productions industrielles d'eau ont progressé régulièrement en volume et en performance. Les techniques sont aujourd'hui bien maîtrisées et en progrès, mais leur mise en œuvre

requiert d'importantes quantités d'énergie, sous forme de chaleur ou d'électricité, coûteuses et sources d'émissions de gaz à effet de serre. (Global Water Intelligence, 2019)

I.6.2 La nécessité du dessalement de l'eau de mer :

Une quantité équivalente à 98% du stock d'eau de la planète est salée et seule une fraction correspondant à 2 % se compose d'eau douce. Environ 70% de cette eau douce de la planète est fixée dans les calottes glaciaires des pôles et une partie importante des 30% restants est constituée par des nappes aquifères souterraines de régions reculées. En effet, seule une fraction minuscule de l'eau douce (moins de 1% de l'eau douce totale, soit 0,007 % du stock d'eau mondial) est disponible dans les cours d'eau, les lacs et les réservoirs et est facilement accessible à l'homme pour son utilisation directe. En outre, la répartition spatiale et temporelle du stock et du débit d'eau douce est très inégale.

Par suite de l'extension des régions arides et aussi de l'utilisation intensive d'eau dans les zones urbaines du monde entier, il est fréquent que l'eau douce ne soit pas disponible dans les quantités souhaitées.

Par ailleurs, l'OMS, estime qu'en dessous du seuil de 2 500 m³ par habitant et par an, l'individu se trouve dans une situation de « vulnérabilité hydrique ».

Or, quand on regarde une carte des ressources en eau douce disponible, on voit que c'est déjà le cas pour plusieurs pays, alors qu'au contraire seuls quelques pays se partagent 60% des ressources. L'Amérique du Nord, le nord de l'Europe, l'Amérique du Sud, l'Afrique tropicale sont bien dotés. Mais en revanche, la plupart des États du Moyen-Orient, du Maghreb ou de l'Asie centrale sont dans une situation dite de « stress hydrique », c'est-à-dire qu'ils disposent par an de moins de 1500 m³ d'eau douce par habitant. (UNESCO, 2018)

La population mondiale poursuit sa croissance : 1 milliard d'habitants en 1800, 6 milliards 700 millions en 2008, soit 200 ans plus tard. Et sur ces 6 milliards 700 millions, un peu plus de 1 milliard de personnes, soit une personne sur six n'a pas d'accès à l'eau potable, ou même seulement à l'eau propre.

Les ressources en eau de la région méditerranéenne sont limitées, fragiles et menacées. Elles font déjà l'objet d'une exploitation intensive, notamment dans le sud et à l'Est où la saison sèche se caractérise par sa longueur, avec une pluviométrie annuelle faible.

De ce fait, nous pouvons résumer que le stress hydrique, l'accroissement de la population et la densité de population importante sur les côtes sont les principaux paramètres incitant à la production d'eau douce à partir du dessalement de l'eau de mer.

I.6.3 Les pays producteurs d'eau douce dans le monde :

En 2022, nous avons plus de 21000 usines (Marc-Antoine & Élise, 2022) de dessalement, construites ou en construction dans le monde et elles produisaient 103 millions de mètres cubes d'eau douce par jour. Soit 0,5% de la consommation mondiale, ou bien encore 100 fois la production quotidienne d'une ville comme Paris. (Figure I.3)

Les experts du secteur du dessalement estiment que le taux de croissance du marché atteindra 8,91 % par an en 2024. La demande en eau douce des pays en développement est l'un des principaux moteurs du marché mondial.

Les principaux pays producteurs d'eau douce par dessalement dans le monde sont : l'Arabie Saoudite, les Émirats Arabes Unis, les États-Unis, l'Espagne, le Koweït.

Ces pays étant suivis ensuite par l'Algérie, la Chine, le Qatar, le Japon et l'Australie, qui produisaient en 2008, entre 2% et 4% de l'eau dessalée dans le monde (Figure I-3).

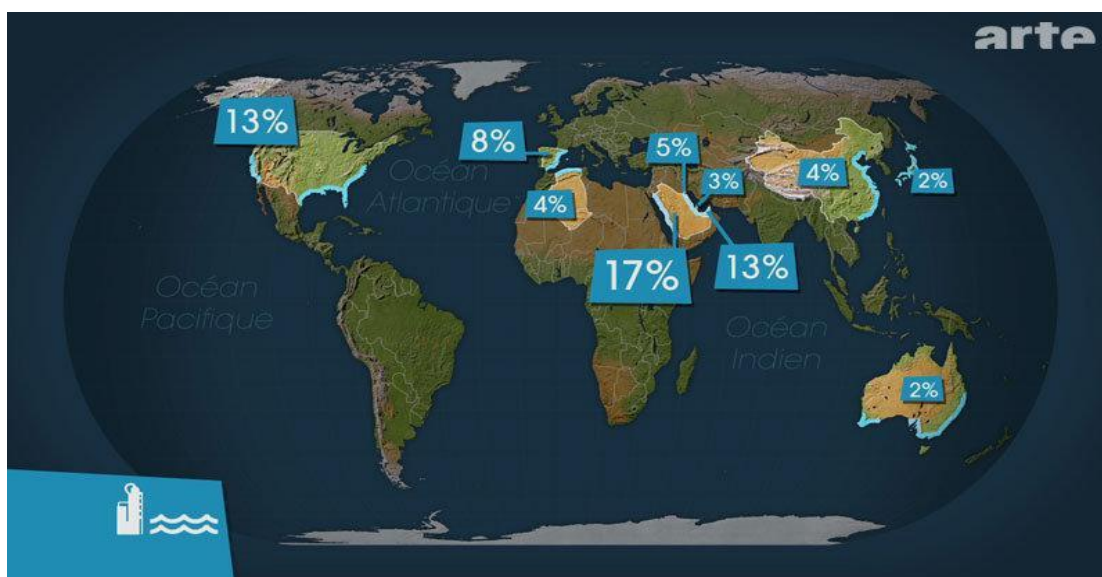


Figure I-3 : Les pays producteurs d'eau douce dans le monde

Le Moyen-Orient est le premier producteur d'eau douce : sa production cumule quelque 11 millions de mètres cubes par jour. Les pays de la région disposent d'importantes ressources en combustibles fossiles et utilisent majoritairement le procédé de vaporisation. (Voutchkov, 2020)

En Chine, Plus de la moitié des villes de la deuxième puissance mondiale est confrontée à des pénuries d'eau potable. Le pays développe de nombreuses initiatives dans le cadre de son douzième plan quinquennal pour le dessalement, qui vise à atteindre une production de 1,8 millions de mètres cubes par jour en 2021.

En Inde, Plus de 200 millions d'Indiens n'ont pas accès à l'eau potable. La demande en eau douce a été le véritable moteur du marché du dessalement, dans un pays où 85 % des usines utilisent la technologie du filtrage par membrane (osmose inverse).

Comme l'Algérie, les pays méditerranéens utilisent majoritairement l'osmose inverse pour dessaler l'eau de mer. La technique du dessalement de l'eau est répandue dans les pays arides comme ceux du Proche et Moyen-Orient, qui fournissent la moitié de la production mondiale d'eau dessalée. Dans certains pays qui ont souvent des pénuries d'eau durant les périodes chaudes, cette technique est la seule à disposition pour pouvoir se procurer de l'eau potable.

Par le coût élevé des installations, les pays pauvres, principales victimes du manque d'eau, n'ont pas les moyens de construire des usines de dessalement, de les approvisionner et de les entretenir. Néanmoins, il est probable que dans une dizaine d'années les usines de dessalement alimenteront plus de 300 millions de personnes dans le monde.

Selon l'Association Internationale du Dessalement (IDA), la capacité mondiale de production d'eau potable par dessalement était d'environ 103 millions de mètres cubes par jour en 2020. L'Arabie saoudite, les Émirats arabes unis, les États-Unis et la Chine devraient rester les leaders du marché, les nouveaux entrants (Espagne, Algérie, Australie, ...), plus sensibles au coût de l'énergie, stimuleront la baisse des tarifs et les innovations.

L'Espagne est au 4^{ème} rang mondial. Dans la plupart des pays méditerranéens, on anticipe que la quantité d'eau dessalée croîtra fortement. En effet, les ressources en eau renouvelable sont limitées, mais il y a abondance d'eau salée, et d'énergie à court terme dans les pays pétroliers riches. (Ghaffour et al., 2015)

I.7 Le dessalement en Algérie :

L'Algérie a subi plus d'une décennie une sécheresse accrue et ses ressources conventionnelles en eau se sont montrées insuffisantes pour subvenir aux besoins de son développement. Pour répondre aux exigences nationales en matière de ressources en eau, il a été décidé par les pouvoirs publics de faire recours au dessalement de l'eau de mer comme ressource stratégique fiable non assujettie aux risques de raréfaction.

La variante du dessalement de l'eau s'avère la solution convenable : le pays dispose de 1200 km de côtes sur la mer méditerranée. La première installation de dessalement remonte à l'année 1964 à Arzew, d'une capacité de 576 m³/j travaillant en Multiples effets.

L'installation de l'usine de Mostaganem en 1980 a été la plus grande du monde à cette époque, produisant environ 57 600 m³ /j.

Le littoral de l'Algérie compte 23 stations de dessalement d'eau de mer réparties sur les 14 wilayas côtières qui relèvent du Ministère des Ressources en Eau (MRE). Elles fournissent 18 % de l'eau consommée dans le pays et alimente 6 millions de personnes avec un volume de 2,26 millions m³/jour. (Figure 3).

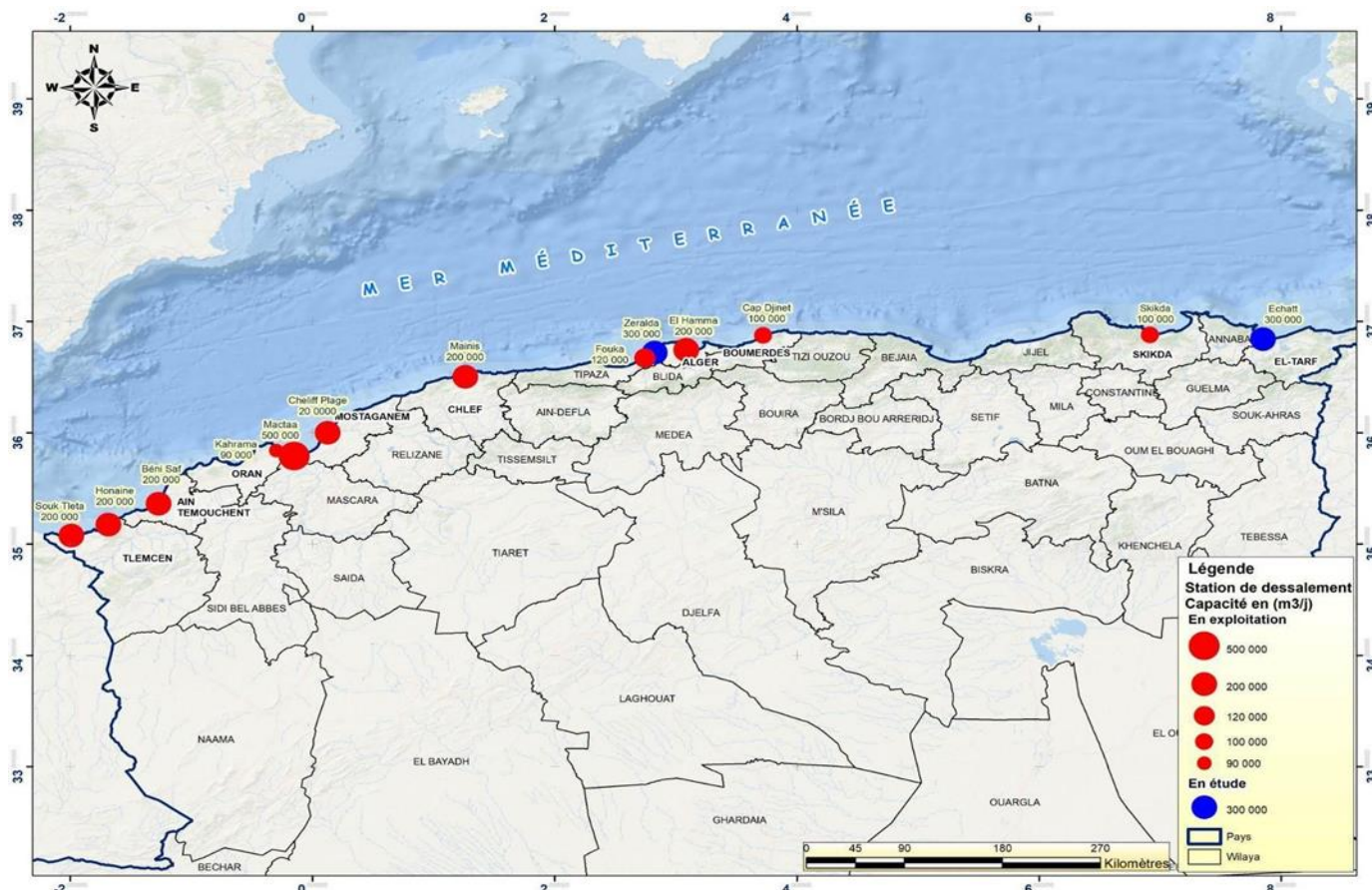


Figure I-4: Répartition des stations de dessalement de l'eau de mer en l'Algérie (Bouthiba et al., 2022)

I.7.1 Les stations monoblocs :

A l'issue de cette première expérience, considérée comme une réussite, de nombreuses petites stations de dessalement, dites « monobloc » ont été mises en place. En effet, l'algérienne des eaux, a amorcé la première expérience en matière de dessalement de l'eau de mer par la réalisation de 23 stations monobloc, d'une capacité totale de 57.500 m³/j, dans le cadre d'un programme d'urgence, dans les wilayas de Tlemcen, Oran, Tipaza, Alger, Boumerdès, Skikda et Tizi Ouzou.

Jusque-là, 20 petites stations de dessalement d'eau de mer pour une capacité de 53 000 m³/j ont été réalisées et réparties à travers 08 wilayas. Cette opération a fait l'objet d'une passation de deux marchés.

Comme mentionné précédemment, les stations de dessalement monoblocs au nombre de 20 ont été réalisées au titre du programme d'urgence. Ce programme a été réalisé par deux entreprises à savoir (Tableau I-2) :

- Hydro-traitement (Algérie) : 12 stations
- Linde-KCA (Allemagne) : 08 stations, représentées ci-dessous :

Tableau I-1: Station Mono bloc en Algérie

Wilaya	Site	Commune	Capacité m ³ /j	Constructeur
Tlemcen	Ghazaouet	Ghazaouet	2500	LINDE-KCA
Tlemcen	Ghazaouet II	Ghazaouet	2500	LINDE-KCA
Tipaza	Bou-Ismaïl	Bou-Ismaïl	5000	LINDE-KCA
Alger	Champ de tir	Zeralda	2500	LINDE-KCA
Alger	Champ de tir 2	Zeralda	2500	LINDE-KCA
Alger	Palm Beach	Staouali	2500	LINDE-KCA
Alger	La Fontaine	Ain Benian	2500	LINDE-KCA
Alger	La Fontaine	Ain Benian	2500	LINDE-KCA
Alger	La Fontaine 3	Ain Benian	2500	HYDRO-TRAITEMENT
Alger	Cap Caxine	Hammamet	2500	HYDRO-TRAITEMENT
Alger	Bateau Cassé 1	B. El Kifane	2500	HYDRO-TRAITEMENT
Alger	Bateau Cassé 2	Bordj El Kifane	2500	HYDRO-TRAITEMENT
Alger	Bateau Cassé 3	Bordj El Kifane	2500	HYDRO-TRAITEMENT
Alger	Reghaïa Plage	Reghaïa	2500	HYDRO-TRAITEMENT
Chlef	Tenes	Mainis	5000	HYDRO-TRAITEMENT
Skikda	Larbi B.Mhidi1	Larbi B.Mhidi	2000	HYDRO-TRAITEMENT
Skikda	Larbi B.Mhidi2	Larbi B.Mhidi	3000	HYDRO-TRAITEMENT
Skikda	Larbi B.Mhidi3	Larbi B.Mhidi	2500	HYDRO-TRAITEMENT
Skikda	Larbi B.Mhidi4	Larbi B.Mhidi	2500	HYDRO-TRAITEMENT
Tizi-Ousou	Tizi-Ousou	Tizi-Ousou	2500	HYDRO-TRAITEMENT

Il y a lieu de souligner les éléments ci-après :

- Les unités de dessalement des wilayas : Oran, Chlef et Ain-Temouchent ont été déplacées, après leur mise en service sur leurs sites initiaux, vers ces wilayas en raison de la sécheresse persistante dans ces régions, un des avantages de ce type de station.

- La région Ouest du pays (Oran, Ain-Temouchent, Tlemcen) a bénéficié de 9 stations de dessalement pour une capacité totale de 25 500 m³/j, soit 44% du volume total.

I.7.2 Les grandes stations de dessalement en Algérie :

Les 13 grandes stations prévues dans le programme national de dessalement sont opérationnelles. Ceci va permettre de produire 2,26 millions de m³/j d'eau dessalée (voir localisation sur la figure 3). Cette situation permettra aussi à l'Algérie, d'occuper la troisième place dans le monde après l'Arabie Saoudite et les Etats-Unis d'Amérique.

Enregistre actuellement 11 stations opérationnelles pour une capacité de 1,16 millions m³/j (Tableau I-2)

Tableau I-2: Les grandes stations de dessalement en Algérie

Wilaya	Commune	Sites	Capacité nominale (m ³ /j)	Etat	Mise en service	Constructeur
Skikda	Skikda	Plage Oued Kikha	100 000	En exploitation	2009	GEIDA
Alger	Alger	Hamma	200 000	En exploitation	2008	IONICS
Ain Temouchent	Beni Saf	Chatt El Hillal	200 000	En exploitation	2009	GEIDA
Oran	Arzew	Kahrama	90 000	En exploitation	2005	BLACK & VEATCH
Tlemcen	Tlemcen	Souk Tleta	200 000	En exploitation	2011	MALAKOFF/HYFLUX
Tipaza	Tipaza	Fouka	120 000	En exploitation	2011	SNC LAVALIN/ACCIONA
Mostaganem	Mostaganem		200 000	En exploitation	2011	UNIMA/AQUALIA
Boumerdes	Boumerdes	Cap Djinet	100 000	En construction	2012	UNIMA/AQUALIA
Chlef	Tenes	Mainis	200 000	En construction	2015	BEFESA AGUA
Oran	Mers El Hadjadj	Mactaa	500 000	En construction	2014	HYFLUX
Tlemcen	Honaine	Honaine	200 000	En construction	2012	GEIDA
Annaba	El Tarf	Echatt	50 000	En exploitation	2015	SONATRACH
Tipaza	Gouraya	Oued Sebt	100 000	En construction	/	BI WATER CONSORTIUM
Capacité totale			2 260 000			

Chapitre II :

Techniques de dessalement de l'eau de mer

Chapitre II: Techniques de dessalement de l'eau de mer

II.1 Introduction :

L'eau est une ressource vitale pour la vie humaine, et avec l'augmentation de la population mondiale, la demande en eau douce augmente également. Cependant, l'eau douce disponible est limitée et est souvent insuffisante pour répondre aux besoins de tous. Dans ce contexte, le dessalement de l'eau de mer est devenu une alternative importante pour augmenter la disponibilité d'eau douce. Les techniques de dessalement de l'eau de mer ont connu des avancées significatives ces dernières années, allant de l'évaporation à l'osmose inverse en passant par la distillation multiple. Dans ce chapitre, nous allons passer en revue les différentes techniques de dessalement de l'eau de mer, ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients, en nous concentrant particulièrement sur l'osmose inverse qui est la technique la plus largement utilisée dans le monde.

II.2 Définition du dessalement :

Le dessalement de l'eau de mer est le processus qui permet de retirer le sel et autres minéraux présents dans l'eau de mer pour produire de l'eau douce. L'eau de mer est traitée pour éliminer le sel et les autres impuretés, afin de la rendre potable et utilisable pour les besoins humains, agricoles ou industriels. C'est un processus important dans les régions où l'eau douce est rare et où les besoins en eau potable sont élevés, comme les zones arides ou les zones côtières. Le dessalement de l'eau de mer peut être effectué à grande échelle pour les villes, les industries ou les exploitations agricoles, ainsi qu'à petite échelle pour les communautés rurales et les habitations individuelles.

II.3 Classification des différents procédés de dessalement

On peut classer les méthodes de dessalement en fonction des procédés utilisés, soient :

- Les procédés qui font intervenir un changement de phase (Figure II-1) (distillation et congélation) ;
- Les procédés qui utilisent des membranes (électrodialyse et osmose inverse) ;
- Les procédés qui agissent sur les liaisons chimiques (échange d'ions et extraction par solvant sélectif).

Ces procédés peuvent être classés plus précisément, soit :

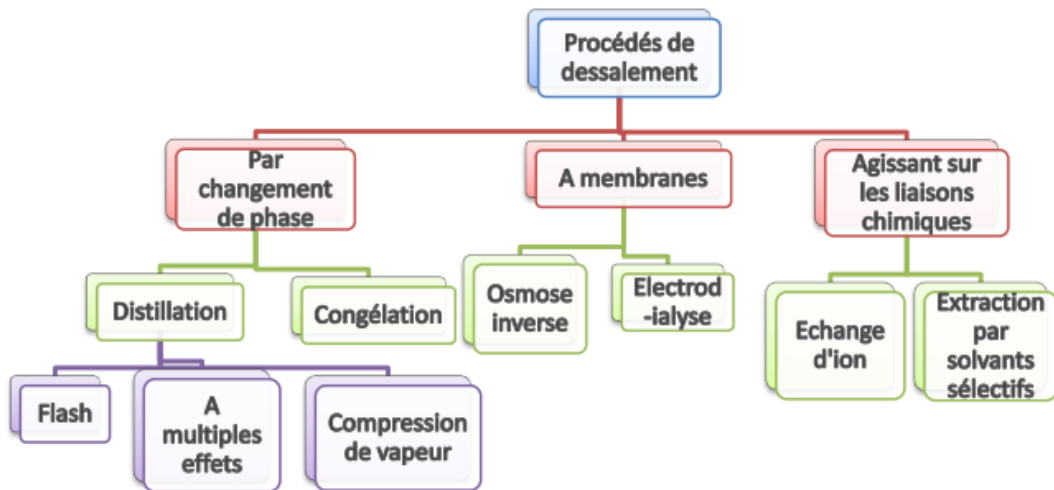


Figure II-1 : Les procédés de dessalement selon différents principes (ZIZI, 2013)

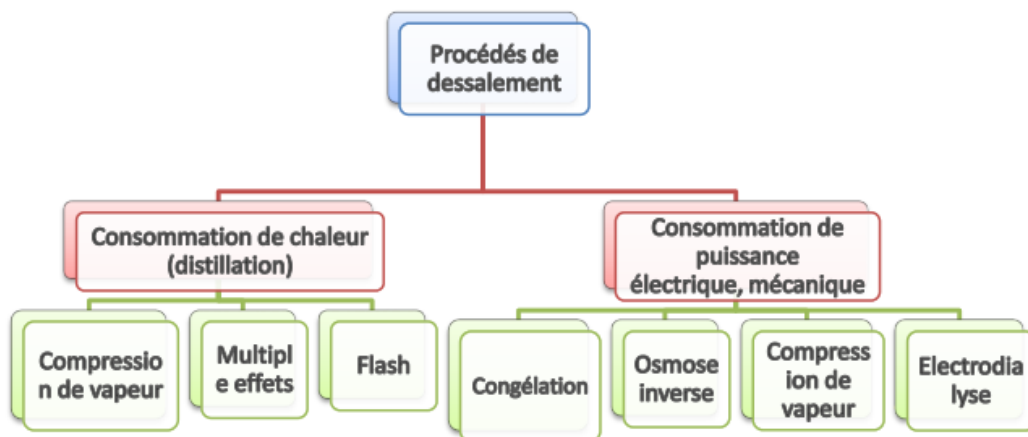


Figure II-2 : Les procédés de dessalement selon le type d'énergie consommée (ZIZI, 2013)

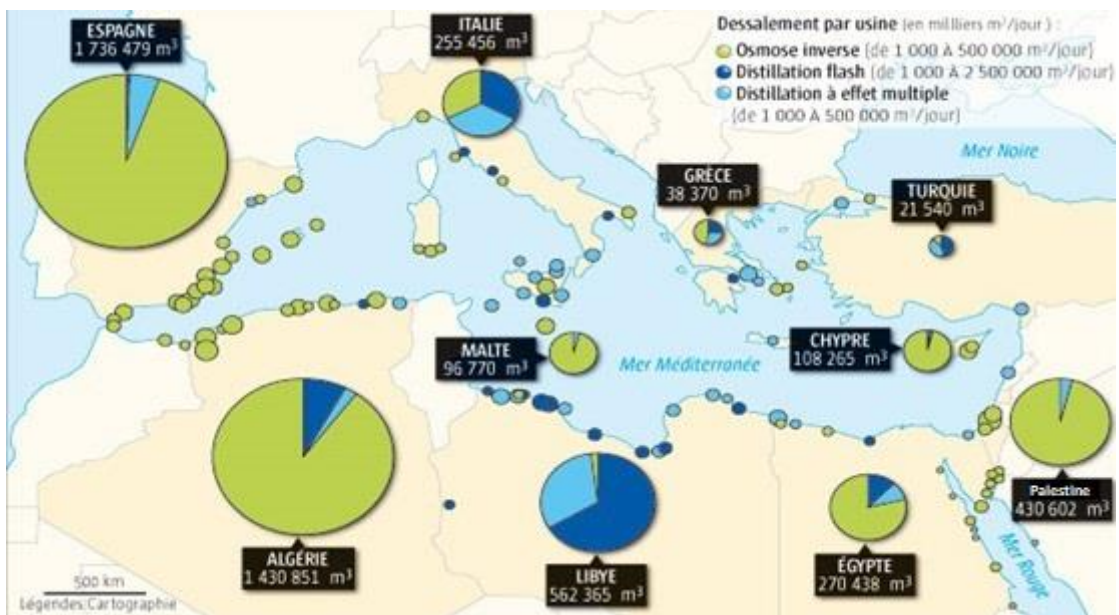


Figure II-3: Le dessalement dans le monde par type de techniques (Source : larecherche.fr, 2008)

II.3.1 Les procédés thermiques

II.3.1.1 La distillation :

La distillation est le procédé de dessalement le plus ancien et le plus direct. Le principe fondamental mis en œuvre dans les procédés de distillation est le fait que la température d'ébullition de l'eau diminue avec la pression. On peut donc utiliser la chaleur de condensation de la vapeur produite dans un étage pour chauffer de l'eau dans l'étage suivant.

II.3.1.2 Détentes à plusieurs étages ou Multi Stage Flash (MSF)

Dans le processus de distillation multi-étages (MSF), l'eau de mer est initialement réchauffée dans une chaudière, souvent par la condensation de vapeur autour d'un ensemble de tubes par lesquels l'eau de mer circule. Cette augmentation de température de l'eau de mer provoque son écoulement vers une cuve de niveau inférieur, où la pression réduite entraîne une ébullition immédiate. À chaque étape, l'eau chauffée subit une détente rapide, conduisant à son évaporation soudaine.

Typiquement, seulement un pourcentage mineur de l'eau se transforme en vapeur, dépendant de la pression spécifique à chaque niveau, car l'ébullition persiste jusqu'à ce que la température de l'eau diminue jusqu'au point d'ébullition. Les installations MSF comportent généralement entre 15 et 25 étages. La figure II-4 présente un schéma représentatif d'une installation MSF.

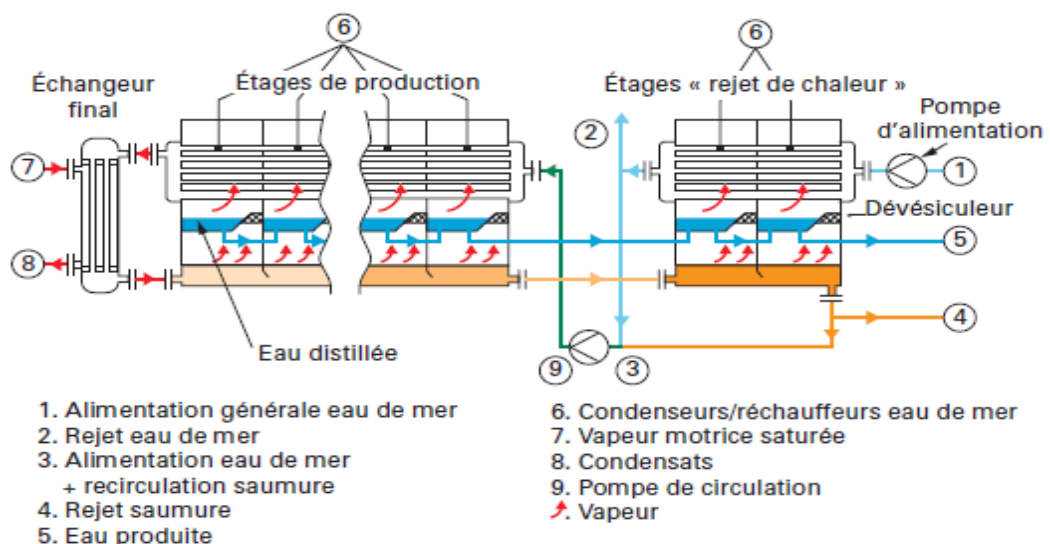


Figure II-4 : Schéma d'une usine de type MSF(MAUREL, 2006)

II.3.1.3 Distillation à Multiple Effets (MED)

Le procédé MED (Multi Effect Desalination ou distillation à multiples effets) est basé sur la distillation en cascade dans plusieurs cellules. Le meilleur exemple pour illustrer

le principe de fonctionnement du procédé MED est le « bouilleur marin » utilisé depuis longtemps à bord des navires. (Figure II-5).

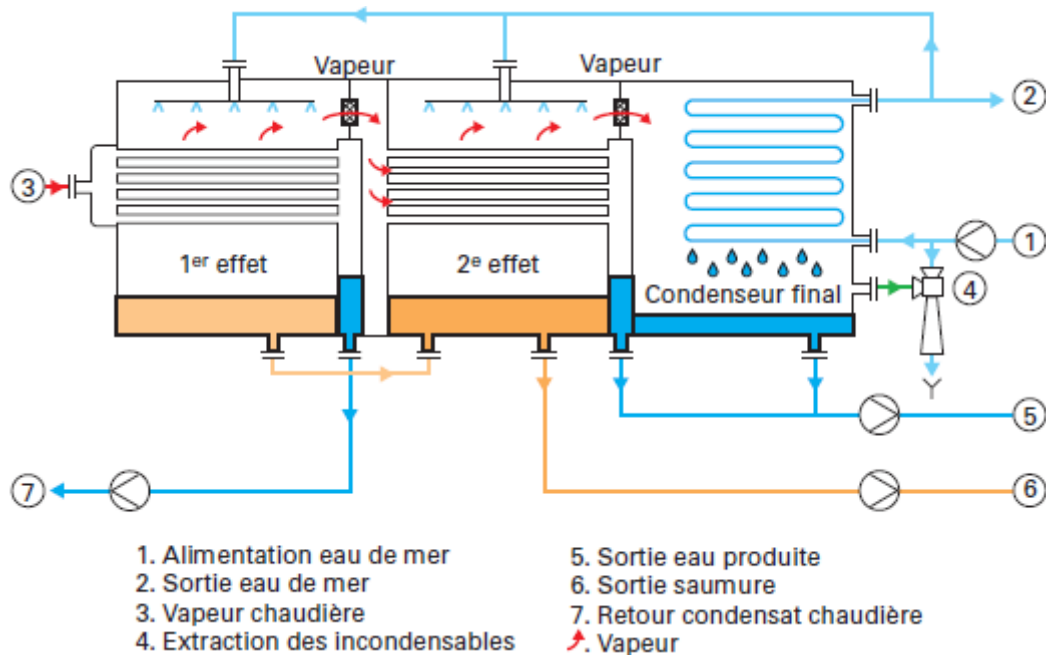


Figure II-5 : Principe de distillation à simple effet (MAUREL, 2006)

Un faisceau tubulaire, alimenté par un fluide chauffant est plongé dans l'eau de mer à la partie basse d'une enceinte étanche et sous vide. Le fluide chauffant provoque alors une évaporation de l'eau de mer. La vapeur ainsi formée est condensée sur un faisceau tubulaire, placé dans la partie haute de l'enceinte et dans lequel circule l'eau de mer froide. L'eau distillée et condensée s'écoule du faisceau et est recueillie dans une goulotte d'où elle est pompée pour des usages divers.

Un appoint d'eau de mer, supérieur à la production, est introduit dans l'enceinte. Une autre pompe évacue une fraction de saumure de telle manière que la salinité de l'eau de mer reste à une concentration acceptable. La consommation d'énergie dans le bouilleur marin est de l'ordre de 590 kcal/kg. Ce qui est trop élevé et n'est acceptable que sur les bateaux où une grande quantité de chaleur en provenance des diverses machines doit être évacuée.

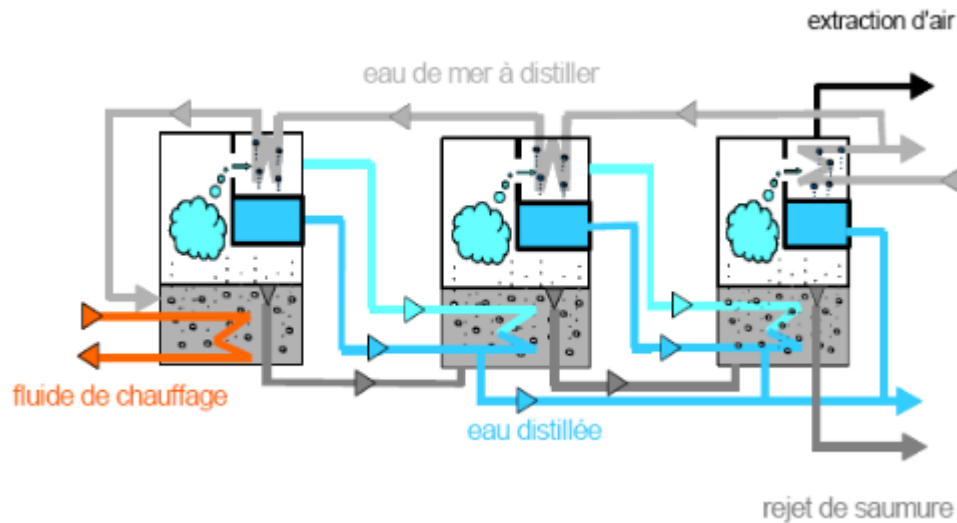


Figure II-6 : Distillation à effets multiples (MAUREL, 2006)

Pour une réalisation industrielle du procédé MED on multiplie alors les effets (Figure II-6). L'eau de mer est chauffée dans le premier effet, vaporisant une fraction d'eau de mer. Une partie de cette vapeur est condensée par le faisceau tubulaire où circule de l'eau de mer relativement froide. L'autre partie de la vapeur est renvoyée dans l'effet suivant, maintenu à une pression plus faible que le premier.

De même, une partie de la saumure chauffée dans le premier effet est également utilisée pour chauffer l'eau de mer dans le second.

La vapeur en provenance du premier effet se condense dans le deuxième sur le faisceau tubulaire et produit une quantité presque égale de vapeur à partir de l'eau de mer, et ainsi de suite. A chaque effet, l'eau distillée est envoyée dans un collecteur.

II.3.1.4 Compression de Vapeur (VC)

Le procédé de compression de vapeur consiste à évaporer l'eau de mer après l'avoir préchauffée dans un échangeur récupérant la chaleur de la saumure.

La vapeur d'eau produite est comprimée après avoir été débarrassée des gouttelettes entraînées par un séparateur. Sa pression ayant été élevée, la vapeur se condense alors à une température supérieure à celle qui règne dans l'évaporateur ; grâce à la chaleur latente de condensation qui est transférée, le cycle d'évaporation et de condensation peut ainsi fonctionner.

La vapeur condensée de l'eau douce est extraite, ainsi que la saumure concentrée contenant le sel (figure II-7).

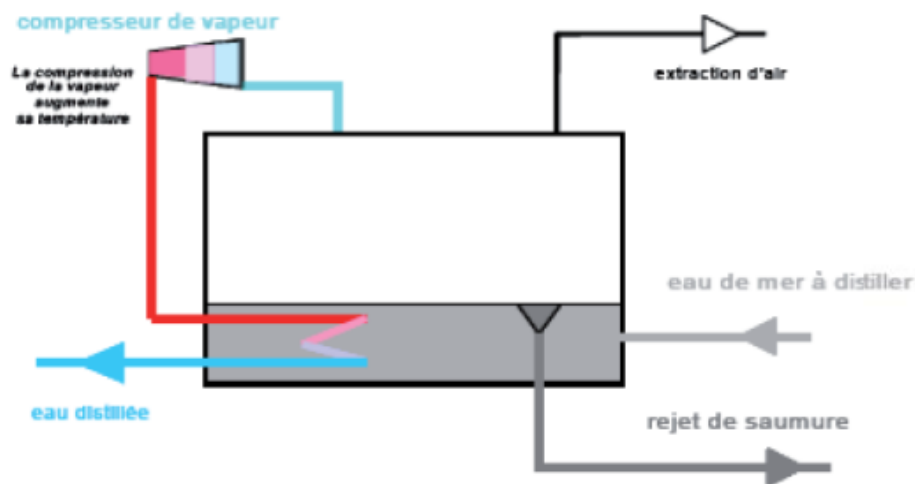


Figure II-7 : Schéma d'une installation MVC (MAUREL, 2006)

Si on multiplie le nombre d'effets comme dans le procédé MED, chacun étant à une température supérieure du suivant, on produit avec un kg de vapeur compressée, n kg d'eau distillée, n étant le nombre d'effets (ou de cellules).

II.3.2 Technique membranaire :

II.3.2.1 L'électrodialyse

L'électrodialyse est une technique de séparation dans laquelle des espèces ionisées minérales ou organiques dissoutes, telles que sel, acides ou bases, sont transportées à travers des membranes ioniques sous l'action d'un champ électrique.

Quand on prend du sel de cuisine et qu'on le met dans l'eau. Le sel se dissout et au lieu d'être sous la forme NaCl , il devient ionisé à l'état de Na^+ et Cl^- . Si on applique un courant continu à cette solution, les ions positifs sont attirés par la cathode (électrode négative) et les ions négatifs sont attirés par l'anode (électrode positive), c'est le principe de l'électrolyse.

Pour l'électrodialyse, la différence se fait au niveau des membranes imperméables qui sont ajoutées ; l'une ne laisse passer que les cations et l'autre ne laisse passer que les anions.

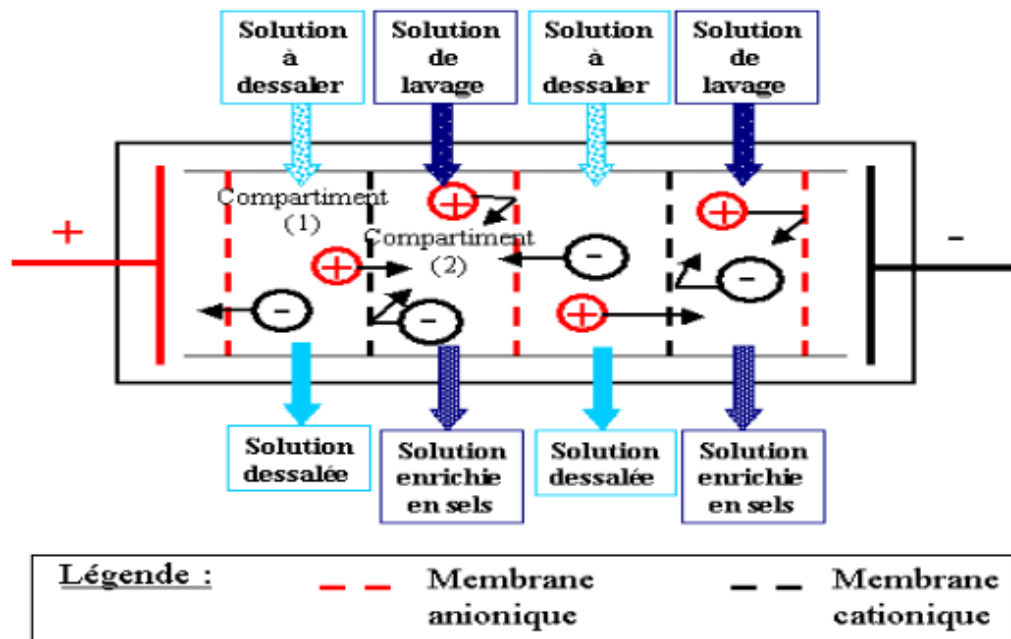


Figure II-8: Technique de l'électrodialyse (MAUREL, 2006)

II.3.2.2 Osmose inverse (OI)

II.3.2.2.1 Principe de l'Osmose Inverse

La figure II-9 ci-après représente un tube en U avec une membrane semi-perméable séparant les deux branches.

Dans la branche de droite le liquide A est un liquide très peu concentré (solvant, par exemple de l'eau pure H_2O), dans la branche de gauche le liquide B est fortement concentré (solvant + soluté, par exemple de l'eau pure additionnée de chlorure de sodium $H_2O + NaCl$).

Naturellement le solvant A (H_2O) va migrer au travers de la membrane semi-perméable et va diluer la solution B ($H_2O + NaCl$). Ce phénomène s'appelle l'Osmose naturelle.

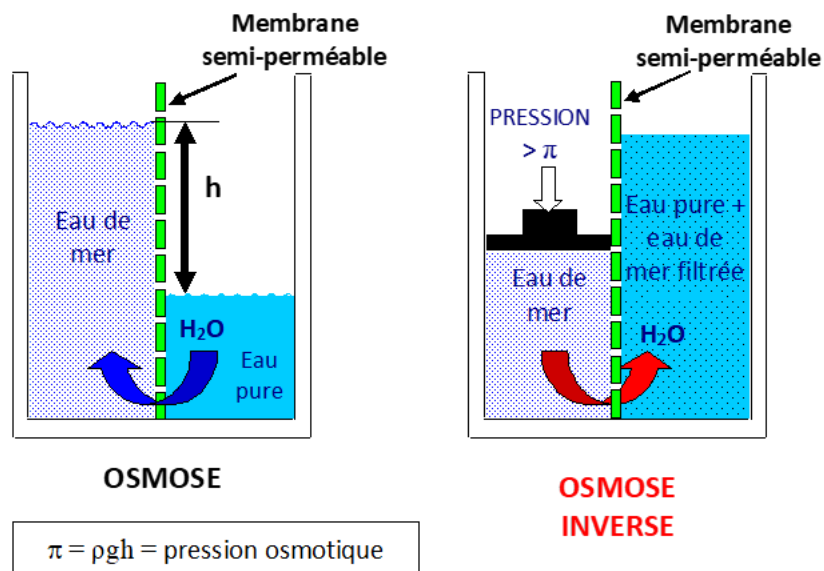


Figure II-9: Osmose naturelle (MAUREL, 2006)

Au bout d'un certain temps (Figure II-9) un état d'équilibre est atteint (Equilibre Osmotique). La différence de hauteur H qui sépare les deux niveaux liquides représente la pression osmotique de la solution B.

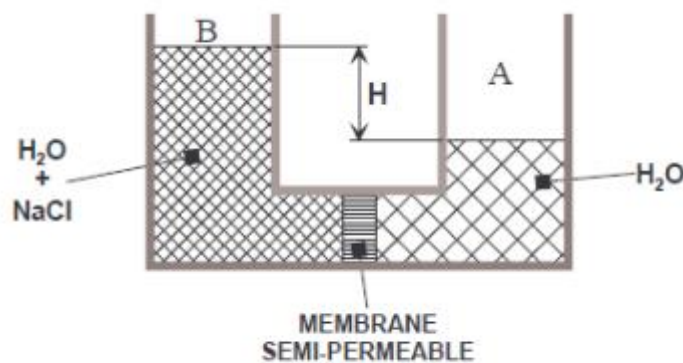


Figure II-10: Equilibre Osmotique (MAUREL, 2006)

Si l'on applique une pression P supérieure à la pression osmotique au-dessus de la solution concentrée B (Figure II-10), le phénomène s'inverse et seul le solvant (au rendement près) migre au travers de la membrane. Ceci est le principe même de l'Osmose Inverse.

On peut imaginer l'eau de mer dans la branche B, l'eau douce dans la branche A. Sous l'effet d'une pression de l'ordre de 60 bars et avec des membranes appropriées, il va être possible de dessaler l'eau de mer par osmose inverse.

Les autres applications sur des eaux de moindre salinité ou des fluides ou effluents industriels, relèvent du même principe ; seules les membranes et les pressions mises en œuvre sont différentes.

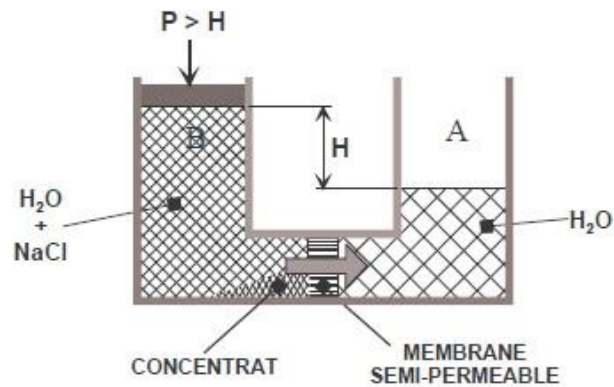


Figure II-11: Osmose inverse (OI) (MAUREL, 2006)

II.3.2.2.2 Conception d'une usine d'Osmose Inverse

Une usine de dessalement d'eau de mer par OI comprend essentiellement :

- Un système d'alimentation en eau de mer ;
- Un ensemble de prétraitements physico-chimiques de l'eau de mer ;
- Un dispositif de mise en pression de l'eau prétraitée ;
- L'osmoseur proprement dit ;
- Un système de récupération de l'énergie du concentrât ;
- Un ensemble de post-traitements du perméat ;
- Un poste de nettoyage chimique des membranes

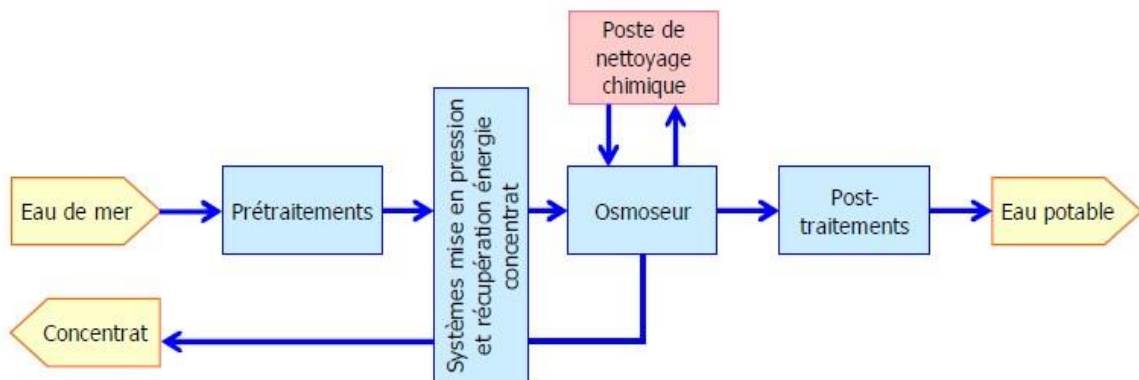


Figure II-12: Schéma de principe d'une usine d'osmose inverse (MAUREL, 2006)

II.4 Description des différents composants

a) Système d'alimentation en eau de mer

L'alimentation en eau de mer peut s'effectuer soit par prise directe, soit par l'intermédiaire de puits côtiers. Ce dernier système permet généralement d'obtenir une

eau de bonne qualité, ce qui soulage d'autant les prétraitements, et permet de s'affranchir des risques de pollutions accidentelles de l'eau de mer.

b) Prétraitements physico-chimiques

Les prétraitements ont pour but de conférer à l'eau d'alimentation des membranes d'OI toutes les qualités requises afin d'éviter au maximum :

- Leur entartrage par précipitation de certains sels « concentrât » ;
- Leur colmatage par les matières en suspension ;
- Leur encrassement (biofouling) par des matières biologiques (zooplancton, bactéries...)

Et ceci de façon à assurer leur pérennité et à limiter la fréquence des nettoyages chimiques. En fonction de ses caractéristiques et de son mode de prélèvement, l'eau de mer peut nécessiter une étape de clarification plus ou moins importante, pouvant être constituée par une simple filtration sur média granuleux, précédée par une coagulation, ou bien par une coagulation- floculation-décantation (ou flottation, procédé efficace pour réduire la teneur en algues).

Les prétraitements chimiques comportent une acidification (acide sulfurique) pour éviter les précipitations du calcium lié aux bicarbonates, et/ou une injection d'un séquestrant pour éviter celles du calcium lié principalement aux sulfates ; une injection de chlore pour l'oxydation des micro-organismes, suivie d'une dé-chloration (injection de bisulfite de sodium) afin de ne pas oxyder les membranes (tolérance 0 chlore pour les membranes composites).

La barrière finale est constituée par la microfiltration. L'eau d'alimentation des membranes doit présenter idéalement une turbidité maximum de 0,2 NFU et un indice de colmatage de 3 (Fouling Index 15 minutes). Ces valeurs cibles peuvent être obtenues en utilisant comme prétraitement des membranes d'ultrafiltration. Il est également à noter que la concentration en matières organiques, source nutritionnelle des bactéries, doit être la plus faible possible pour limiter les risques de biofouling.

c) Dispositif de mise en pression - Système de récupération de l'énergie du concentrât

La pression osmotique de l'eau de mer standard (35 g/l à 15°C, est de 25 bar. Pour obtenir une productivité acceptable économiquement des membranes d'OI, la pression

d'alimentation doit être de l'ordre de 65 bar (Pmax en fonction de l'origine des membranes : 56 à 90 bar).

La mise en pression est assurée, soit par des pompes volumétriques (à pistons -à membranes), soit par des pompes centrifuges multi-étages, les premières étant plutôt adaptées aux faibles débits. Pour maintenir des conditions optimales d'écoulement hydraulique dans les éléments d'Osmose Inverse, un certain débit de déconcentration doit être maintenu.

Le facteur de conversion [$Y = (\text{débit perméat} : \text{débit d'alimentation}) \times 100$] est de l'ordre de 40 à 60 %, on déduit que 40 à 60 % de l'eau est rejetée.

Le concentrât possède donc une énergie hydraulique importante qu'il convient de récupérer afin de réduire les consommations en énergie électrique. Cette récupération s'effectue par trois moyens :

- Turbopompes placées en série avec les pompes HP (figure II-13-a) ;
- Turbines Pelton couplées directement aux pompes HP afin de soulager les moteurs électriques (figure II-13-b) ;
- Échangeurs de pression (figure II-13-c).

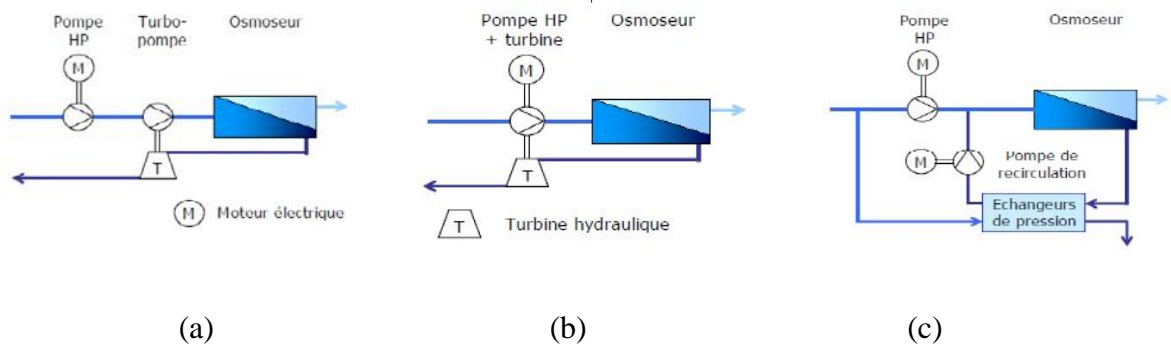


Figure II-13: Récupération d'énergie hydraulique (MAUREL, 2006)

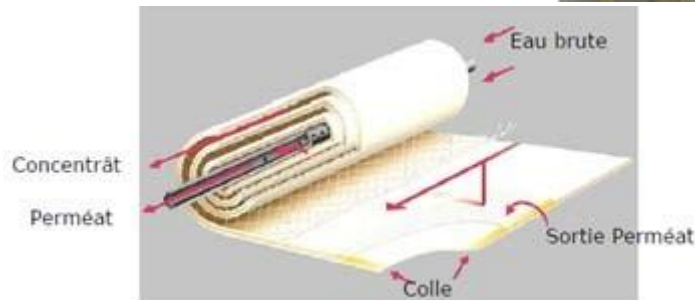
d) Osmoseur

Les membranes d'OI se présentent généralement sous forme de feuilles fines en composite configurées en spirales pour former des éléments aux dimensions normalisées (figure II-14). Ces éléments sont placés dans des corps de pression (6 ou 7 par corps). En fonction de la salinité de l'eau de mer, de sa température ainsi que des qualités requises pour le perméat, le dessalement peut s'effectuer en une ou deux passes.

Châssis avec modules d'osmose inverse



Détail d'un tube à pression



Configuration spiralée d'une membrane

Figure II-14: Equipement d'un osmoseur (MAUREL, 2006)

e) Osmoseurs particuliers

- Éléments constitués de feuilles fines en composite arrangées à plat, convenant aux petites capacités ;
- Membrane en fibres creuses de tri-acétate de cellulose, matériau résistant au chlore ;
- Éléments spiralés disposés en deux étages, le deuxième étage étant composé d'éléments très haute-pression (90 bar). Ce système permet d'atteindre des facteurs de conversion de 60%.

f) Post-traitements

L'eau osmosée (perméat) est l'eau purifiée obtenue après le processus d'osmose inverse. Elle est composée principalement d'eau pure, avec plus de 90% des sels dissous et des impuretés, y compris le chlorure de sodium (NaCl), éliminés. Par conséquent, elle contient très peu de chlorure de sodium, contrairement à l'eau de mer ou l'eau saumâtre initialement traitée, il convient de reminéraliser le perméat pour porter son TH (titre hydrotimétrique) calcique et son TAC (titre alcalimétrique Complet) à des valeurs proches de 8°F. De plus les membranes d'OI étant perméables aux gaz, le CO₂ issu de la dissociation des bicarbonates se retrouve dans le perméat, ce qui oblige à corriger son pH. L'eau doit enfin subir une désinfection par injection de chlore, dont le résiduel permettra de la protéger lors de son transport et de son stockage.

g) Poste de nettoyage chimique

Périodiquement les membranes doivent être nettoyées pour les débarrasser de tous les dépôts qui tendent à diminuer les performances qualitatives et quantitatives du système. Cette élimination est obtenue en faisant recirculer des solutions chimiques acides (pour les dépôts de carbonate de calcium, d'hydroxydes métalliques) et basiques (pour les dépôts biologiques et bactériens).

II.5 Procédés de prise d'eau de mer

Le choix de mode de prise d'eau de mer influence sur la qualité des eaux à l'entrée de la station ainsi que sur le débit d'alimentation. Pour prélever de l'eau de mer, il existe trois grandes familles de méthodes qui peuvent être déclinées en de nombreuses variantes selon les particularités des sites d'implantation de la station de dessalement et des procédés technologiques utilisés :

- Les prises d'eau par des puits de captage côtiers,
- Les prises d'eau par des puits de plage ou des drains en tranchées ou en nappe sous les plages ou sous le fond marin,
- Les prises d'eau directes en mer ouverte, en surface ou au fond.

II.5.1 Prise par puits côtiers

Les puits côtiers relèvent de la même technologie que les puits terrestres dans les nappes phréatiques. Ils sont installés sur la frange littorale et sont forés dans la nappe salée ou saumâtre. Ils sont suffisamment loin de la mer pour ne pas relever de travaux maritimes. Leurs caractéristiques dépendent des propriétés hydrogéologiques générales du sol.

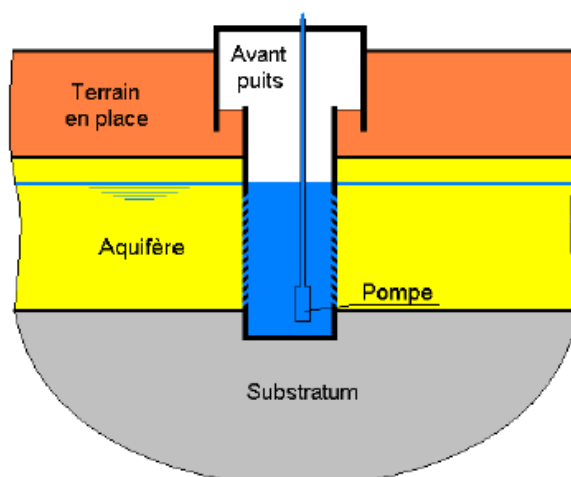


Figure II-15: Coupe type d'un puits de captage (MAUREL, 2006)

a. Qualité des eaux

Les eaux captées par des puits côtiers ont traversé une grande épaisseur de terrain filtrant. Elles sont exemptes de matières solides en suspension et présentent de très bonnes qualités physico-chimique et biologique. Le plus souvent, il n'est pas nécessaire de réaliser des prétraitements avant l'entrée dans le processus de dessalement.

b. Ordre de grandeur du débit

Un puits de rayon métrique permet d'obtenir un débit continu de quelques litres à quelques dizaines de litres par seconde, qu'il draine dans le sol avoisinant en rabattant la ligne d'eau dans un périmètre de quelques centaines de mètres ($R \sim 200r$) selon les sols ; ce qui impose une distance minimale entre deux puits ($\sim 2R$).

c. Contrainte d'application

Le débit du puits est subordonné aux propriétés hydrogéologiques des terrains en place selon la nature des terrains et leur état de fracturation. Des essais sont indispensables pour s'assurer de leur faisabilité.

II.5.2 Prise par puits maritimes ou champs drainants

L'eau de mer peut être puisée par infiltration sous les fonds marins, ou le plus souvent sous les plages par deux procédés :

- Les puits maritimes ou puits de plage situés à proximité immédiate de la côte, sur la plage ou dans les petits fonds. Ils relèvent des travaux maritimes et leurs caractéristiques ne dépendent que des propriétés géotechniques locales du sol.
- Les drains sub-horizontaux installés dans des tranchées (tranchées drainantes) ou mis en place par forage (drains par forages dirigés). Les champs drainants sont composés de plusieurs drains sont installés les uns à côté des autres.

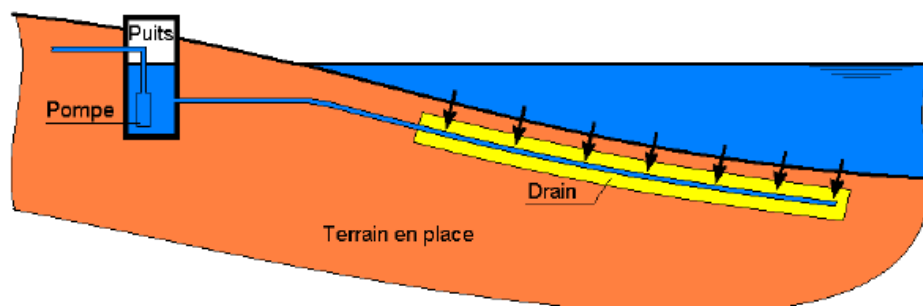


Figure II-16: Coupe longitudinale type d'une tranchée drainante (MAUREL, 2006)

a. Qualité des eaux

Les eaux captées par des puits maritimes ou des champs drainants ont traversé une faible épaisseur de terrain filtrant. Elles sont exemptes de matières solides en suspension mais présentent des qualités physico-chimique et biologique qui se dégradent avec l'augmentation du débit surfacique, et ne permettent pas, a priori, de s'affranchir des prétraitements.

b. Ordre de grandeur du débit

Les puits maritimes et champs drainants permettent d'obtenir des débits beaucoup plus importants que les puits côtiers.

c. Contrainte d'application

Ce type de captage est subordonné à l'existence d'une plage ou d'une avant plage sableuse accessible à des engins de chantier pour la mise en œuvre, la surveillance et la maintenance des drains. En plus, ce procédé est insensible au transit sédimentaire.

II.5.3 Prise directe

Trois grandes méthodes permettent de capter directement l'eau de mer :

- Les prises d'eau de surface par des canaux,
- Les prises d'eau de surface par des conduites ou des siphons,
- Les prises d'eau directe au fond de l'eau.

Les figures ci-dessous représentent les types de prise cités ci-dessus.

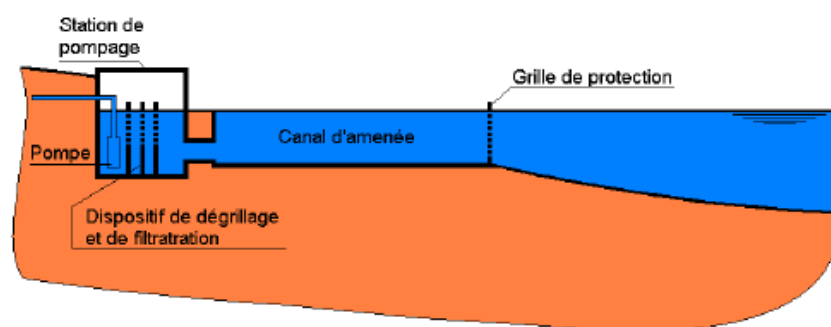


Figure II-17: Prise d'eau directe en canal Côtier (MAUREL, 2006)

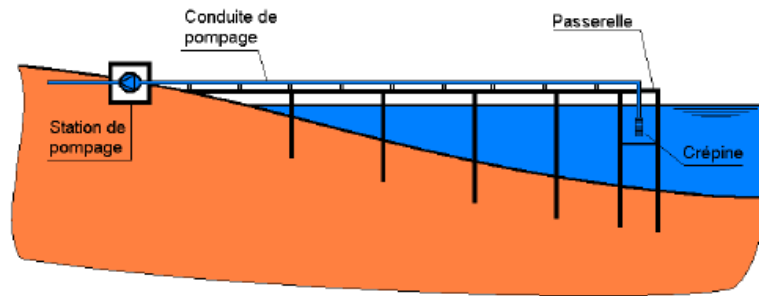


Figure II-18: Prise d'eau directe en surface à travers une crépine (MAUREL, 2006)

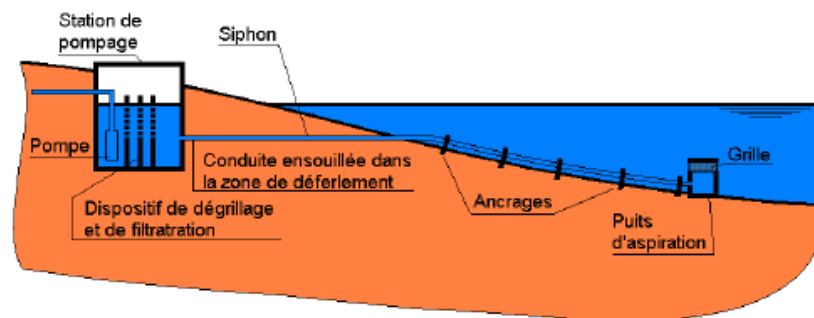


Figure II-19: Prise d'eau directe au fond de l'eau (MAUREL, 2006)

a. Qualité des eaux

Les qualités des eaux brutes obtenues sont celles de l'eau de mer du site. Elle nécessite donc des prétraitements avant d'entrer dans le processus de dessalement (filtration mécanique et traitement physico-chimique et biologique pour les procédés membranaires).

b. Ordre de grandeur du débit

Les prises directes permettent de capter de très gros débits, bien supérieurs au besoin des usines de dessalement d'eau de mer. Elles sont couramment utilisées pour les circuits de refroidissement des centrales électriques dont les débits sont de plusieurs dizaines, voire centaines, de m^3/s .

c. Contrainte d'application

Ce type de captage est sensible aux matières et organismes en suspension et en flottation, et en particulier au transit hydro-sédimentaire. Deux approches sont possibles en matière de filtration mécanique :

- La filtration à l'extrémité de la prise à travers une crépine,
- La filtration en bassin, l'eau y étant amenée par un siphon muni d'une tête de prise ou par un canal à ciel ouvert.

II.6 Les membranes

II.6.1 Définition de la membrane

Une membrane est une barrière de quelques centaines de nanomètres à quelques millimètres d'épaisseur, sélective, qui sous l'effet d'une force de transfert, permettant l'arrêt ou le passage sélectif de substances dissoutes ou non, sous l'action d'une force motrice de transfert (Figure II-20).

Les critères de séparation des particules, des molécules et/ou des ions peuvent être :

- La dimension et la forme ;
- La nature chimique ;
- L'état physique ;
- La charge électrique, etc.

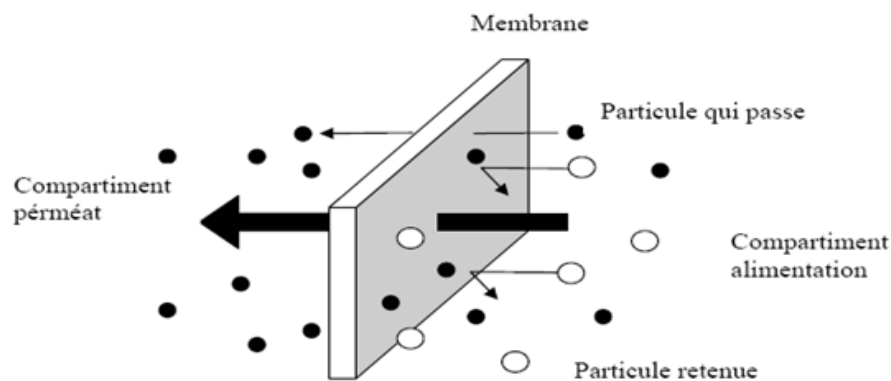


Figure II-20: Membrane sélective (MAUREL, 2006)

II.6.2 Matériaux constitutifs

Selon la nature des matériaux constitutifs des membranes on parle également de:

- Membranes organiques ;
- Membranes minérales ou inorganiques ;
- Membranes composites ;
- Membranes échangeuses d'ions.

a) Membranes organiques

Elles sont fabriquées, pour la plupart d'entre elles, à partir de polymères organiques (acétate de cellulose, poly-sulfones, polyamides, etc.). Les qualités de ces matériaux leur confèrent une grande adaptabilité aux différentes applications. Environ 90 % des membranes d'ultrafiltration et de microfiltration sont constituées de membranes organiques ;

b) Membranes minérales ou inorganiques

Ces techniques se sont diffusées plus tardivement que les membranes organiques. Ces membranes sont composées de corps entièrement minéraux (matières céramiques, métal fritté, verre). Leur arrivée a permis de travailler dans des conditions extrêmes de température et d'agression chimique, ce qui a ouvert de nouvelles voies dans la séparation par membrane.

Les membranes dites dynamiques sont fabriquées par l'utilisateur à partir de tubes poreux dont le diamètre des pores est compris entre 0.5 et 5 μm . Une dispersion colloïdale de zirconium associée à des copolymères est introduite à l'intérieur des tubes. Certaines de ces membranes peuvent trouver des applications en eaux usées.

c) Membranes composites

Apparues au début des années 1990, elles sont caractérisées par une structure asymétrique dont la peau est beaucoup plus fine que celle des membranes classiques non composites et par une superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique. Elles peuvent être organiques (superposition de polymères organiques différents), organo-minérales ou minérales (association de carbone ou d'alumine comme support et de métaux tel le zircon, l'alumine et le titane) ;

d) Membranes échangeuses d'ions

Introduites en 1950, elles fonctionnent sur le principe du rejet d'ions grâce à leur charge. Les techniques d'électrodialyse, la dialyse et l'électro-déionisation font appel à cette technologie.

Leur principal domaine d'application actuel est le dessalement de l'eau et le traitement des effluents des installations de protection et de décoration des métaux.

De nouvelles générations de membranes, notamment anioniques et bipolaires, présentant une résistance chimique améliorée sont apparues sur le marché.

Ces techniques électro-membranaires sont aujourd'hui au nombre de trois :

- L'électrodialyse (ED) dite conventionnelle ;
- L'électrodialyse à membranes bipolaires (EDMB) ;
- L'électrodialyse à membranes (EM).

Le point commun de ces techniques est la mise en œuvre de membranes échangeuses d'ions permettant de transférer des ions de façon sélective sous l'effet d'un champ électrique.

II.7 Les modules

Les modules supportent les membranes, 4 grands types de modules sont commercialisés :

- Les modules tubulaires ;
- Les modules fibres creuses ;
- Les modules plans ;
- Les modules spirale

II.7.1 Les modules tubulaires

Un module tubulaire contient plusieurs tubes qui peuvent être en série ou en parallèle. L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes. Les tubes constituent des canaux d'écoulement tangentiel. C'est le seul type de module qui peut être nettoyé mécaniquement avec un système de balles de mousse qui raclent les parois des tubes.

L'écoulement à l'intérieur des tubes est turbulent, voire très turbulent. A cause de la taille des canaux tangentiels, cette configuration entraîne a priori une dépense d'énergie plus importante que dans les autres configurations.

Avantages

- Prétraitement simplifié,
- Facilité de nettoyage,
- Technologie simple.

Inconvénients

- Consommation d'énergie élevée,
- Faible compacité,
- Volume mort élevé,
- Coût élevé.

II.7.2 Les modules fibres creuses

Les fibres creuses sont assemblées en parallèle suivant deux configurations :

- Configuration Int-Ext (schéma a) : comme c'est le cas pour les modules tubulaires, l'eau à traiter circule à l'intérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'extérieur des fibres. Il y a écoulement tangentiel canalisé à l'intérieur des fibres ;

- Configuration Ext-Int (schéma b et c) : l'eau circule à l'extérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'intérieur des fibres. L'écoulement entre les fibres est libre.

Dans les deux cas, les membranes sont assemblées en faisceaux et leurs extrémités sont noyées dans des bouchons de colle qui isolent le perméat de l'eau à traiter. Un module industriel peut-être constitué de dizaines de milliers de fibres.

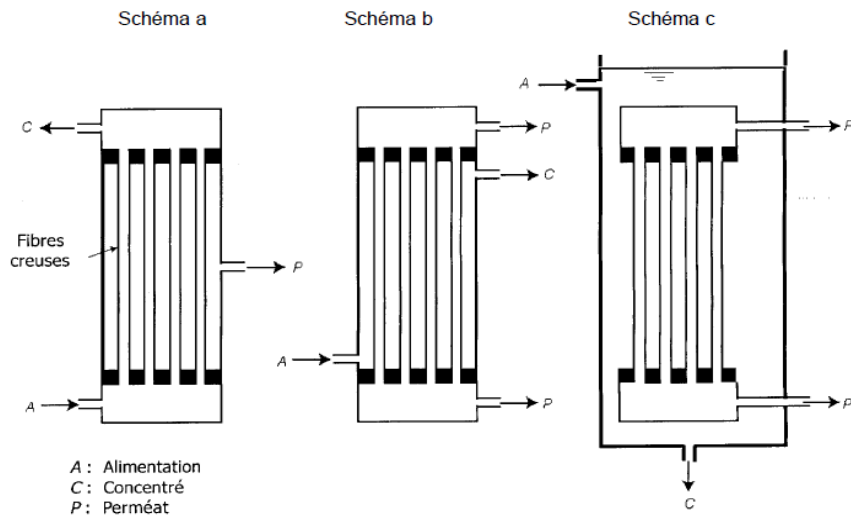


Figure II-21: Modules à fibres creuses (MAUREL, 2006)

Avantage

- Compacité élevée (surface d'échange élevée),
- Faible volume mort, faible consommation d'énergie,
- Possibilité de nettoyage à contre-courant.

Inconvénients

- Sensibilité au colmatage à cause du faible diamètre des fibres.

II.7.3 Les modules plans

Les modules plans sont les plus anciens et les plus simples : les membranes sont empilées en mille-feuilles séparées par des cadres intermédiaires qui assurent la circulation des fluides.

Avantages

- Système modulaire pouvant être modifié relativement aisément par l'utilisateur,
- Possibilité pour l'utilisateur de changer lui-même les membranes,

- Pré-traitement simplifié résultant de distances entre membrane généralement de l'ordre du millimètre,
- Visualisation du perméat produit par chaque élément.

Inconvénients

- Système peu compact
- Investissement relativement élevé.

II.7.4 Les modules spirales

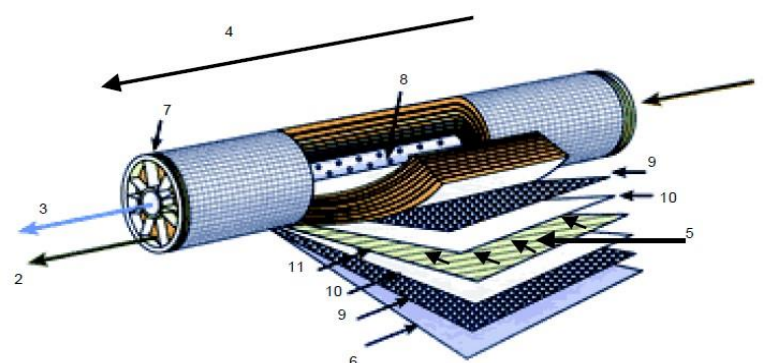
Au sein des *modules spirales*, une membrane plane est enroulée sur elle-même autour d'un tube poreux qui recueille le filtrat. On obtient ainsi un cylindre multi-couches où le perméat s'écoule selon un chemin spiralé vers le tube poreux tandis que l'alimentation circule axialement dans les canaux.

Avantages

- Compacité élevée,
- Faible volume mort,
- Coût d'investissement relativement faible,
- Possibilité de changer les membranes par l'utilisateur.

Inconvénients

- Sensibilité relativement moyenne au colmatage,
- Difficulté de nettoyage.



- 1 Entrée d'eau
- 2 Sortie de concentrat
- 3 Sortie de perméat
- 4 Sens d'écoulement de l'eau brute
- 5 Sens d'écoulement du perméat
- 6 Matériau de protection
- 7 Joint d'étanchéité entre module et enveloppe
- 8 Perforations collectant le perméat
- 9 Espaceur
- 10 Membrane
- 11 Collecteur de perméat

Figure II-22: Structure interne d'une membrane à spirale (MAUREL, 2006)

II.8 Les différents systèmes membranaires

Suivant la manière dont est appliquée la pression membranaire, deux types de systèmes peuvent être distingués :

- Les systèmes de filtration sous pression ;
- Les systèmes à membranes immergées.

II.8.1 Système de filtration membranaire sous pression

Dans le cas d'un système de filtration sous pression, les modules sont installés dans des caissons pressurisés (figure II-23). Une pompe additionnelle peut servir à la recirculation du concentrât à l'entrée des modules (figure II-24).

L'ajustement du débit d'alimentation et l'ajustement d'une vanne, située en aval des modules, permettent de contrôler la pression transmembranaire et le taux de récupération global. Le perméat est généralement à une pression proche de la pression atmosphérique.

Les différents types de modules peuvent être mis en œuvre de cette façon. Plusieurs modules peuvent être placés en série dans un même caisson comme dans le cas des modules spiralés où un caisson peut contenir d'un à six modules spiralés. Plusieurs caissons peuvent être utilisés en série et / ou en parallèle.

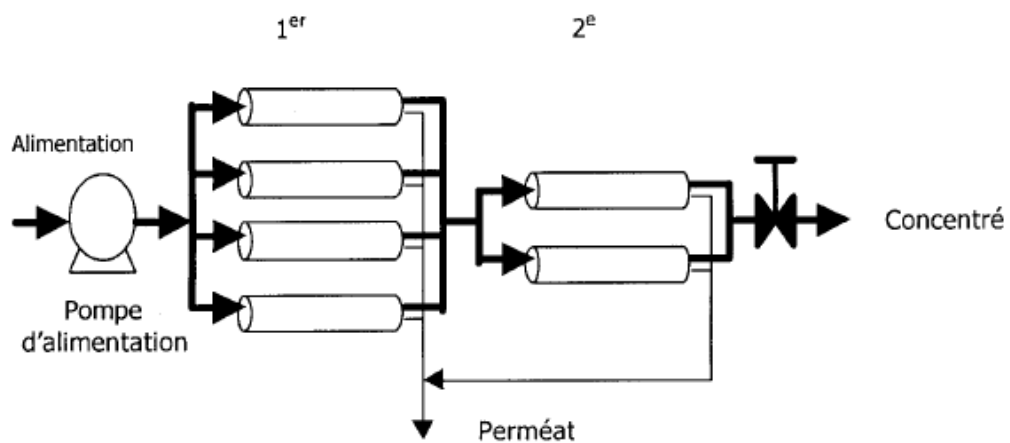


Figure II-23: Système membranaires (Configuration multi étages) (MAUREL, 2006)

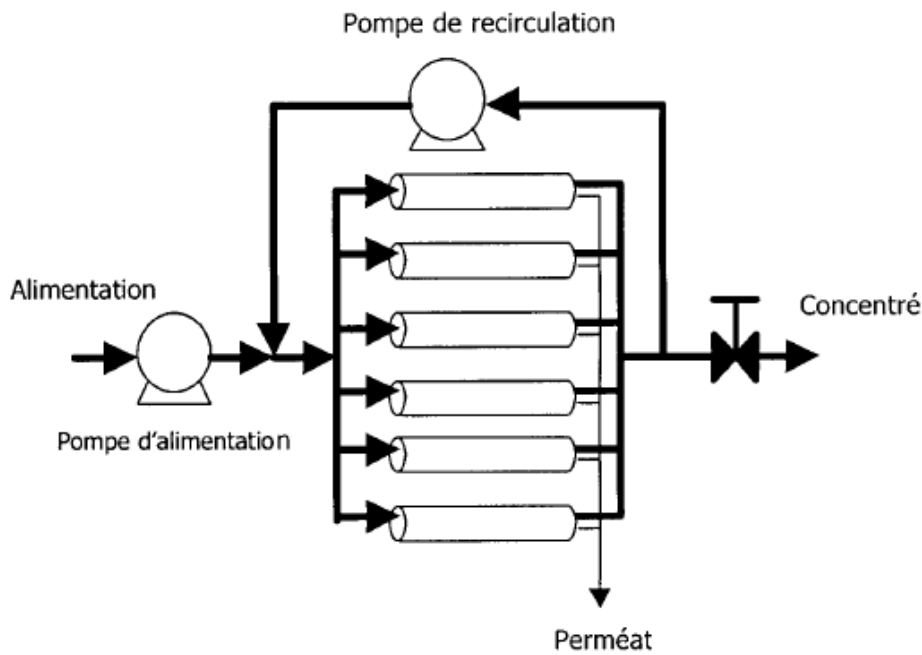


Figure II-24: Système membranaires (Configuration avec circulation) (MAUREL, 2006)

II.8.2 Système à membranes immergées

Dans un système à membranes immergées, les membranes sont plongées dans un bassin alimenté avec l'eau à traiter (figure II-25). Le côté alimentation est soumis à une pression hydrostatique et un vide partiel est appliqué du côté perméat.

L'agitation de l'eau autour des membranes (écoulement tangentiel libre) réduit l'accumulation de particules à la surface des fibres. La vitesse de soutirage du concentrat à même le bassin contrôle le taux de récupération.

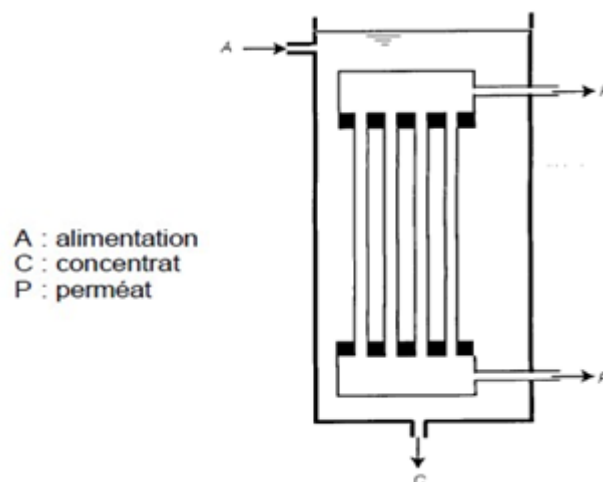


Figure II-25: Système à membranes immergées (MAUREL, 2006)

II.8.3 Principes de maintenance pour conserver l'intégrité des membranes

L'un des enjeux les plus importants de l'exploitation des systèmes membranaires est de mesurer et maintenir l'intégrité des systèmes afin que leur capacité de séparation des contaminants, établie préalablement, soit conservée.

Les conséquences d'une perte d'intégrité sont graves : passages de micro-organismes pathogènes et diminution significative de la séparation d'autres contaminants.

Deux types de techniques sont distingués suivant qu'elles permettent de vérifier directement ou indirectement l'intégrité des systèmes membranaires (cf. Tableau II-1 et Tableau II-2) (Bazargan, 2018) .

Les méthodes indirectes sont moins sensibles et moins fiables que les techniques qui permettent une mesure directe de l'intégrité. En revanche, les mesures directes impliquent un arrêt de la filtration et ne donnent, donc, qu'une information ponctuelle sur l'intégrité d'un système membranaire. Au contraire, les mesures indirectes permettent d'assurer un suivi en continu de l'intégrité des systèmes membranaires.

Dans tous les cas, l'approche consiste à établir un niveau de référence pour un système intègre et à vérifier ensuite si ce niveau est dépassé suite à un bris d'intégrité.

Tableau II-1: Techniques utilisées pour la vérification de l'intégrité des systèmes membranaires - Méthodes indirectes

Techniques utilisées (Par ordre croissant de sensibilité et de fiabilité)	Observations
Mesure de la turbidité du perméat	L'effet d'un bris mineur d'intégrité (suffisant pour laisser passer les kystes de protozoaires) n'est pas nécessairement détectable par une variation de turbidité dans le perméat. Cette méthode peut permettre de détecter en continu des bris important d'intégrité à la condition de mesurer la turbidité avec une grande précision.
Monitoring des particules dans Le perméat	La mesure est relative, c'est à dire que la quantité de particules dans le perméat est comparée avec la quantité de particules présentes dans l'alimentation. Ce type d'appareil est moins sensible qu'un compteur de particule, mais plus facile à utiliser et beaucoup moins coûteux.
Comptage des particules dans le perméat	Permet de déterminer le nombre de particules par unité de volume d'eau. Mesure réalisée pour différentes gammes de tailles de particules. Les appareils de mesures requièrent une certaine expertise et beaucoup de soin.

Techniques utilisées (Par ordre croissant de sensibilité et de fiabilité)	Observations
Tests avec des particules/micro-organismes de références	<p>Méthode consistant à ajouter de grandes quantités de particules calibrées ou de micro-organismes dans l'eau à traiter (eaux dopées) et à mesurer leur taux d'enlèvement.</p> <p>Pour des raisons évidentes de sécurité, il n'est pas possible d'utiliser des pathogènes pour tester des systèmes pleine échelle.</p> <p>Les tests avec des micro-organismes sont donc réservés aux essais pilotes. Ce genre de test peut aussi servir à établir les capacités d'enlèvement des pathogènes (log d'enlèvement) des systèmes membranaires.</p>

Tableau II-2: Techniques utilisées pour la vérification de l'intégrité des systèmes membranaires - Méthodes directes

Techniques utilisés	Observations
Mesure du point de bulle	<p>Cette technique consiste à mesurer la pression minimale d'air (le point de bulle) qu'il faut appliquer pour faire passer de l'air (apparition de bulles) à travers les défauts d'une membrane.</p> <p>Technique simple mais obligeant à démonter les modules et à les tester un par un dans le cas des systèmes sous pression.</p>
Maintien de la pression	<p>S'applique aux systèmes de micro-filtration et d'ultrafiltration du type fibres creuses. L'intérieur des fibres est drainé, puis une pression d'air inférieure au point bulle est appliquée.</p> <p>Dans un module intègre, la pression d'air baisse uniquement à cause de la diffusion de l'air à travers les pores de membrane qui sont remplis d'eau.</p> <p>Lorsque les membranes ou les joints de colle comportent des défauts, la baisse de pression est plus rapide. La vitesse à laquelle la pression diminue sert donc d'indicateur de l'intégrité de la membrane.</p>
Maintien du vide	<p>Utilisé pour vérifier l'intégrité de caissons contenant des modules fibres creuses d'ultrafiltration et de caissons contenant des modules spiralés d'osmose inverse.</p> <p>Cette technique consiste à appliquer un vide partiel du côté perméat et à suivre la vitesse à laquelle le vide diminuera. Comme pour les tests de maintien de la pression, cette vitesse de diminution du vide sert d'indicateur de l'intégrité de la membrane.</p>
Détection acoustique	<p>Cette technique s'applique aux modules à fibres creuse. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un hydrophone placé sur chaque module de filtration. En présence d'une ou plusieurs fibres cassées, il y a augmentation du niveau sonore.</p>

Techniques utilisés	Observations
	<p>Cette technique est très performante dans le cas de la filtration frontale en raison du niveau de bruit de fond plus faible (absence de pompe de recirculation). Il est alors possible de détecter une fibre cassée parme 18.000 fibres.</p> <p>Des mesures sont aussi possibles en filtration tangentielle et en rétro-lavage. Les performances de la mesure sont, cependant, moindres.</p>

II.8.4 Prévention du colmatage

La stratégie générale de prévention du colmatage peut prendre les formes suivantes :

- Pré-filtration ;
- Enlèvement plus poussé des particules et des colloïdes par un autre procédé membranaire ou par un traitement conventionnel ;
- Ajustement de pH (acidification) pour déplacer les équilibres de solutés des sels susceptibles de précipiter (sel de fer, de manganèse, de calcium, de baryum...)
- Ajout d'un agent anti-tartre pour empêcher le dépôt de sels à la surface des membranes
- Coagulation de la Matière Organique Naturelle. En effet, l'effet colmatant des floccs est, a priori, moins fort que celui des colloïdes ;
- Enlèvement du fer (Fe^{+2}) qui pourrait précipiter.

L'autre stratégie de prévention du colmatage consiste à limiter l'accumulation des agents colmatant à la surface de la membrane. La réduction de la vitesse de filtration (ou vitesse de perméation) réduit les risques de colmatage et amène à opérer les systèmes membranaires à plus faible pression transmembranaire. Cela implique d'augmenter la surface de la membrane utilisée.

L'autre manière de limiter l'accumulation des agents colmatant à la surface de la membrane est d'augmenter le rétro-transport des agents colmatant vers le cœur de l'écoulement.

Le colmatage biologique peut être limité en faisant des désinfections régulières du système. Le choix des solutions désinfectantes est alors limité par la nature du matériau membranaire. Les stratégies de prévention du colmatage peuvent être combinées.

II.8.5 Techniques de nettoyage des membranes

Le nettoyage des membranes a pour but de limiter le colmatage irréversible de perméabilité, et par le fait même, à prolonger la durée de vie des membranes.

Les différentes techniques de nettoyage sont :

- Le rinçage ;
- Le rétro-lavage à l'eau ou à l'air. Les fréquences des rétro-lavages varient de 15 à 60 minutes tandis que leurs durées varient que 30 s à 3 minutes ;
- Le nettoyage mécanique avec une balle de mousse (uniquement pour les modules tubulaires et pour le colmatage dû à la Matière Organique Naturelle des eaux de surface)
- Le nettoyage chimique de la membrane (trempage et / ou circulation nettoyante)

Il est important aussi de procéder à des désinfections périodiques des systèmes membranaires (circuits / compartiment d'alimentation et de perméat). Les notices d'emploi détiennent des recommandations précises quant aux produits à utiliser pour désinfecter les membranes sans les détériorer.

II.9 Rejets du procédé

Les chaînes de traitement utilisant des membranes produisent différents types de rejets :

- Concentrat ;
- Eaux de rinçage ;
- Eaux de lavage.

Le concentrat est rejeté en continu pendant la production. Le débit et la composition du concentrat sont liés aux taux globaux de récupération et de séparation. Le taux de récupération étant, en général, supérieur ou égal à 75%, le débit de concentrat correspond au maximum à 25% du débit d'alimentation.

Les eaux de rinçage et de lavage sont rejetées de manière discontinue. Lorsque la chaîne de traitement comprend un ou des ajouts de produits chimiques dans l'eau brute (coagulant, oxydant, acide, agent anti-tartre, etc.), les rejets des membranes contiennent en plus des substances présentes dans l'eau brute, les produits injectés pour traiter l'eau.

II.10 Apport d'un suivi à long terme

Le suivi à long terme permet de construire un précieux historique des membranes depuis le début de leur utilisation (base de données). Cet historique peut servir à ajuster les conditions d'opération et à prédire la durée de vie des membranes.

II.10.1 Limites des procédés membranaires

II.10.1.1 Polarisation de concentration

Les procédés membranaires sont utilisés pour accomplir une séparation : la concentration dans le perméat (C_p) est plus faible que dans l'alimentation (C_a) : c'est le concept de base (figure II-26).

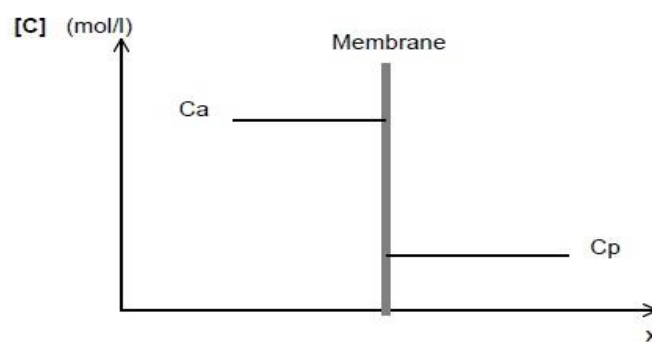


Figure II-26: Séparation membranaire : concept de base (ZIZI, 2013)

Les solutés retenus s'accumulent progressivement à la surface de la membrane sous l'effet du flux de convection normale à la membrane J_c . La concentration croît graduellement dans la zone interfaciale entre la membrane et la veine liquide : c'est la polarisation de concentration.

Une telle croissance génère un flux diffusionnel de l'interface membranaire vers la solution, qui assure l'évacuation du flux de solutés en excès. A l'état stationnaire, le flux de soluté dans le sens solution-interface (J_c) est en équilibre avec le flux de soluté à travers la membrane (J_p) et le flux diffusionnel (J_d) dans le sens interface membranaire vers la solution (figure II-27).

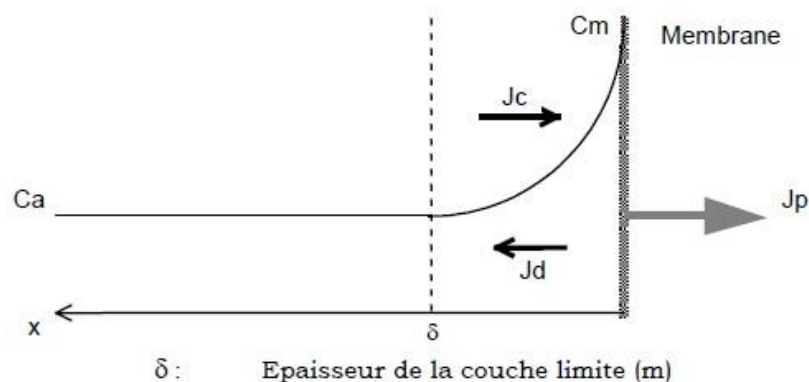


Figure II-27: Polarisation de concentration (ZIZI, 2013)

II.10.1.2 Colmatage des membranes

Le colmatage peut être défini comme le dépôt de particules, de colloïdes, de macromolécules, de sels retenus à la surface ou dans la membrane, qui provoque la décroissance continue et progressive du flux en quelques secondes ou en quelques mois.

Le type de séparation et le type de membrane déterminent l'étendue du colmatage. La cause peut être un précipité organique ou minéral, ou encore le dépôt de particules solides. Pour certaines solutions, le colmatage dépendra de paramètres physiques ou chimiques comme la concentration, la température, le pH, la force ionique des solvants et des composés, et le choix du matériau membranaire.

Ce serait un non-sens de vouloir supprimer complètement le colmatage puisqu'il est inhérent à la conception des procédés à membranes, mais il est possible de le prévoir et de le réduire.

Il existe plusieurs types de colmatages :

a) Le colmatage "rapide" est un phénomène d'adsorption. Il peut intervenir en un temps très court : un moyen de détection simple est de mouiller la membrane avec le liquide d'alimentation sans appliquer de pression. Si une décroissance marquée du flux est observée en sortie, cela indique une forte probabilité de colmatage "rapide" causé par des composés présents dans l'alimentation et rapidement adsorbés dans les pores de la membrane testée.

b) Le colmatage "cumulatif" est la lente dégradation du flux transmembranaire pendant une série d'expériences. Il peut réduire le flux du perméat de moitié à plus ou moins longue échéance. C'est souvent le résultat de la décomposition progressive de composés au contact de la membrane et d'un réarrangement en une couche stable difficile à supprimer.

c) Le colmatage "destructif" est, comme son nom l'indique, totalement irréversible. Une substance présente dans l'alimentation, parfois même à très faible concentration, ayant une affinité pour le matériau de membrane, est habituellement coupable. Certains composés peuvent lentement s'adsorber dans la membrane et dans les plus mauvais cas changer irréversiblement la structure de la membrane.

II.10.2 Contrôle du colmatage et de la polarisation de concentration

La conséquence du colmatage et de la polarisation de concentration est toujours la réduction des performances. L'étendue des dommages est spécifique et dépend beaucoup de

l'application. Aussi, la méthode pour réduire le colmatage et la polarisation peut être seulement décrite en général à cause de la complexité des phénomènes. Toutefois, les méthodes peuvent être classées en quatre catégories :

- Le prétraitement de la solution d'alimentation,
- L'ajustement ou l'adaptation des propriétés des membranes,
- Le nettoyage des membranes,
- L'amélioration des conditions opératoires.

Elles peuvent être appliquées une à une successivement. Quelquefois une opération suffit. Cela dépend du procédé et de la solution à traiter.

II.11 Comparaison entre osmose inverse et distillation

Les techniques utilisant l'énergie thermique telle que la distillation consomment énormément d'énergie et reste très coûteuse au niveau des installations industrielles. C'est pourquoi de nombreuses améliorations ont été effectuées sur cette technique permettant de réduire et donc d'économiser l'énergie utilisée.

Ainsi, la distillation multi-flash (ou multi-étages), la distillation à multiple effet ou encore la compression de vapeur, sont des procédés permettant une réduction considérable des énergies consommées.

- Avec la distillation de base (à simple effet), la production d'1 m³ d'eau distillée nécessitait 700 kW/h d'énergie thermique ;
- Cependant avec la distillation multi-flash et à multiple effet, on ne requiert plus que
- 100kW/h (énergie thermique) soit 7 fois moins que pour la distillation à simple effet ;
- Grâce la compression de vapeur le même volume d'eau est produit avec une énergie électrique de l'ordre de 10 kW/h.

Ces améliorations représentent de réels progrès au niveau du coût de la distillation industrielle. De plus ces procédés présentent un autre avantage relevant du domaine sanitaire (assurer une eau saine pour l'organisme). Effectivement dans ces conditions de température (100°C) les microbes sont instantanément détruits. Mais, malgré ces améliorations, ces techniques restent tout de même peu rentables, excepté dans le cas où les usines ont accès à une source d'énergie peu coûteuse, et ne produisent que de faibles volumes d'eau.

Cependant, même si ces procédés sont très utilisés, d'autres techniques (techniques membranaires) connaissent un réel essor et constituent une vraie innovation dans le marché du dessalement de l'eau de mer.

Les techniques membranaires constituent l'ensemble des procédés introduisant l'utilisation d'une membrane, telles que l'osmose inverse et l'électrodialyse, de plus en plus employées dans le dessalement de l'eau de mer.

Ce sont les techniques les plus économiques optimisant la production d'eau purifiée et donc augmentant le rendement grâce à cette nouvelle technologie (la membrane). De plus, avec ces techniques, essentiellement l'osmose inverse on obtient une eau très pure présentant des conditions idéales pour la santé :

- Son pH (6,6) est très favorable à l'organisme (idéal pour la digestion, l'assimilation des aliments et rééquilibre de pH du sang).
- Permet une parfaite élimination des toxines par les reins grâce à sa résistivité : (c'est à dire sa capacité à s'opposer au passage du courant électrique : plus la résistivité est élevée, moins le liquide contient d'ions qui permettent la circulation du courant, et donc plus l'eau est pure).
- L'eau osmosée est antioxydante, c'est à dire qu'elle ne peut pas s'oxyder, se charger en oxyde qui est néfaste pour la santé. Cette eau est plus saine que celle généralement obtenue dans les bouteilles qui sont distribuées à la consommation humaine ; puisqu'elles ne sont pas chargées de rayonnements nocifs (dans les lieux de stockage) contrairement à ces dernières.

Malgré la rentabilité des techniques membranaires par rapport aux techniques thermiques, elles présentent cependant quelques inconvénients. En effet une membrane n'est utilisable qu'environ 3 ans, ce qui veut dire qu'à longue durée une usine dépense énormément en frais d'installations puisque les membranes industrielles sont relativement chères.

De plus, le rendement n'est pas total, à la fin de ces procédés, il reste 25% d'eau non utilisable (il s'agit de la saumure, solution très concentrée en sel), rejetée alors dans la mer ce qui provoque un réel désastre pour l'écosystème.

II.11.1 Procédés hybrides

C'est la combinaison des procédés de dessalement par voie thermique et de dessalement par osmose inverse et de production de puissance électrique qui a ouvert la voie au dessalement hybride.

Le schéma ci-dessous illustre cette combinaison.

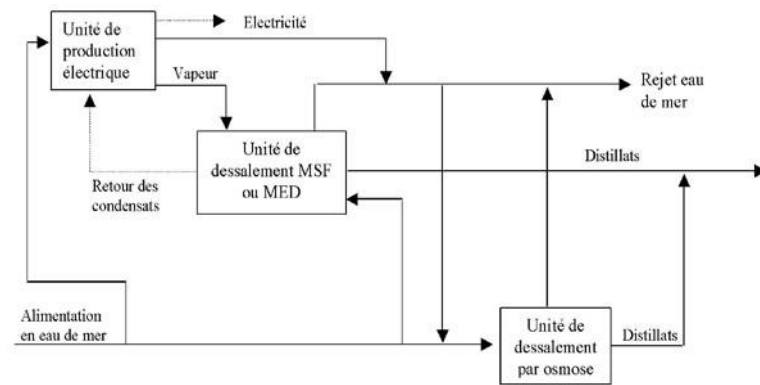


Figure II-28: Schéma de principe des procédés hybrides (ZIZI, 2013)

II.12 Autres procédés

Certains autres procédés, qui n'ont pas connu le succès commercial des procédés décrits ci-dessus, méritent d'être mentionnés en raison de leur originalité ou de leur intérêt scientifique.

II.12.1 Congélation

Ce procédé consiste à refroidir l'eau de mer et à recueillir les cristaux de glace qui sont fondus pour obtenir de l'eau pure. En pratique, le procédé est plus compliqué car, la séparation n'est pas tout à fait complète. Il est nécessaire de séparer les cristaux de la saumure et de les laver avant de les fondre.

II.12.2 Séparation par formation d'hydrates

Ce procédé utilise le fait que les hydrocarbures de faible poids moléculaire, tel que le propane, peuvent se combiner avec de l'eau pour former des hydrates qui cristallisent à basse température et se décomposent facilement. Dans la cellule de formation des hydrates, les cristaux sont séparés de l'eau de mer, lavés puis décomposés en eau douce et propane. Le propane peut alors être comprimé et détendu dans la cellule pour refroidir l'hydrate etc.

II.12.3 Échange d'ions

Certaines résines, insolubles, ont la propriété d'échanger certains de leurs ions avec ceux des sels dissous dans la solution (l'eau de mer) avec laquelle on met ces résines en contact. On utilise les résines anioniques pour échanger les anions de la solution par des ions OH⁻ et les résines cationiques qui permettent de remplacer les cations (Na⁺) par des ions H⁺. Ce procédé est plutôt utile pour déminéraliser l'eau de faible teneur en sel.

II.12.4 Chauffage solaire

Les diverses variantes de distillation par l'énergie solaire cherchent à reproduire le cycle hydrologique naturel. Les rayons du soleil chauffent la saumure et une partie de l'eau évaporée est condensée sur une surface froide et le condensat collecté comme eau potable produite.

II.12.5 Dessalements par les réacteurs nucléaires

Les techniques de dessalement ne dépendent pas de la source d'énergie primaire et ainsi le dessalement nucléaire n'est pas une technologie spécifique de dessalement : c'est un complexe intégré dans lequel le réacteur nucléaire et l'installation de dessalement sont construits sur le même site.

L'utilisation des énergies d'origine fossile pour le dessalement de l'eau de mer ne peut pas être durable non seulement parce que les réserves en combustibles fossiles sont limitées, mais également parce que l'utilisation de ces combustibles conduirait à une production massive des gaz à effet de serre et donc à des catastrophes environnementales inacceptables.

Dans ce contexte, l'utilisation de l'énergie nucléaire devient donc une condition *sine qua non* pour un développement durable.

II.12.6 Dessalements par les énergies renouvelables

En plus des procédés de dessalement décrites précédemment, il existe une autre possibilité, c'est l'utilisation des énergies renouvelables avec des procédés de dessalement conventionnels à haut rendement :

- Distillation à multiples effets associée à des capteurs solaires ;
- Osmose inverse associé soit à des photopiles soit à des aérogénérateurs.

Le développement de ces procédés se heurte à deux problèmes :

- Le coût élevé des investissements à la fois de la source d'énergie ainsi que de l'installation de dessalement à haut rendement ;
- Le caractère discontinu et aléatoire des énergies renouvelables qui nécessite un stockage d'énergie plus ou moins important.

II.13 Conclusion

Le présent chapitre a permis de présenter les différentes techniques de dessalement de l'eau de mer, en mettant en évidence leurs avantages et leurs limites. Nous avons constaté que

chaque technique présente des spécificités techniques, économiques et environnementales qui la rendent plus ou moins adaptée selon le contexte d'utilisation. Cependant, toutes ces techniques ont en commun le fait de contribuer à répondre à la demande croissante en eau potable dans le monde, particulièrement dans les régions arides et semi-arides.

A l'heure actuelle, deux champs de recherche apparaissent prometteurs pour l'avenir : les centrales hybrides d'une part et l'utilisation des énergies renouvelables. En effet, l'association performante d'une centrale thermoélectrique et d'une unité de dessalement par osmose inverse installées sur un même site en bord de mer, permet à la fois, une économie d'énergie et un respect de l'environnement et donc un développement durable.

En conclusion, les techniques de dessalement de l'eau de mer sont une solution prometteuse pour répondre aux défis de l'eau douce dans les régions où l'eau est rare. Cependant, il est important de prendre en compte les aspects environnementaux et économiques liés à l'utilisation de ces techniques. Il convient également de poursuivre la recherche en vue d'améliorer leur performance et leur efficacité, ainsi que de développer de nouvelles technologies plus performantes et plus respectueuses de l'environnement.

Chapitre III :

Impact des rejets de saumure sur le milieu marin

Chapitre III: Impact des rejets de saumure sur le milieu marin

III.1 Introduction

La demande en eau potable a considérablement augmenté et va continuer de croître et avec elle la production d'eau dessalée, qui est aujourd'hui d'environ 142 million de mètres cubes par jour (Jones et al., 2019) Certes, le dessalement de l'eau de mer, à travers les différentes techniques de dessalement que nous avons passé en revue au niveau du chapitre II, amènent une solution aux besoins d'eau douce des pays en situation de déficit hydrique. Néanmoins cette technique de production d'eau potable a des impacts positifs et autres négatifs, c'est ce que nous allons décrire ci-après.

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

Le présent chapitre s'appuie sur un ensemble d'informations exploitées à partir de la littérature existante sur le sujet ainsi que sur des données collectées auprès des acteurs de l'eau (AMITOUICHE, 2016).

III.2 Compréhension des Rejets de Saumures

Le dessalement de l'eau de mer est un processus essentiel pour la fourniture d'eau douce dans les régions confrontées à des pénuries d'eau. Cependant, ce processus engendre la production de saumures (Figure III-1), des solutions salines hautement concentrées résultant de la séparation des sels dissous de l'eau. Il est essentiel de comprendre la nature des saumures pour évaluer correctement leur impact et déterminer les stratégies de gestion appropriées.



Figure III-1: Rejet de saumure de la station de dessalement de Mainis

III.3 Origine des Saumures :

Les saumures sont générées au cours du processus de dessalement de l'eau de mer. Les techniques couramment utilisées, telles que l'osmose inverse et la distillation, produisent des flux de saumures en rejetant les sels dissous et les impuretés concentrés dans l'eau de mer initiale. Ces saumures sont le sous-produit inévitable de la production d'eau douce à partir de l'eau de mer.

III.4 Composition Chimique des Saumures :

La composition chimique des saumures peut varier en fonction de divers facteurs, notamment la technologie de dessalement utilisée, la source d'eau de mer et les conditions opérationnelles spécifiques de l'installation. Cependant, de manière générale, les saumures sont caractérisées par leur forte concentration en sel, en particulier en chlorure de sodium, ainsi que d'autres sels et impuretés. Cette composition chimique spécifique a des implications importantes pour leur gestion et leur impact environnemental.

Les tableaux ci-dessous présentent les propriétés chimiques des saumures provenant de différentes sources au niveau mondial, offrant un aperçu détaillé des variations possibles en termes de composition.

Tableau III-1: Résultats d'analyse de rejet de saumure (SDEM Mainis-Algerie)

Composant	Unité	Valeur
PH	--	7,79
Température	(C°)	17,3
Conductivité	(μ S/cm)	88790
TDS	Ppm	58601,4
Turbidité	NTU	0
TSS	mg/l	0
Salinité	g/l	68,91
Bore	mg/l	5,2<
Sulfate	mg/l	7394
Chlorure	mg/l	38162,5
Calcium	mg/l	3286,5
Magnésium	mg/l	10613,5
Alcalinité	CaCO3	3780

(BOUCHAKOUR & SADOK Amina, 2017)

Tableau III-2: Propriétés chimiques des saumures de différentes sources mondial.

Pays	Chine	Italie	Espagne	Oman	Qatar	Émirats Arabes Unis
Emplacement de l'usine	Hefei, Anhui	Calabri	Îles Canaries	Esheriah	Abu-fintas	Qidfa Fujairah
Température	NR	NR	NR	NR	40	29.1
Potentiel d'hydrogène	NR	NR	NR	NR	8.2	7.99
Calcium (mg/L)	0.306	625	814	841	1350	631
Magnésium (mg/L)	6.193	2020	2751	1900	7600	2096
Sodium (mg/L)	159.4	15,5	20,657	14,8	NR	18,293
Potassium (mg/L)	0.4830	NR	814	631	NR	NR
Strontium (mg/L)	NR	NR	NR	18.3	NR	NR
PH	NR	NR	NR	6.94	NR	NR
Bicarbonates (HCO ₃) (mg/L)	NR	199	452	221	3900	149.5
Chlorure (mg/L)	NR	28,8	37,639	24,062	29	31,905
Sulfate (mg/L)	NR	3060	5628	6139	3900	4800
Nitrate, (mg/L)	NR	NR	NR	5.5	NR	NR
Chlore libre (Cl ₂), ppm	NR	NR	NR	NR	Trace	NR
Silice SiO ₂ (mg/L)	NR	NR	NR	NR	NR	17.6
Silicium électrique	1000	NR	NR	61,1	NR	79.6
Silicium (mg/L)	NR	NR	9	NR	NR	NR

(Bello et al., 2021)

III.5 Impacts positifs du dessalement :

Le principal effet positif direct du dessalement est l'accroissement des disponibilités en eau. En effet, il permet de donner accès à une ressource garantie et indépendante des aléas climatiques et par conséquent, il contribue à résoudre une situation de pénurie et de stress hydriques pour les populations.

Grâce aux progrès réalisés en matière de construction de stations de dessalement, la consommation moyenne de l'eau en Algérie est passée à 185 l/j/hab actuellement alors qu'elle était de 90 l/j/hab en 2000 selon le ministère des ressources en eau.

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

Une part, relativement importante des travaux, est généralement réalisée par des entreprises locales ou régionales (terrassements, fournitures et amenée de matériaux, génie civil, les voiries et les réseaux divers, pose des conduites...etc).

III.6 Impacts négatifs des rejets de saumures :

Les deux procédés de dessalement d'eau de mer, distillation et séparation par membrane, génèrent tous les deux des saumures, concentrés des sels présents dans la mer.

A titre d'exemple, pour produire par dessalement d'eau de mer les 2 L de consommation journalière d'eau de d'alimentation, il faut dessaler environ 4 L d'eau de mer, ce qui conduit au rejet de 160 g de sels. Ces sels sont le plus souvent rejetés dans le milieu naturel, et ceci pour plusieurs raisons :

- L'évaporation totale des saumures génèrerait une surconsommation d'énergie,
- La production de sels dépasserait la capacité d'utilisation humaine, entraînant le stockage à haut risque de lixiviation de millions de tonnes de sels (une installation de 50 000 m³/j d'eau dessalée produit environ 400 t de sels par jour),
- Le cout des installations d'évaporation rendrait le dessalement inaccessible économiquement.

En réalité, les stations de dessalement rejettent une charge de constituants de l'eau de mer équivalente à la charge des constituants contenus dans l'eau d'alimentation, mais dans un volume d'eau moindre.

- Avec le procédé MSF, la salinité de la saumure concentrée est de 1,1 fois plus élevées que celle de l'eau d'alimentation. Le concentré est généralement dilué avec l'eau de refroidissement avant d'être rejeté, et par conséquent le facteur de concentration est de 1,05, ce qui reste sans impacts sur l'environnement.
- Avec le procédé OI, la salinité du concentré est de 1,3 à 1,7 fois plus élevée que celle de l'eau d'alimentation. Par exemple si l'on admet une salinité type de 39% pour la Méditerranée, cela signifie que la saumure issue des usines OI varie en moyenne d'environ 51 à 66%.

Afin d'illustrer ce constat, on s'est intéressé à l'analyse des compositions chimiques de la saumure par rapport à celle de l'eau de mer dans le cas d'usines OI et MED. Pour ce faire, on s'est basé sur deux études universitaires dont les principaux résultats sont résumés dans le tableau ci-après :

Tableau III-3: Caractéristiques des eaux produites et rejetées par les procédés de dessalement

Étude	Principaux résultats
<p>Dessalement de l'eau de mer à la station de MAINIS et son impact sur l'environnement (TAHRAOUI DOUMA, 2010)</p> <p>Procédé : OI</p>	<p>L'eau produite :</p> <ul style="list-style-type: none"> • L'eau produite par l'unité de dessalement répond aux normes de potabilité. • Une minéralisation élevée des eaux après dessalement qui se traduit par une présence des sulfates (594 mg/l), de sodium (519 mg/l), un taux de chlorures de 586 mg/l. • Une conductivité électrique variant entre 1 143 et 1 943 ms/cm. <p>L'eau rejetée :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Les rejets de dessalement (saumure) ont un niveau de salinité élevé par rapport à l'eau de mer (58,85%), • Un taux de chlorures de 28 625,83 mg/l et en sulfates (4 569,28 mg/l).
<p>Les procédés de dessalement de l'eau de mer et leur impact sur l'environnement (Tlemcen) (Benmoussat A & Habi, 2017).</p> <p>Procédé : MED</p>	<p>L'eau de mer brute :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La salinité de l'eau à traiter est de 36,5 g/l. • La conductivité électrique à 20°C est mesurée à 53,48 mg/l. • La dureté totale a une valeur de 760°F. <p>L'eau rejetée :</p> <ul style="list-style-type: none"> • La salinité de 49 g/l, soit 34% par rapport à l'eau d'alimentation. • La conductivité à 20°C est de 67,03 mg/l avec un pH qui varie autour de 8. • Une eau très dure où les valeurs sont de 820°F pour la dureté totale.

III.7 Rejets de produits chimiques

Les usines de dessalement utilisent des produits chimiques pour le traitement de l'eau d'alimentation et de l'eau produite. La plupart de ces produits sont utilisés avant tout comme agents biocides, antitartre, antisalissures et anti-mousse, et ils finissent par modifier relativement la composition de la saumure concentrée.

Ces produits chimiques peuvent différer en fonction des principaux procédés de dessalement, à savoir MSF et l'osmose inverse.

Tableau III-4: Produits chimiques utilisés dans les procédés de dessalement

Phase	Objet	Produits chimiques ajoutés	Devenir des produits
Prétraitement			
Ajustement du pH à 7	Diminue la concentration de carbonate (et la précipitation de carbonate). Protège les membranes.	Acide (H ₂ SO ₄)	Modifie le pH de l'eau produite et de la saumure concentrée, le sulfate est retenu dans la saumure concentrée.
Antitartre	Prévient la formation de tartre sur les membranes.	Agents chélateurs et dispersants	Les complexes formés sont retenus dans la saumure concentrée.
Coagulation-filtration	Prévient les salissures et l'encrassement des membranes	Coagulants-floculants	Les agents floculants formés se séparent par décantation et sont éliminés par filtration.
Désinfection	Prévient l'encrassement biologique et élimine les microorganismes qui se nourrissent des membranes	Chlore (ou biocides)	Chlore également réparti dans le perméat et la saumure concentrée.
Décoloration	Protège les membranes sensibles au chlore	Bisulfate de sodium ou Charbon Actif Granulaire (CAG)	Réagit avec le chlore pour former le sulfate et chlorure qui sont retenus dans la saumure concentrée.
Élimination des gaz dissous	Élimine les gaz nauséabonds, C,	Aération dégazage	Oxyde H ₈ et NH ₄ dans l'eau produite et dans la saumure concentrée.
Ajustement pH à 7	Prévient la corrosion du système de distribution, protège la flore et la faune aquatiques en cas de rejet en surface	NaOH, Carbonate de sodium anhydre, chaux	Accroît le niveau de sodium dans l'eau produite et dans la saumure concentrée.
Désinfection	Prévient la prolifération bactérienne dans le système de distribution, protège la flore et la faune aquatique si nécessaire	Chlore (ou chlorométrie)	Le chlore est retenu dans l'eau produite et la saumure concentrée
Réduction du niveau de chlore	Élimine le chlore et d'autre oxydants	Bisulfite de sodium	Accroît les niveaux de sulfates et de chlorures dans l'eau produite et dans la saumure concentrée.
Oxygénation	Accroît l'oxygène dissous à un niveau concourant au développement de la flore et de la faune aquatique	Aération	Accroît l'oxygène dissous dans la saumure concentrée.
Élimination d'autres formes chimiques	Diminue tous les polluants susceptibles d'être présents dans l'eau produite et dans la saumure concentrée	En fonction des formes chimiques	

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

a) Produits de la corrosion

Les usines de dessalement ont procédé thermique rejettent du cuivre, du nickel, du fer, du chrome, du zinc et d'autres métaux lourds en fonction des alliages présents dans la filière de production.

Pour la Méditerranée, les niveaux de cuivre dans l'eau de mer couvrent une large gamme de valeurs

- Dans les eaux : de 0,04 à 0,70 ppb (partie par milliard)
- Dans les eaux côtières : de 0,01 à 50 ppb (g/l)

Par exemple, si on admet une valeur de 20 ppb de cuivre dans l'effluent de saumure d'une usine de dessalement ayant une capacité de 50 000 m³/j et un taux de conversion de l'eau de 10%, alors plus de 10 kg de cuivre seront rejetés sur le site avec les 500 000 m³ de saumure par jour.

Cet aspect est très préoccupant puisque, en Méditerranée, le nombre des usines MF de dessalement s'accroît rapidement.

Les produits de la corrosion ne sont pas si importants dans le procédé OI puisque celui-ci se déroule à des températures ambiantes et que les parties métalliques du système sont surtout en acier inoxydable.

b) Agent antitartre

Les dépôts de tartre se forment sur les surfaces du matériel de dessalement industriel. La présence de tartre entraîne inmanquablement des difficultés d'exploitation et/ou une perte de rendement. Dans le procédé par distillation par exemple, le tartre réduit le taux de transfert de la chaleur à travers les parois atteintes et réduit le débit de liquide dans les tuyaux.

Différentes méthodes sont appliquées pour prévenir l'entartrage dans les procédés par distillation ou d'osmose inverse. Les polyphosphates, qui retardent les dépôts de tartre, sont un agent antitartre précoce, peu onéreux, mais d'une efficacité restreinte et qui a pour inconvénient d'être thermolabile : il est hydrolysé en ortho-phosphaté à des températures supérieures à 90°C.

Ces polyphosphates sont utiles pour empêcher la dureté (calcaire) présente dans l'eau de se déposer sur les parois des conduites sous l'effet de la chaleur.

Les additifs antitartres ou séquestrant ont comme objectifs également d'inhiber la formation de sel de sulfate le plus largement utilisés semblent être des polymères de l'acide maléique. Ces polymères empêchent les matières dissoutes de précipiter, décanter et former

une croûte sur les surfaces et ils entravent la formation de cristaux en altérant la structure réticulaire, permettant ainsi la formation d'une boue molle qui n'adhère pas ou ne se développe pas sur les surfaces métalliques et sur les membranes.

c) Agents antisalissures

Les salissures (fouling) constituent un processus à phases multiples dans lequel interviennent de nombreux groupes d'organismes. Elles commencent par l'adsorption de substances polymères de l'eau non traitée sur les surfaces solides, ce qui permet la formation d'un film précurseur pour la colonisation par des bactéries. A ce premier biofilm adhèrent des épiphytes, puis des microalgues, des protozoaires et des champignons, et enfin des débris, détritus et particules inorganiques.

Depuis longtemps, les composés de chlore sont utilisés pour désinfecter les systèmes d'apport d'eau de mer, afin de prévenir les salissures. Habituellement, on ajoute du chlore pour satisfaire la demande en chlore, dans le cas d'OI, l'objectif étant de maintenir un chlore résiduel de l'ordre de 0.5 ppm en sortie du micro-filtre dans le cas de substance organique en polyamide ce chlore doit être neutralisé en amont de la membrane. Un procédé bien conduit vise à obtenir une concentration de chlore nulle à l'émissaire.

d) Agents anti-mousses

La mousse produite par l'eau de mer aux étages du procédé de distillation multi-flash est imprévisible mais a tendance à poser un problème plus grave quand les séparateurs sont proches de la surface du courant de saumure, ce qui ne permet de séparer qu'un volume réduit en phase aqueuse et phase vapeur. Les agents anti-mousses sont habituellement des poly-glycols alkylés, des acides gras et des esters d'acides gras. Les agents sont tensio-actifs à l'interface eau-vapeur et empêchent la formation de mousse. On ajoute habituellement ces produits à raison de 0,1 ppm, mais on observe fréquemment un surdosage.

La formation de mousse est une fonction des constituants organiques de l'eau de mer qui sont principalement des produits d'excrétion et de dégradation d'algues planctoniques. Dans le cas de l'OI, il est nécessaire d'ajouter des agents anti-mousses.

e) Coagulants

Les coagulants réduisent les particules en suspension au cours de pré-traitement, par le biais de coagulants et de floculants, tels que chlorure ferrique et le sulfate d'aluminium et les adjuvants de coagulation, tels que polymères. L'utilisation du chlorure ferrique comme coagulant peut affecter la couleur de la saumure et réduit partiellement la pénétration de la lumière.

f) Rejet des eaux de lavage contre-courant des membranes dans les usines d'OI

Dans les usines d'osmose inverse, le nettoyage et le stockage des membranes peuvent engendrer des eaux potentiellement dangereuses. Les membranes doivent être nettoyées à des intervalles de trois à six mois en fonction de la qualité de l'eau d'alimentation et du fonctionnement de l'usine.

Les formulations utilisées pour le nettoyage des membranes sont habituellement des solutions alcalines ou acides aqueuses. De plus, une solution chimique de préservation (généralement à base de bisulfite de sodium) est utilisée pour le stockage des membranes.

III.8 Impacts des rejets en mer

Les effets négatifs potentiels des rejets d'usines de dessalement sur les ressources marines sont tempérés par les facteurs suivants (lignes directrices) :

- *Le volume total de la saumure étant libéré* : Par exemple, le potentiel de dommages à l'environnement à partir de petites quantités de rejet de saumure peut différer considérablement des impacts potentiels associés à des quantités plus grandes des rejets. Les rejets de grandes quantités de la saumure concentrée exigent un examen plus approfondi des impacts potentiels sur l'environnement que celui des petits volumes.
- *Les constituants de la saumure* : Les constituants des rejets saumures peuvent avoir des effets négatifs sur les organismes marins des biocides, métaux de hautes concentrations, et faible teneur en oxygène. En cas de détection, ces constituants doivent être enlevés ou neutralisés avant rejet.
- *Le facteur de dilution de la saumure avant rejet* : La forte concentration en sel dans le rejet ainsi que les fluctuations des taux de salinité peuvent tuer les organismes à proximité de l'émissaire qui ne peuvent tolérer ni niveau élevé de salinité, ni les fluctuations. En outre, les rejets des usines de dessalement sera plus dense que l'eau de mer et pourrait couler au fond, ce qui pourrait causer des impacts négatifs pour les communautés benthiques.
- *Les changements de la salinité et/ou la température des rejets de saumure* : cela peut aussi modifier les schémas de migration des poissons le long de la côte. Si certaines espèces de poissons sens un changement de la salinité ou la température, ils peuvent éviter la zone du panache et passer plus au large.

Les effets de ces rejets sur le milieu marin, comme l'ont démontré de nombreuses études, sont les suivants :

Anoxie au niveau des fonds marins : la colonne d'eau se trouve divisée en deux : l'eau de mer constitue la couche supérieure et la saumure la couche inférieure. Dans des conditions de calme du milieu récepteur, avec un faible renouvellement des algues, la présence d'espèces benthoniques, consommatrices d'oxygène, peut conduire à des périodes d'anoxie du fond marin.

Diminution de la lumière : la présence d'un fluide hypersalin modifie le coefficient de réflexion de la lumière filtrée, provoquant la formation d'un brouillard qui rend difficile le passage de la lumière, affectant ainsi la photosynthèse des espèces marines végétales. Cela s'accroît avec la turbulence, provoquée par le rejet, principalement s'il est sous forme de jet. La Posidonie océanique et autres communautés benthoniques requièrent beaucoup de lumière, ce qui implique de maintenir une haute transparence des eaux.

Affectation des espèces marines : une réduction significative a été détectée dans les communautés des échinodermes (utilisés comme bioindicateurs pour leur sensibilité), près des zones de rejet : par exemple, effets négatifs sur les espèces échinodermes *Paracentrotus lividus* et misidaceo *Leptomysis posidonie* (figure III-2). Certaines recherches indiquent que la mortalité de nombreuses flore marine et de la faune peut se produire à des concentrations de salinité supérieure à 40 g/l, avec des espèces d'algues particulièrement sensibles aux augmentations au-delà de cette limite. Toutefois, les fonctions physiologiques (par exemple, la reproduction et la croissance) de nombreuses espèces peuvent être affaiblies, à des concentrations beaucoup plus faibles de la salinité que cela. Par conséquent, l'adoption d'une approche de conservation de la salinité d'environ 2-5g/L au-dessus des concentrations de fond (Moyenne de 35 g/L) peut entraîner des chroniques et des éventuels effets néfastes sur des espèces plus sensibles. Les impacts écologiques varient avec le site, la taille et la conception de l'usine de dessalement, ainsi que l'écologie et l'hydrodynamique de l'eau réceptrice.



Figure III-2: Image de la Posidonie océanique (Cambridge et al., 2019)

Jeune *Posidonia australis* après 7 semaines d'exposition à la saumure suivies de 2,5 semaines de récupération dans l'eau de mer ambiante. Les plantules exposées à 50 % de saumure présentaient une croissance réduite des pousses et des racines par rapport aux témoins exposés à 25 % de saumure et à l'eau de mer. Les plantules exposées à 100% de saumure n'ont pas eu de croissance mais ont montré une certaine reprise lorsqu'elles ont été transférées à l'eau de mer, avec une croissance des pousses pâle et rabougrie, mais surtout pas de croissance des racines, La Figure III-3 : illustre visuellement ces résultats, offrant une représentation des variations de croissance observées dans les conditions de saumure différentes.(Cambridge et al., 2019)

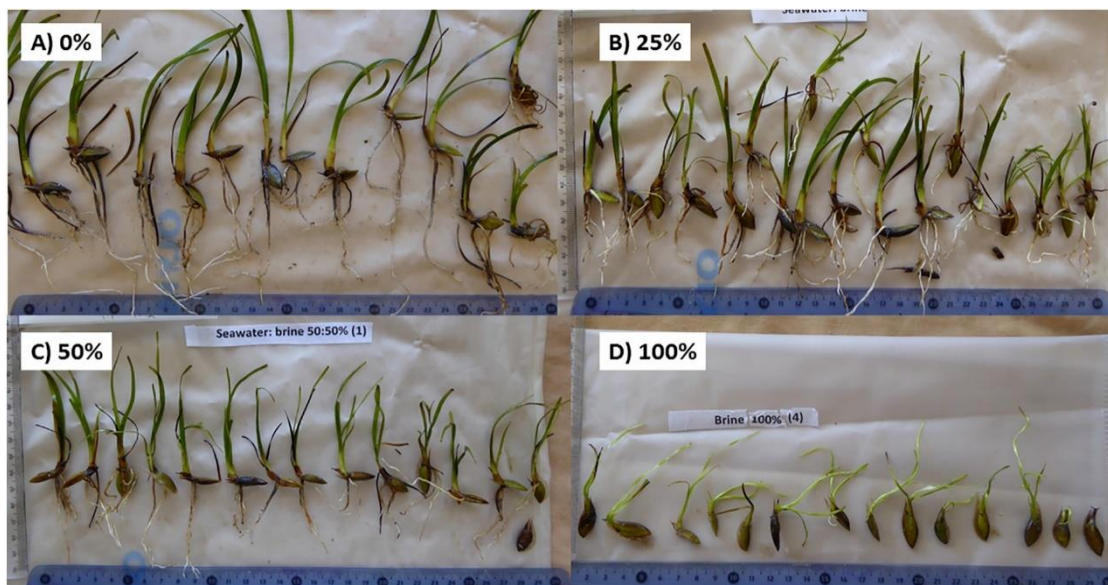


Figure III-3: Résultat d'expérience de croissance de Posidonie Australie

(Cambridge et al., 2019)

Affection des phanérogames marines : la mer Méditerranée est la zone du monde où le plus grand nombre d'études a été réalisé à ce sujet. Ils ont détecté des effets négatifs sur les phanérogames marines. Notamment, en ce qui concerne la Posidonia océanique, une augmentation de la mortalité des individus a été détectée, ainsi qu'une apparition de nécrose sur les tissus et une grande chute des feuilles. Les valeurs limites d'affection sont très variables selon les espèces : la Posidonia océanique résiste à une augmentation de 1 psu, alors que d'autres espèces résistent jusqu'à une augmentation de plus de 20 psu.

III.9 L'influence de l'énergie dégagée par la station de dessalement sur la qualité de l'air :

Les techniques utilisées pour le dessalement de l'eau sont très consommatrices d'énergie, même si la tendance est à la baisse, notamment grâce au développement de l'osmose inverse et d'autre technologie innovante.

Cette énergie est le plus souvent fournie par des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon) qui présentent pour l'environnement l'inconvénient d'émettre des polluants atmosphériques tels que l'émission de gaz à l'effet serre (CO₂) qui provoque les pluies acides.

Cependant, les usines de dessalement émettent aussi des gaz qui ne proviennent pas de la combustion de combustibles fossiles, mais qui étaient déjà dissous dans l'eau de mer.

Dans les usines thermiques, l'eau d'alimentation est habituellement désaérée et des gaz émanent de la saumure qui s'évapore dans les chaudières de détente.

Les deux procédés (OI, MSF) augmentent les émissions de gaz carbonique (CO₂), qui est stocké dans les océans sous forme de bicarbonate.

Il a ainsi été estimé que le système de production espagnol rejetait 680g de CO₂ par mètre cube (680 g/m³) d'eau dessalée, ce qui, pour une production de plusieurs millions de mètres cubes par jour) se traduirait par l'émission dans l'atmosphère de plusieurs milliers de tonnes de CO₂ par jour.

D'autre part l'énergie thermique ou mécanique nécessaire au processus de dessalement de l'eau de mer, sont à l'origine d'une augmentation de la température de l'eau et donc d'une température élevée de la saumure (température de saumure est environ supérieur de 10°C à 15°C).

Les chercheurs ont utilisé un modèle d'analyse d'entrée-sortie multi-régional sur mesure pour étudier les émissions de gaz à effet de serre liées à la désalinisation de l'eau de mer en Australie. Ce modèle a combiné des données macroéconomiques de haut niveau avec des données spécifiques aux installations de désalinisation. Les chercheurs ont pris en

compte à la fois la construction et l'exploitation des installations de désalinisation, ainsi que les effets directs et indirects sur l'ensemble de la chaîne de valeur. Ce modèle a permis d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre de manière détaillée et précise pour les 20 plus grandes installations de désalinisation en Australie, représentant 95% de la capacité totale du pays. (Heihsel et al., 2019)

III.10 Moyens pour réduire les impacts des rejets en mer

Les moyens à adopter pour mitiger l'impact des rejets saumures peuvent être classés en deux groupes : moyens à mettre en œuvre durant la phase de projet et programmes de vigilance environnementale.

Les moyens à mettre en place en phase de projet peuvent être résumés dans les points suivants :

- La réalisation d'une cartographie sous-marine des habitats écologiques à protéger dans toute la région, avant d'avoir choisie la parcelle où on situera l'usine de dessalement.
- La réalisation d'un modèle numérique de propagation de la salinité aidant au dessin du rejet : le modèle en question doit être tridimensionnel, son but étant de pouvoir assurer en phase de projet que le déversement n'affectera pas des zones à intérêt écologique et que la prise d'eau ne captera pas l'eau provenant du rejet. Le résultat du modèle sera le dessin tridimensionnel de l'ouvrage de rejet et de la plume hypersaline. Le modèle en question sera calibré postérieurement, durant la phase d'exploitation de l'usine, à l'aide de mesures in situ de la salinité.
- La dilution des saumures avec l'eau de mer ou de refroidissement est une solution intéressante dans le cas où il y a des zones à protéger et où la production de l'usine n'est pas très grande. Le problème principal de cette solution est le surcoût d'investissement que cela implique. De plus, dans les zones à forts courants et houle, l'ouvrage nécessaire pour abriter les pompes de captage d'eau de mer peut avoir un coût prohibitif.
- Le programme de vigilance environnementale :
- Contrôle de variation du débit et de la salinité à l'intérieur de l'usine, avec le but de détecter les possibles anomalies du fonctionnement de l'usine, qui pourraient provoquer une plus grande contamination du rejet des saumures. Il convient également d'inclure la mesure de certaines substances chimiques employées dans le procédé.
- Le contrôle des concentrât dans la zone de rejet au cours des premières semaines de fonctionnement, il faut déterminer le champ de salinités autour de la zone de rejet, incluant un profil de salinités à 100, 300 et 1000 m par exemple. Le but du nuage de points de mesure de la salinité est de caractériser la géométrie tridimensionnelle de

la salinité de l'effluent dans le domaine proche et éloigné, et en même temps, de pouvoir calibrer le modèle numérique.

III.11 Indicateurs de suivi de l'impact environnemental des rejets de stations de dessalement

Le rejet à la mer de la saumure, du fait de sa salinité et de sa concentration en substances chimiques, peut avoir des impacts négatifs sur le milieu marin, spécialement sur les organismes benthoniques (liés au substrat) à caractère sténohalin (ne tolérant pas de brusques variations de la salinité).

Certains critères nécessaires doivent être pris en considération pour apprécier les impacts :

a) Température

Le procédé de dessalement peut augmenter la température des rejets saumure au-dessus de celle de l'eau de mer ambiante c'est notamment dans le cas de procédés de distillation.

L'usine de distillation chauffe l'eau d'alimentation, une grande partie de cette chaleur est conservée dans la saumure au-dessus d'ambient, tandis que dans le cas d'OI la température des rejets saumure est généralement environnante à celle de l'eau de mer.

b) Salinité

L'osmose inverse produit des rejets saumure avec une salinité jusqu'à deux fois celle de l'eau de mer. Cette augmentation de la salinité augmente par conséquent la densité de la saumure et, si non dilué, la saumure stratifie au-dessous l'eau de mer moins dense.

c) pH

Le processus de chloration de l'usine de dessalement peut légèrement réduire le pH du rejet saumure par rapport à l'eau de mer d'admission. La littérature soutient ce point de vue en affirmant que le pH de la saumure issue d'usine d'OI n'est généralement pas changé ou légèrement inférieure à l'eau d'alimentation.

d) L'oxygène dissous

La réduction de l'oxygène dissous peut avoir un impact potentiel sur la vie marine (Les rejets saumures issues des usines de distillation ont souvent un niveau réduit en oxygène dissous. Une réduction significative de l'oxygène dissous en raison de chauffage est peu probable dans le cas d'usines d'OI, car les températures ne sont que marginalement augmenté.

L'utilisation de produits chimiques telle que le bisulfite de sodium pour empêcher la corrosion et éliminer le chlore résiduel dans l'OI, pourrait réduire l'oxygène dissous dans

les rejets saumure. La dilution rapide est susceptible de maintenir des niveaux de concentrations d'oxygène dissous dans les rejets.

e) Effets dus aux produits chimiques

Comme on l'a déjà relevé, les usines de dessalement par distillation rejettent des métaux résultant de phénomènes de corrosion, tels que le cuivre, le nickel, le fer, le chrome et le zinc dans le milieu marin.

Ces métaux ne se trouvent pas à l'état d'ions libres mais forment liés à des complexes inorganiques et organiques qui sont adsorbés sur les matières. Dans ce cas, le problème ne réside pas dans la concentration effective du métal mais dans sa charge totale atteignant l'environnement, on ne peut atténuer les effets en diluant le rejet.

f) Effets dus aux additifs antitartres/séquestrant

Aucun impact direct lié à l'utilisation des produits antitartre et séquestrant n'a pu être mis en évidence à travers l'étude bibliographique que nous avons mené.

g) Effets de la saumure concentrée

Il est vrai que c'est la saumure qui exerce le plus fort impact sur le milieu marin. Le volume total de saumure libéré dans ce milieu est déterminant pour les dommages qu'il peut induire.

Un rejet de saumure concentrée en grandes quantités appelle un examen plus soigneux des impacts potentiels sur l'environnement que s'il s'agit d'un rejet en petites quantités.

À part le volume proprement dit, les modalités et l'emplacement du rejet sont essentiels pour les impacts qui peuvent en résulter. La longueur de l'émissaire, sa distance au rivage, son niveau au-dessus du fond de la mer, l'existence ou non d'un diffuseur, ainsi que la profondeur de l'eau et les caractéristiques hydrologiques (courants, vagues) peuvent conditionner la dispersion de la saumure et l'efficacité de la dilution au point de rejet et, par voie de conséquence, l'impact potentiel sur l'environnement.

h) Effets d'additifs anti-salissures

Le chlore est un oxydant et un biocide efficace, très économique mais qui peut être toxique pour la vie marine, même en concentrations diluées. Le chlore réagit également avec les composés organiques dans l'eau de mer pour former d'autres composés, halogénés tels que sous-produits organiques, qui sont nocifs pour la vie marine. Il occasionne des effets biologiques par son action stérilisante intrinsèque et des effets chimiques en halogénant avec les constituants organiques de l'eau de mer. D'autres agents anti-salissures comme les sels de cuivre entraînent des rejets de cuivre dans la saumure, et ce

métal, même à de très faibles concentrations (moins de 1ppm), peut avoir des incidences sur l'environnement par suite de son accumulation.

i) Effets des additifs anti-mousses

Les agents anti-mousses sont des détergents. Les détergents ont des effets nocifs sur les organismes en altérant le système membranaire intracellulaire. Les effets sur l'écosystème marin n'ont pas été étudiés, mais d'après la littérature elles pourraient être négligeables.

III.12 Impacts énergétiques

III.12.1 Origine de la consommation d'énergie

Les procédés de dessalement évoluent, évolutions poussées par des contraintes de coûts et de disponibilité des ressources énergétiques. Leur développement s'est accompagné ces dernières années d'une évolution des procédés et des équipements afin de réduire de façon drastique la consommation électrique.

Les procédés de distillation consomment une énergie importante (de 8 à 25 kWh/m³ équivalent électrique), qui se décompose en énergie thermique nécessaire à la distillation proprement dite, et en énergie électrique afin d'assurer la fonction de transport (pompage d'eau brute, de concentrat, d'eau de refroidissement, de distillat).

L'énergie nécessaire au procédé d'osmose inverse peut quant à elle se décomposer suivant 4 fonctions :

- Vaincre la pression osmotique au niveau de la membrane, cette pression osmotique étant liée à la concentration et à la nature des sels présents dans l'eau à traiter, mais aussi au taux de conversion appliqué au système, et à l'hydraulique (limitation de la couche de polarisation au voisinage de la membrane),
- Vaincre la résistance de la membrane à l'écoulement de l'eau, définie par la perméabilité de la membrane d'osmose inverse, et dépendante de la température de l'eau,
- Prétraitement, opérations unitaires de clarification et/ou de précipitation,
- Transport, pompes d'eau brute, d'eau traitée.

En dehors du refoulement de l'eau traitée sur le réseau de distribution, qui peut représenter une part non négligeable de l'énergie, les principaux postes de consommation d'énergie d'une installation se concentrent essentiellement dans la partie haute pression de l'usine (figure III-4).

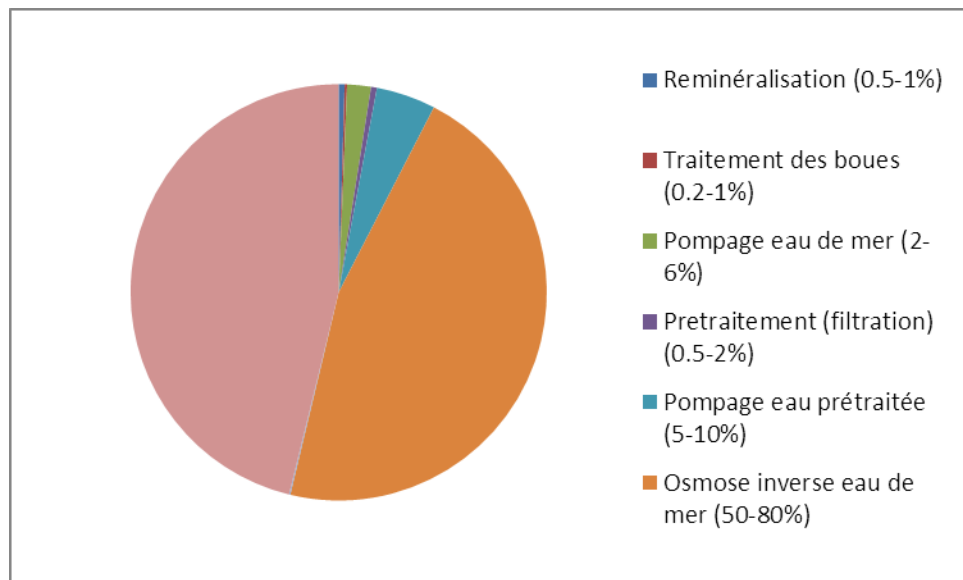


Figure III-4: Principaux postes de consommation d'énergie (ZIZI, 2013)

III.12.2 Coût d'énergie

Les deux grands types de procédés de dessalement de l'eau de mer n'ont pas le même coût énergétique. En effet :

- Le premier, procédé (distillation) est très gourmand en énergie : pour produire 1 mètre cube d'eau, une usine MSF consomme 15,5 kWh et une unité MED 7,5 kWh. Plus des trois quarts de cette énergie servant à préchauffer l'eau de mer. Afin de réduire cette consommation, on installe les unités à distillation à côté de centrales thermiques pour récupérer la chaleur.
- Le second procédé (l'osmose inverse), est moins gourmand en énergie par rapport au premier procédé. Les installations modernes récupèrent l'énergie hydraulique issue du déversement du concentré à haute pression à travers des turbines ou des échangeurs de chaleur, ce qui réduit aujourd'hui la consommation totale d'une usine à 4 à 5,5 kWh par mètre cube d'eau produite. Cette amélioration est due à la mise sur le marché de pompes et de turbines de grandes capacités et à l'amélioration de la conception hydraulique de ces machines, et des techniques d'usage.

Pour le cas des stations de dessalement en Algérie, on donne ci-après à titre indicatif la consommation énergétique de cinq stations monoblocs de 2 500 m³/j chacune, installées sur la côte Algéroise durant le premier semestre 2011.

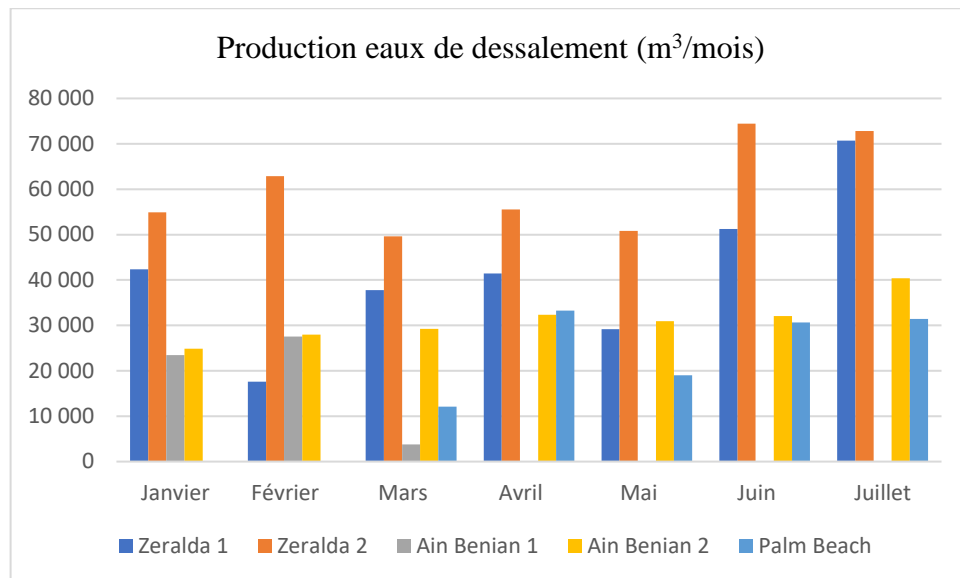


Figure III-5: Production eaux de dessalement (m³/mois) Source : SEAAL

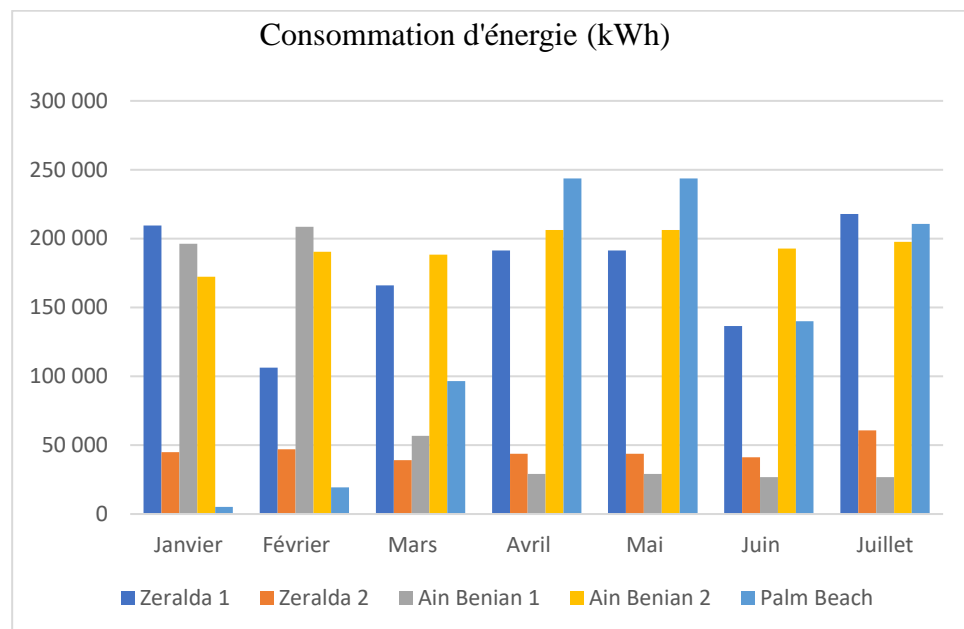


Figure III-6: Consommation d'énergie (kWh) Source : SEAAL

Il apparaît d'après la figure III-6 la gestion de ces stations n'est pas stable tant sur le plan de la production d'eau douce que sur la consommation de l'énergie électrique. En effet, le rendement de ces stations ne dépasse guère les 30%.

Mise à part les stations Zeralda 1 et 2 qui présentent des consommations spécifiques dans les normes (autours de 4 kWh/m³) par rapport au procédé utilisé (OI), les autres stations présentent des consommations spécifiques élevés (Ain Benian 2) à très élevés (Ain Benian 1 et Palm Beach).

III.13 Impacts atmosphériques

L'impact atmosphérique des usines de dessalement concerne la phase de construction et la phase d'exploitation.

La qualité de l'air, dû à la phase de construction, est généralement de courte durée et se limite à l'environnement proche du projet. Les émissions dans l'atmosphère, que ce soit des émissions de poussières volatiles, résultant de la circulation sur le site ou des gaz d'échappement, ne causent pas un impact significatif sur la qualité de l'air.

Lors de la phase d'exploitation, les usines de dessalement consomment beaucoup d'énergie et par conséquent émettent des gaz à effet de serre. Ces émissions de gaz à effet de serre sont plus fortes si l'énergie électrique du dessalement est produite par combustibles fossiles.

Une solution convenable serait le recours à l'énergie solaire, non polluante, voire la géothermie, ou encore l'énergie nucléaire.

III.14 Conclusion

Chacun s'accorde à dire que le dessalement de l'eau de mer est une des solutions pour remédier au manque d'eau potable. Cependant, ce procédé très gourmand en énergie et polluant, notamment par les rejets de saumure.

Face à toutes ces contraintes, la meilleure solution reste une bonne gestion des ressources continentales de surface et souterraine ainsi que le recyclage des eaux usées. Bien que nécessitant plus de volonté politique, ces procédés durables demandent beaucoup moins d'énergie, et sont moins impactant pour l'environnement.

Finalement, dans tous les cas, le dessalement d'eau de mer doit être envisagé au cas par cas, en cohérence avec la gestion de l'offre et de la demande en eau, en fonction de la situation économique sociale et environnementale locale. Et non comme une solution de facilité.

CHAPITRE IV :

Gestion et valorisation des rejets de saumure

Chapitre IV: Gestion et valorisation des rejets de saumure

IV.1 Introduction :

Le dessalement de l'eau de mer est devenu une solution vitale pour répondre aux besoins croissants en eau douce dans de nombreuses régions du monde. Cependant, cette technologie n'est pas exempte de défis majeurs, parmi lesquels les rejets de saumures occupent une place prépondérante. Les saumures, des solutions salines hautement concentrées générées lors du processus de dessalement, posent des problèmes environnementaux significatifs en raison de leur impact potentiel sur les écosystèmes marins, la qualité de l'eau et la biodiversité des zones côtières. Dans ce chapitre, nous explorerons en détail la gestion des rejets de saumures, en mettant l'accent sur les aspects environnementaux, réglementaires et les stratégies pour minimiser leur impact.

L'objectif principal de ce chapitre est de fournir une compréhension approfondie des enjeux liés aux rejets de saumures et d'explorer les différentes approches de gestion, notamment les méthodes de dilution, les options de réutilisation et les réglementations en vigueur. Nous examinerons également des études de cas réelles, illustrant des exemples de bonnes pratiques et de leçons apprises dans le domaine de la gestion des rejets de saumures.

Enfin, ce chapitre formulera des recommandations pour une gestion plus efficace des rejets de saumures et explorera les perspectives d'avenir pour la gestion durable de cette question cruciale. Il est impératif de trouver des solutions pour minimiser l'impact environnemental des rejets de saumures tout en maintenant un approvisionnement en eau douce adéquat pour les populations et les industries.

Ce chapitre s'inscrit dans le cadre de notre engagement envers une gestion responsable des ressources en eau et une protection de l'environnement côtier, et il contribue à la recherche continue sur le dessalement de l'eau de mer et ses implications.

IV.2 Réglementation et Normes :

La gestion des rejets de saumures est soumise à un ensemble de réglementations et de normes, à la fois au niveau national et international, visant à minimiser leur impact environnemental. Cette section explore les principales réglementations et normes applicables.

IV.2.1 Réglementations Nationales :

De nombreux pays, y compris l'Algérie, ont établi des réglementations nationales spécifiques pour encadrer les rejets de saumures provenant des installations de dessalement. « **Décret**

exécutif n° 06-141 du 20 Rabie El Aouel 1427 correspondant au 19 avril 2006 » Ces réglementations définissent des normes de qualité de l'eau, des limites de concentration de sel et d'autres paramètres, ainsi que des procédures d'autorisation et de surveillance pour les opérateurs de stations de dessalement. Les autorités nationales sont responsables de l'application de ces réglementations.

IV.2.2 Réglementations Internationales :

Au niveau international, des accords et des directives ont été élaborés pour guider la gestion des rejets de saumures. Par exemple, la Convention de Barcelone pour la protection de la mer Méditerranée contre la pollution prévoit des mesures spécifiques pour le contrôle des rejets de saumures dans la région méditerranéenne. De même, des conventions et des accords internationaux, tels que ceux relevant de l'Organisation maritime internationale (OMI), abordent les questions liées aux rejets de saumures en haute mer.

IV.3 Méthodes actuelles d'élimination de la Saumure :

Étant donné que les processus de dessalement produisent des quantités importantes de saumure, différentes méthodes d'élimination de la saumure ont été développées par l'industrie du dessalement. Ces méthodes comprennent le rejet dans les eaux de surface, le rejet dans les égouts, l'injection en puits profonds, les bassins d'évaporation et l'épandage sur le terrain. Cependant, aucune des méthodes d'élimination énumérées précédemment ne peut être largement appliquée à quelque type et quelle que soit la taille du projet de dessalement. Le choix de la méthode d'élimination de la saumure la plus appropriée dépend de nombreux facteurs.

Ces facteurs sont la quantité, la qualité et la composition de la saumure ; la situation géographique du site d'élimination ; la disponibilité du site de réception ; l'admissibilité de l'option d'élimination ; l'acceptation par le public ; les coûts d'investissement et d'exploitation et la capacité d'expansion future de l'installation. En ce qui concerne le coût, le coût de l'élimination de la saumure varie de 5 % à 33 % du coût total des processus et dépend des caractéristiques et du volume de la saumure, du niveau de prétraitement, des moyens d'élimination et de la nature de l'environnement d'élimination (Panagopoulos et al., 2019) .

IV.3.1 Rejet direct

Le rejet d'eau de surface est une méthode d'élimination de la saumure qui comprend le rejet direct de la saumure dans les océans, La saumure est transférée au site d'immersion

où elle est rejetée par un émissaire dans le plan d'eau récepteur. Cette méthode est adoptée par la majorité des usines de dessalement, Comme mentionné précédemment (chapitre III), la saumure peut être nocive pour le milieu marin, soit en raison de sa salinité habituelle élevée, soit en raison de la présence de polluants qui n'existeraient pas différemment dans le plan d'eau récepteur. Toutefois, avec des mesures appropriées, l'élimination de la saumure dans les eaux de surface pourrait demeurer une méthode viable pour les usines de dessalement du sud-ouest (Shrivastava et Adams, 2018). Par exemple, avant le rejet, la saumure peut être diluée avec des eaux usées ordinaires ou municipales pour diminuer le niveau de salinité(Arafat, 2017). La recherche a révélé qu'il y a un impact négatif important en diminuant les concentrations si la dilution et le mélange rapide sont utilisés avec prudence, Le coût de cette méthode d'élimination varie de 0,05\$ /m³ à 0,3 \$ /m³ de saumure rejetée (Arafat, 2017 ; Ziolkowska & Reyes, 2017)

IV.3.2 Rejet dans les égouts des eaux usées

L'évacuation dans les eaux usées est une méthode d'élimination de la saumure qui comprend la décharge de la saumure dans le système de collecte des eaux usées à proximité. Cette méthode est largement adoptée par les usines de dessalement à petite échelle de BW en raison de l'impact négatif potentiel de la teneur élevée en TDS de la saumure sur la station d'épuration des eaux usées réceptrices (STEP). De façon générale, une salinité élevée entrave le processus de traitement biologique dans une usine de traitement des eaux usées, car la concentration en MDT de l'influent dépasse 3000 mg/L. Étant donné que le niveau de TDS de saumure SW peut être supérieur à 55000 mg/L, la capacité de l'usine de traitement des eaux usées doit être au moins 20 fois supérieure au volume quotidien de rejet de saumure pour maintenir la concentration de TDS inférieur à 3000 mg/L. De plus, si la salinité des eaux usées devient trop élevée, des problèmes environnementaux et réglementaires peuvent survenir lors de l'élimination. En outre, un prétraitement de base, comme la neutralisation du pH ou toute autre exigence, peut être imposé parce que la saumure peut contenir des traces de métaux lourds. Cela garantit l'infrastructure et le processus de traitement ainsi que la qualité des eaux usées résiduelles effluent. Par conséquent, l'élimination dans un égout sanitaire est principalement utilisée par les usines de dessalement BW et est rarement appliquée à des fins de dessalement SW. Le coût de cette élimination varie de 0,32 \$US/m³ à 0,66 \$US/m³ de saumure rejetée (Arafat, 2017; Ziolkowska & Reyes, 2017).

IV.3.3 Injection dans un puits profond

L'injection de puits profonds est une méthode d'élimination de la saumure qui comprend l'injection de saumure dans un aquifère souterrain profond désaffecté, suffisamment isolé des aquifères d'eau au-dessus de celui-ci. Cette méthode est couramment utilisée par les usines de dessalement de toutes tailles. La saumure est injectée dans un puits qui se compose de nombreuses couches de tubage et de coulis. Ensuite, les roches poreuses sont utilisées pour contenir la saumure, tandis que l'argile et d'autres formations rocheuses imperméables sont utilisées pour empêcher la pollution des aquifères. La profondeur de ces puits varie normalement entre 500 m et 1500 m, selon les conditions géologiques du site. Pendant ce temps, l'aquifère récepteur doit être en mesure de recevoir la saumure produite pendant la durée de vie de la centrale (25 à 30 ans).

La principale préoccupation environnementale pour l'injection en profondeur est la pollution potentielle des aquifères d'eau à proximité qui pourraient être utilisés comme source d'eau potable. Avant de construire un puits d'injection, des études hydrogéologiques détaillées, des sondages d'essai, des aperçus environnementaux et des essais pilotes doivent être effectués. Le coût en capital de l'instruction de puits profonds est plus élevé que les deux méthodes d'élimination précédentes. Par conséquent, cette méthode d'élimination de la saumure est généralement envisagée en l'absence d'une autre solution viable. Le coût de cette méthode d'élimination varie de 0,54 \$US/m³ à 2,65 \$US/m³ de saumure rejetée (Arafat, 2017 ; Ziolkowska & Reyes, 2017).

IV.3.4 Bassins d'évaporation

Les bassins d'évaporation sont une méthode d'élimination de la saumure qui comprend des bassins de terre tapissés de schiste peu profonds dans lesquels la saumure s'évapore lentement par l'énergie solaire directe. Une fois l'eau douce évaporée, les minéraux de la saumure sont précipités dans des cristaux de sel, qui sont périodiquement récoltés et éliminés hors site. Les bassins d'évaporation ont été largement adoptés pour l'élimination de la saumure dans de nombreuses zones sèches et semi-sèches en raison de la source d'énergie solaire. Cette méthode doit être conçue et utilisée avec précision pour réduire les préoccupations environnementales concernant la pollution des eaux souterraines. En général, les réglementations environnementales obligent les bassins d'évaporation à être construits avec un revêtement imperméable pour protéger les aquifères sous-jacents. Si la saumure présente des teneurs élevées en métaux traces, un bassin à double paroi doit être construit. De plus, si les étangs ne sont pas bordés ou si le revêtement de pointe est corrompu, une partie de la saumure peut pénétrer dans l'aquifère sous le bassin et dégrader

la qualité de l'eau. Le choix de cette méthode dépend de divers facteurs, notamment les conditions climatiques, la disponibilité et le coût des terres, la qualité de l'eau des aquifères souterrains. Le coût de cette méthode d'élimination varie de 3,28 \$US/m³ à 10,04 \$US/m³ de saumure rejetée, ce qui en fait la méthode la plus coûteuse (Arafat, 2017 ; Ziolkowska & Reyes, 2017).

IV.3.5 Évaluation et comparaison des méthodes d'élimination de la saumure

Chaque méthode diffère en complexité et en coûts. La décharge d'eau de surface est pratique pour traiter de grands volumes de saumure avec de faibles coûts d'investissement / d'exploitation et des demandes énergétiques. C'est la méthode d'élimination la moins chère et la plus largement adoptée. Toutefois, cette méthode peut perturber le milieu marin et entraîner une augmentation de la salinité des mers semi-fermées comme la Méditerranée et la mer Rouge ; Afin de respecter les réglementations environnementales régionales et de réduire au minimum les risques pour l'environnement, les émissaires de mer doivent être conçus de manière à diluer la saumure autant que possible. On a signalé qu'un facteur de dilution de 40 fois pourrait suffire à protéger 99 % des espèces marines (Falkenberg & Styan, 2015). Contrairement aux mers semi-fermées, dans les régions où les recettes sont abondantes, comme en Australie, les émissaires océaniques de dimensions appropriées peuvent avoir un impact environnemental négligeable (Chevron, 2015). Si la station d'épuration des eaux usées existe près de l'usine de dessalement, le rejet des eaux usées pourrait être une option intéressante, car elle a également de faibles coûts d'investissement et d'exploitation. Néanmoins, les substances de saumure peuvent entraver les processus biologiques de la station d'épuration lorsque de grands volumes de saumure sont éliminés. Il convient de noter que les coûts pour les eaux de surface et les rejets d'égouts dépendent fortement de l'emplacement de l'usine. Par exemple, le coût d'élimination d'une usine située à proximité de la rive est beaucoup plus bas que celui d'une usine située à une centaine de mètres de distance, comme dans le deuxième cas, il faut des conduites de pompage plus longs.

Bien que la plupart des usines de dessalement soient situées près des rives de la mer, un nombre important d'entre elles sont situées à l'intérieur des terres pour dessaler les eaux saumâtres. Pour ces plantes d'intérieur, l'injection en profondeur et les bassins d'évaporation pourraient être des options appropriées. L'injection en profondeur est une méthode relativement rentable pour l'élimination de la saumure et des déchets dangereux. Cependant, cette méthode n'est pas très favorable dans les zones fortement sismiques comme la Grèce en raison du risque de pollution des eaux souterraines. Par conséquent, des études détaillées

spécifiques au site doivent être effectuées pour minimiser le risque de défaillance de l'intégrité du puits, ce qui entraîne une complexité élevée de mise en œuvre. Le bassin d'évaporation est la méthode d'élimination la plus coûteuse, car sa capacité de traitement est proportionnelle à sa superficie au sol. De plus, il n'est efficace que dans les régions où le climat est sec et où les taux d'évaporation sont élevés, comme les Émirats arabes unis, Oman, etc. (Rodríguez et al., 2012).

IV.4 Approche de traitement de la saumure et zéro rejet de liquide (ZLD)

La sensibilisation accrue du public aux effets néfastes de la saumure de dessalement sur l'environnement a contribué à l'adaptation de réglementations plus strictes pour l'élimination de la saumure qui peuvent restreindre plusieurs méthodes d'élimination classiques (rejet direct, rejet d'égout, injection en puits profonds, bassins d'évaporation) dans les années à venir. Ces exigences urgentes incitent les ingénieurs à mettre au point un système de dessalement qui peut potentiellement améliorer la récupération de l'eau au niveau le plus élevé en réduisant la saumure (au niveau le plus bas) avec le moins de dommages environnementaux. Par conséquent, ces demandes peuvent être satisfaites en utilisant un système de traitement appelé Zero Liquid Discharge (ZLD). Comme son nom l'indique, ZLD peut être décrit comme une combinaison de technologies de dessalement visant à produire de l'eau douce de haute qualité avec l'élimination complète des déchets liquides de l'usine (Bazargan, 2018).

L'eau douce produite à partir du ZLD est très pure (récupération de 95 à 99 % de l'eau) et peut être utilisée à diverses fins, comme l'eau potable, l'irrigation, l'eau de refroidissement, etc. En même temps, les déchets solides comprimés peuvent soit être éliminés de manière écologique dans l'environnement local, soit transportés pour un traitement ultérieur afin d'être utilisés comme matériau utile. Il existe généralement des variations différentes dans la conception, la disposition et le fonctionnement des systèmes ZLD et, par conséquent, chaque système est unique. Par conséquent, il n'est pas possible d'avoir un système ZLD uniforme pour toutes les usines de dessalement.

Cependant, un système typique de ZLD se compose de trois étapes. Ces étapes sont (I) la préconcentration, (II) l'évaporation et (III) la cristallisation. Dans la première étape, la récupération de l'eau et la minimisation du volume de la saumure sont réalisées grâce à des technologies à base de membrane.

Cette étape est cruciale pour le système car elle réduit considérablement la taille des deux étapes suivantes qui sont très coûteuses. Dans les deux étapes suivantes, la récupération

de l'eau, la minimisation du volume de la saumure et la production d'un produit solide sont réalisées principalement grâce à des technologies thermiques.

Ainsi, les technologies utilisées dans les systèmes de traitement de saumure/ZLD peuvent être classées en deux catégories : les technologies membranaires et thermiques. Les technologies membranaires et thermiques sont décrites chapitre II 3, La conception d'un système ZLD dépend de nombreux facteurs tels que la composition de la l'eau et la concentration finale de la saumure concentrée nécessaire à une élimination sûre ou à d'autres applications bénéfiques. Par conséquent, certaines ou même la plupart des technologies de traitement peuvent être incluses dans un système ZLD.

IV.5 Méthodes de Gestion de Saumures :

La gestion des rejets de saumures est un défi complexe, mais plusieurs méthodes sont disponibles pour atténuer leur impact environnemental. Cette section se penche sur les différentes stratégies de gestion.

IV.5.1 Techniques de Dilution et Dispersion :

Une approche courante pour gérer les rejets de saumures consiste à utiliser des techniques de dilution et de dispersion. Cela implique de mélanger soigneusement les saumures rejetées avec de grandes quantités d'eau de mer pour réduire la concentration des sels dissous. Des études hydrodynamiques et des modèles de dispersion sont souvent utilisés pour déterminer les meilleurs emplacements de rejet et les taux de dilution nécessaires pour minimiser l'impact environnemental.

IV.5.2 Options de Réutilisation et Récupération d'Énergie :

Une approche innovante consiste à réutiliser les saumures pour des usages secondaires, tels que l'irrigation de cultures tolérantes au sel ou la production d'énergie par osmose inverse. Cette stratégie permet de réduire le volume de saumures rejetées tout en maximisant leur utilité. De plus, la récupération d'énergie à partir des saumures peut améliorer l'efficacité énergétique des installations de dessalement.

IV.5.3 La méthode SOL-BRINE :

La méthode SOL-BRINE est un système innovant de traitement des saumures provenant des usines de dessalement de l'eau de mer. Elle a été développée dans le cadre du projet européen SOL-BRINE (LIFE09 ENV/GR/000299) et vise à résoudre les problèmes liés à la gestion des saumures et à l'utilisation d'énergies renouvelables.

Ce système utilise des sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie solaire, pour alimenter le processus de traitement des saumures. Il comprend trois étapes de traitement : une unité d'évaporation, une unité de cristallisation et une unité de séchage. L'énergie solaire est utilisée pour fournir de l'eau chaude et de l'électricité, ce qui permet de rendre le système autonome en énergie.

L'objectif principal de la méthode SOL-BRINE est d'éliminer complètement les saumures, tout en récupérant les ressources précieuses telles que l'eau et le sel sec. Le système permet une récupération de l'eau supérieure à 90% et une récupération complète du sel sec. De plus, il produit de l'eau distillée de haute qualité et du sel sec, qui ont un fort potentiel commercial.

En résumé, la méthode SOL-BRINE est un système de traitement des saumures qui utilise des énergies renouvelables pour rendre le processus autonome en énergie et pour produire des ressources précieuses à partir des saumures.(Xevgenos et al., 2016)

IV.6 Exemple de Cas en Gestion des Rejets de Saumures :

IV.6.1 La Station de Dessalement de Perth, Australie

Contexte : L'installation de dessalement de Perth est située en Australie occidentale, une région sujette à des sécheresses prolongées et à des pénuries d'eau. Cette installation est un exemple de la manière dont une région confrontée à des défis importants d'approvisionnement en eau a mis en œuvre une approche novatrice pour gérer les rejets de saumures.



Figure IV-1 : Station de dessalement de Perth, Australie

Au lieu de simplement rejeter les saumures dans l'océan, la station de dessalement de Perth a adopté une approche de réutilisation et de mélange. Les saumures, au lieu d'être rejetées directement, sont mélangées avec les eaux usées municipales traitées. Ce mélange réduit la salinité des saumures et crée une ressource d'eau mixte appropriée pour l'irrigation agricole(Radcliffe & Page, 2020).

Avantages : Cette approche de gestion a plusieurs avantages. Elle permet de réduire la salinité des saumures, ce qui peut rendre le rejet dans l'océan moins problématique. De plus, elle crée une nouvelle source d'eau pour l'irrigation agricole, contribuant ainsi à la sécurité alimentaire de la région. En outre, la réutilisation des saumures favorise l'utilisation durable des ressources en eau.

Considérations Environnementales : Cette approche innovante vise à minimiser l'impact environnemental en réduisant la salinité de l'eau rejetée dans l'océan et en maximisant la réutilisation des ressources hydriques.

IV.6.2 L'Usine de Dessalement d'Al Jubail, Arabie Saoudite :

Contexte : L'usine de dessalement d'Al Jubail est située sur la côte du golfe Persique en Arabie Saoudite, une région caractérisée par un climat aride et un besoin croissant en eau douce pour l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation et l'industrie.



Figure IV-2: Station de d'Al Jubail, Arabie Saoudite

Approche de Gestion des Rejets : Cette installation a choisi d'utiliser des bassins d'évaporation pour gérer les saumures résultant du processus de dessalement. Au lieu de rejeter directement les saumures dans l'océan, elles sont dirigées vers des bassins peu profonds. Dans ces bassins, les saumures s'évaporent rapidement en raison des conditions climatiques chaudes et sèches de la région. Lorsque l'eau s'évapore, les sels dissous restent derrière et peuvent être éliminés de manière appropriée.

Avantages : Cette méthode offre plusieurs avantages. Tout d'abord, elle permet de minimiser l'impact des saumures sur les écosystèmes marins en réduisant la salinité de l'eau rejetée dans le golfe Persique. De plus, elle est adaptée aux conditions climatiques de la région, caractérisées par une forte évaporation. Enfin, elle permet de récupérer des sels solides qui peuvent avoir une valeur commerciale ou être éliminés de manière responsable (Radcliffe & Page, 2020).

Considérations Environnementales : L'approche des bassins d'évaporation vise à réduire l'impact environnemental en favorisant la dilution naturelle des saumures et la récupération des sels solides. Cela contribue à préserver la qualité de l'eau dans le golfe Persique.

IV.6.3 L'Usine de Dessalement de Carlsbad, Californie, États-Unis :

Contexte : L'usine de dessalement de Carlsbad est située en Californie, aux États-Unis, dans une région sujette à des périodes de sécheresse et de pénurie d'eau. Cette installation est un exemple de la manière dont une région côtière des États-Unis a adopté le dessalement comme source d'eau alternative.



Figure IV-3 : Station de Dessalement de Carlsbad, Californie, États-Unis

Approche de Gestion des Rejets : L'usine de dessalement de Carlsbad a adopté une approche combinée de gestion des rejets de saumures. Les saumures sont rejetées à un endroit où les courants marins facilitent la dispersion rapide dans l'océan. Cette stratégie de dilution et de dispersion permet de réduire la concentration de sel dans les saumures rejetées. (Petersen et al., 2019)

Avantages : Cette méthode offre plusieurs avantages, notamment une réduction de l'impact sur les écosystèmes marins grâce à la dispersion rapide des saumures. De plus, elle maximise l'utilisation de l'eau de mer, en utilisant le débit naturel de l'océan pour diluer les saumures.

Considérations Environnementales : L'approche de dilution et de dispersion est conçue pour minimiser l'impact environnemental en favorisant la dilution naturelle des saumures dans l'océan, tout en respectant les normes environnementales locales.

IV.7 Recommandations et Perspectives :

Dans cette section finale, nous formulons des recommandations pour la gestion des rejets de saumures basées sur les exemples présentés dans les études de cas et les considérations environnementales. Nous examinons également les perspectives futures de la gestion des rejets de saumures.

IV.7.1 Recommandations :

IV.7.1.1 Utilisation de Méthodes de Dilution et de Dispersion

Les méthodes de dilution et de dispersion restent essentielles pour minimiser l'impact des rejets de saumures sur les écosystèmes marins. Cette approche, appuyée par des simulations effectuées lors de l'étude de cas de la station de Mainis (Bouthiba et al., 2022), est d'autant plus pertinente. Les résultats de ces simulations ont démontré l'efficacité de ces méthodes pour réduire la concentration de sel des saumures rejetées.

De plus, ces simulations ont révélé la valeur d'une modification stratégique dans la gestion des rejets. Il a été suggéré de déplacer la conduite de captage d'eau de mer pour éviter le mélange entre les eaux de rejets et les eaux de captage. Les détails complets de cette proposition et ses implications sont examinés plus en détail dans le chapitre " Simulations sur CORMIX des rejets de saumure des stations de dessalement de L'Algérie."

Avantages de l'Utilisation de Méthodes de Dilution et de Dispersion :

- **Réduction de la Concentration de Sel** : L'objectif principal de cette méthode est de réduire la concentration de sel (salinité) des saumures avant leur rejet dans l'océan. En diluant les saumures avec de grandes quantités d'eau de mer, la concentration de sel est rapidement ramenée à des niveaux proches de ceux de l'eau de mer naturelle.
- **Minimisation de l'Impact Environnemental** : En réduisant la salinité des saumures rejetées, cette approche vise à minimiser les effets négatifs sur les organismes marins, notamment les coraux, les poissons et les plantes marines. Cela contribue à maintenir l'équilibre des écosystèmes côtiers.

- **Utilisation de Courants Marins :** Les courants océaniques peuvent être exploités pour faciliter la dispersion rapide des saumures dans l'océan, aidant ainsi à éloigner les saumures des zones sensibles et à les mélanger de manière plus efficace.

Considérations de Conception :

- **Emplacement de Rejet :** L'emplacement où les saumures sont rejetées est crucial. Les courants marins, la profondeur de l'eau et la proximité des écosystèmes marins doivent être pris en compte lors de la sélection de l'emplacement optimal.
- **Surveillance Environnementale :** La surveillance environnementale continue est essentielle pour évaluer l'efficacité de la dilution et de la dispersion et pour détecter tout impact potentiel sur les écosystèmes marins. Les ajustements peuvent être apportés en fonction des données de surveillance.
- **Modélisation Numérique :** La modélisation numérique de la dispersion des saumures peut être utilisée pour prédire les trajectoires et la dilution des saumures dans l'océan, ce qui aide à concevoir des systèmes de rejet plus efficaces.

L'utilisation de méthodes de dilution et de dispersion devrait être considérée comme une approche standard dans la gestion des rejets de saumures. Il est essentiel de s'assurer que ces méthodes sont conformes aux normes environnementales locales et qu'elles sont adaptées aux caractéristiques spécifiques de l'emplacement de l'usine de dessalement.

IV.7.1.2 Réutilisation et Recyclage

La réutilisation et le recyclage des saumures sont des stratégies innovantes pour maximiser l'utilisation des ressources et réduire l'impact environnemental des rejets de saumures. Voici plus de détails sur cette recommandation, accompagnée de citations d'exemples réels de stations de dessalement dans le monde :

Exemples de Stations de Dessalement qui Appliquent la Réutilisation et le Recyclage :

1. **Station de Dessalement de Tampa Bay, Floride, États-Unis :** Cette station de dessalement est un exemple de réussite de la réutilisation des saumures. Elle utilise des saumures pour alimenter des réservoirs d'eau salée, créant ainsi des écosystèmes uniques adaptés à des espèces marines particulières. Cette approche permet de valoriser les saumures au lieu de les rejeter directement dans l'océan.
2. **Station de Dessalement de Perth, Australie :** À Perth, une partie des saumures est traitée pour extraire du sel et de l'eau douce, créant ainsi deux flux de produits utiles.

L'eau douce récupérée est réutilisée pour l'irrigation, tandis que le sel est commercialisé (Radcliffe & Page, 2020).

Avantages de la Réutilisation et du Recyclage :

- **Optimisation des Ressources :** La réutilisation et le recyclage des saumures permettent d'optimiser l'utilisation des ressources, en transformant un sous-produit en une ressource utile.
- **Réduction de la Quantité de Saumures Rejetées :** En réutilisant une partie des saumures, la quantité de saumures rejetées dans l'océan est réduite, ce qui contribue à minimiser l'impact environnemental.
- **Diversification des Applications :** Les saumures réutilisées peuvent être utilisées pour des applications variées, telles que l'irrigation, la salinité contrôlée dans les écosystèmes marins artificiels ou la récupération de minéraux.

Considérations Environnementales :

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

La réutilisation et le recyclage des saumures représentent des stratégies prometteuses pour transformer un déchet potentiel en une ressource utile. Ces exemples réels de stations de dessalement montrent comment ces approches sont mises en œuvre avec succès dans le monde, offrant des avantages environnementaux et économiques significatifs.

IV.7.1.3 Surveillance Environnementale Continue

La surveillance environnementale continue est une composante essentielle de la gestion des rejets de saumures. Elle permet de suivre en permanence l'impact des rejets sur les écosystèmes marins et de prendre des mesures correctives si nécessaire. Voici plus de détails sur cette recommandation :

Avantages de la Surveillance Environnementale Continue :

- **Détection Précoce des Problèmes :** La surveillance continue permet de détecter rapidement tout changement dans les conditions environnementales ou tout impact sur les écosystèmes marins. Cela permet d'agir rapidement pour minimiser les dommages.

- **Conformité aux Normes** : La surveillance permet de s'assurer que les rejets de saumures restent conformes aux normes environnementales locales et aux réglementations gouvernementales. Cela évite les problèmes légaux et environnementaux.
- **Collecte de Données à Long Terme** : La surveillance continue génère des données à long terme, ce qui est précieux pour comprendre l'effet cumulatif des rejets de saumures sur les écosystèmes marins.
- **Adaptation en Temps Réel** : En fonction des données de surveillance, des ajustements peuvent être apportés aux procédures de gestion des saumures pour minimiser l'impact environnemental.

Composants de la Surveillance Environnementale :

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

La surveillance environnementale continue assure une transparence totale dans la gestion des rejets de saumures, garantissant que les installations de dessalement respectent les normes environnementales et réagissent de manière proactive aux changements environnementaux. Elle contribue également à la collecte de données à long terme pour une gestion plus durable de ces rejets.

IV.7.2 Perspectives Futures

IV.7.2.1 Économie Circulaire

L'approche de l'économie circulaire consiste à maximiser l'utilisation des ressources, à réduire les déchets et à recycler les sous-produits des opérations de dessalement, y compris les saumures. Voici plus de détails sur cette recommandation :

Avantages de l'Économie Circulaire :

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

Stratégies de l'Économie Circulaire dans le Dessalement :

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

Défis de l'Économie Circulaire dans le Dessalement :

- **Coûts de Traitement Supplémentaires** : La mise en œuvre de stratégies d'économie circulaire peut nécessiter des coûts de traitement supplémentaires pour adapter les saumures à de nouvelles utilisations.

- **Réglementations et Normes** : Il peut être nécessaire de répondre aux réglementations environnementales et aux normes de qualité de l'eau pour garantir la sécurité des nouvelles utilisations des saumures.
- **Recherche et Innovation** : L'innovation est souvent nécessaire pour développer de nouvelles technologies de valorisation des saumures et pour explorer de nouvelles opportunités économiques.

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

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

1. **Projet de Valorisation de l'Énergie Osmotique - Norvège** : En Norvège, le projet "Salinity Power" explore l'utilisation de l'énergie osmotique générée par la différence de salinité entre l'eau douce des rivières et l'eau salée de la mer. Cette énergie osmotique est créée en utilisant les saumures produites par une usine de dessalement qui sont mélangées avec de l'eau douce. Cette énergie est ensuite convertie en électricité.
2. **Réutilisation des Saumures pour l'Irrigation - États-Unis** : Dans certaines régions des États-Unis, les saumures provenant des usines de dessalement sont réutilisées pour l'irrigation agricole. Cette approche permet de conserver l'eau douce pour les usages domestiques et industriels tout en réduisant les rejets de saumures dans l'environnement.
3. **Extraction de Minéraux des Saumures - Australie** : En Australie, des projets pilotes ont été mis en place pour extraire des minéraux précieux, tels que le lithium, des saumures de dessalement. Ces minéraux peuvent ensuite être utilisés dans des applications industrielles ou vendus sur le marché.
4. **Culture de Micro-algues – Palestine** : En Palestine, les saumures d'usines de dessalement sont utilisées pour cultiver des micro-algues. Ces micro-algues peuvent être utilisées pour la production de biocarburants, de produits chimiques ou comme complément alimentaire.

Ces exemples montrent comment les saumures, qui étaient autrefois considérées comme un déchet, sont de plus en plus considérées comme une ressource précieuse grâce à des stratégies d'économie circulaire. Ils illustrent comment les saumures peuvent être valorisées de manière rentable et durable.

IV.7.2.2 Intégration des Énergies Renouvelables

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

Avantages de l'Intégration des Énergies Renouvelables :

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

Stratégies d'Intégration des Énergies Renouvelables dans le Dessalement :

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

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

- **Variabilité des Ressources :** Les énergies renouvelables sont souvent variables, ce qui nécessite des systèmes de stockage et une gestion de l'énergie sophistiqués pour garantir un approvisionnement continu.

- **Coûts Initiaux** : Les coûts initiaux d'installation d'équipements d'énergie renouvelable peuvent être élevés, bien que les coûts opérationnels soient généralement plus faibles.
- **Planification et Conception** : La planification minutieuse et la conception de systèmes d'énergie renouvelable sont essentielles pour garantir une intégration réussie.

L'intégration des énergies renouvelables dans les opérations de dessalement offre de nombreux avantages en termes de durabilité, de réduction des coûts et de réduction des émissions de carbone. Cependant, elle nécessite une planification minutieuse et une technologie appropriée pour surmonter les défis de variabilité et de coûts initiaux. Elle joue un rôle clé dans la transition vers des opérations de dessalement plus respectueuses de l'environnement.

Exemples réels d'intégration des énergies renouvelables dans des installations de dessalement à travers le monde :

1. **Usine de Dessalement de Masdar City, Émirats Arabes Unis** : L'usine de dessalement de Masdar City aux Émirats arabes unis est alimentée en grande partie par de l'énergie solaire photovoltaïque. Les panneaux solaires fournissent l'électricité nécessaire au processus de dessalement, contribuant ainsi à réduire les émissions de carbone.
2. **Usine de Dessalement de Kuraymat, Égypte** : L'Égypte a développé l'usine de dessalement de Kuraymat qui utilise de l'énergie solaire thermique pour alimenter le processus de dessalement. Les miroirs solaires concentrent la chaleur pour évaporer l'eau de mer, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles.
3. **Usine de Dessalement de Windhoek, Namibie** : En Namibie, l'usine de dessalement de Windhoek utilise l'énergie éolienne pour alimenter une partie de ses opérations de dessalement. L'énergie éolienne est stockée sous forme d'hydrogène pour garantir un approvisionnement continu en électricité.
4. **Projet de Dessalement à l'Énergie Solaire en Californie, États-Unis** : La Californie explore un projet de dessalement qui utilise de l'énergie solaire pour produire de l'eau douce. Cette approche combine des panneaux solaires avec des technologies de dessalement avancées.

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

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

IV.7.2.3 Collaboration Internationale

La collaboration internationale dans le domaine de la gestion des rejets de saumures et du dessalement de l'eau de mer revêt une grande importance pour la recherche de solutions durables et efficaces. Voici plus de détails sur cette recommandation :

Avantages de la Collaboration Internationale :

- **Partage des Connaissances** : La collaboration internationale permet le partage des meilleures pratiques, des recherches, des technologies et des leçons apprises entre différents pays et régions.
- **Accès à l'Expertise** : Elle offre un accès à l'expertise internationale, ce qui peut être particulièrement utile pour résoudre des problèmes complexes liés au dessalement et à la gestion des saumures.
- **Réduction des Coûts** : La collaboration peut contribuer à la réduction des coûts en partageant les infrastructures et les ressources, en évitant la duplication des efforts et en profitant de l'économie d'échelle.

Stratégies de Collaboration Internationale dans le Dessalement :

- **Partenariats de Recherche** : Les pays peuvent collaborer sur des projets de recherche communs visant à développer des technologies de dessalement plus efficaces, à étudier les impacts environnementaux et à élaborer des réglementations appropriées.
- **Échange de Technologies** : La coopération internationale peut permettre le transfert de technologies de dessalement avancées entre les pays, en favorisant l'adoption de solutions plus respectueuses de l'environnement.

- **Partage de Ressources :** Les pays peuvent envisager de partager des infrastructures de dessalement et de traitement des saumures, notamment dans les régions où les ressources en eau sont limitées.

Défis de la Collaboration Internationale dans le Dessalement :

- **Aspects Politiques et Juridiques :** Les partenariats internationaux peuvent être complexes en raison de différences politiques, juridiques et réglementaires entre les pays.
- **Protection de l'Environnement Transfrontalière :** Les activités de dessalement dans un pays peuvent avoir un impact sur l'environnement d'un autre pays, ce qui nécessite une coordination étroite.
- **Protection des Intérêts Nationaux :** Les pays doivent équilibrer la coopération internationale avec la protection de leurs intérêts nationaux en matière d'eau et d'environnement.

La collaboration internationale est essentielle pour relever les défis mondiaux liés au dessalement de l'eau de mer et à la gestion des saumures. Elle favorise le partage des connaissances, des ressources et de l'expertise, ce qui peut conduire à des solutions plus efficaces et durables. Cependant, elle nécessite une planification minutieuse et une coordination pour surmonter les obstacles politiques et juridiques.

Exemples concrets de collaborations internationales dans le domaine du dessalement de l'eau de mer et de la gestion des saumures :

1. MEDRC (Middle East Desalination Research Center) :

Partenaires : Créé par le Sultanat d'Oman et soutenu par divers pays comme les États-Unis, l'Union européenne, le Japon, la Corée du Sud, et plusieurs autres pays du Moyen-Orient. L'objectif est de promouvoir la recherche et le développement dans le dessalement et la gestion des ressources en eau. MEDRC finance des projets de recherche et offre des formations sur les technologies de dessalement.

2. Collaboration entre l'Espagne et le Maroc : Les pays voisins de l'Espagne et du Maroc coopèrent pour relever les défis liés à l'eau. Cette collaboration comprend des projets de dessalement, d'irrigation et de partage de ressources en eau.

3. Partenariat entre l'Australie et les Pays d'Asie du Sud-Est : L'Australie collabore avec les pays d'Asie du Sud-Est pour développer des technologies de dessalement et de gestion des saumures. Cette coopération vise à fournir de l'eau douce aux pays de la région, confrontés à des pénuries d'eau croissantes.

Ces exemples montrent comment les pays et les régions collaborent pour relever les défis liés à l'eau, y compris le dessalement et la gestion des saumures. Ces partenariats visent à partager des connaissances, à développer des solutions communes et à favoriser la durabilité dans l'utilisation des ressources en eau.

En Algérie, il existe plusieurs projets de dessalement de l'eau de mer et de coopération internationale. Voici quelques autres exemples :

1. **Usine de Dessalement de Skikda - Algérie et Espagne :** L'usine de dessalement de Skikda, située sur la côte est de l'Algérie, a été développée en collaboration avec des entreprises espagnoles. Cette usine fournit de l'eau potable à la région de Skikda et contribue à la sécurité de l'approvisionnement en eau dans la région.
2. **Projet de Dessalement de l'eau de mer à Cap Djinet - Algérie et Singapour :** L'Algérie a collaboré avec des entreprises singapouriennes pour le développement d'une usine de dessalement de l'eau de mer à Cap Djinet. Cette usine fournit de l'eau potable à la région de Cap Djinet et est un exemple de coopération internationale dans le domaine du dessalement.
3. **Projet de Dessalement de l'eau de mer à El Tarf - Algérie et Chine :** L'Algérie a travaillé en partenariat avec des entreprises chinoises pour la construction d'une usine de dessalement à El Tarf. Cette usine fournit de l'eau potable à la région d'El Tarf, contribuant ainsi à la satisfaction des besoins en eau de la population locale.

Ces exemples illustrent la diversité des partenariats internationaux dans le domaine du dessalement en Algérie. La collaboration avec des pays tels que l'Espagne, Singapour et la Chine a permis de développer des projets essentiels pour répondre aux besoins croissants en eau douce dans différentes régions du pays. Ces partenariats renforcent également l'expertise et la technologie disponibles pour la gestion des ressources en eau en Algérie.

IV.8 Conclusion :

Le chapitre sur la gestion des rejets de saumures dans le contexte de la désalinisation de l'eau de mer a examiné en profondeur l'importance cruciale de cette question environnementale et technologique. Voici un résumé des principaux points abordés :

1. **Nécessité de la Gestion des Rejets de Saumures :** La désalinisation de l'eau de mer est devenue une source essentielle d'eau douce dans de nombreuses régions du monde. Cependant, ce processus génère des saumures, des rejets salins concentrés

qui nécessitent une gestion appropriée pour minimiser leur impact sur l'environnement marin.

2. **Impact Environnemental des Saumures :** Les saumures rejetées peuvent avoir des effets significatifs sur la qualité de l'eau et la biodiversité des écosystèmes marins et côtiers. Il est essentiel de comprendre ces impacts pour concevoir des stratégies de gestion adéquates.
3. **Solutions pour la Gestion des Saumures :** Le chapitre a exploré différentes stratégies de gestion des saumures, notamment la dilution, la dispersion, la réutilisation, le recyclage, la surveillance environnementale continue et l'intégration des énergies renouvelables. Ces approches visent à réduire l'impact des saumures sur l'environnement.
4. **Collaboration Internationale :** La collaboration internationale a été soulignée comme un moyen essentiel de partager des connaissances, des technologies et des ressources pour relever les défis de la gestion des rejets de saumures.

La gestion des rejets de saumures est un élément clé de la durabilité de la désalinisation de l'eau de mer. Elle demande une planification soignée, une réglementation adéquate et l'adoption de technologies avancées. La poursuite de la recherche et de l'innovation dans ce domaine est essentielle pour minimiser l'impact environnemental tout en répondant aux besoins croissants en eau douce. Ce chapitre jettera les bases pour la section suivante, qui se penchera sur des études de cas spécifiques de gestion des rejets de saumures.

Chapitre V :

***Optimisation des Systèmes de Rejet des Stations
de Dessalement : Étude de Cas,
Expérimentation et Modélisation***

Chapitre V: Optimisation des Systèmes de Rejet des Stations de Dessalement : Étude de Cas, Expérimentation et Modélisation

V.1 Introduction :

Le dessalement de l'eau de mer est devenu une solution essentielle pour répondre à la demande croissante en eau potable dans le monde. Cependant, cette technologie entraîne des défis environnementaux, notamment la production de grandes quantités de saumure qui doivent être rejetées dans l'océan. Afin de minimiser les impacts environnementaux de ces rejets, il est crucial de simuler et de prédire leur dispersion et leur dilution dans l'eau de mer. Dans ce chapitre, nous aborderons la simulation des rejets des stations de dessalement par le logiciel CORMIX. Nous discuterons des méthodes de modélisation utilisées pour évaluer la dispersion des saumures dans l'environnement marin et nous présenterons les résultats obtenus à partir de notre étude de cas. Cette approche permettra de mieux comprendre l'impact environnemental des rejets de saumures et de proposer des solutions pour une gestion plus efficace et durable de ces effluents.

De nombreuses études ont abordé divers aspects de ce domaine complexe, allant de l'impact environnemental des rejets de saumure à l'efficacité des technologies d'atténuation. Parmi ces travaux, l'étude de (Abualtayef et al., 2016) sur la modélisation numérique de l'élimination de la saumure provenant de l'usine de dessalement d'eau de mer de Gaza a examiné plusieurs scénarios pour déterminer le système le plus efficace pour minimiser les impacts négatifs de la saumure rejetée sur l'environnement marin.

Les résultats de l'étude ont montré que le rejet immergé à plusieurs ports en mer était le système le plus efficace pour minimiser les impacts de la saumure rejetée. Ce système permet une meilleure dispersion de la saumure dans l'eau de mer, réduisant ainsi la concentration de sel dans la zone de rejet. Cela contribue à prévenir les effets néfastes sur la vie marine et l'écosystème.

En revanche, le rejet à un seul port en mer a montré des concentrations plus élevées de sel dans la zone de rejet, ce qui peut avoir des effets négatifs sur la vie marine. Il est important de noter que ces résultats sont basés sur des simulations numériques et doivent être confirmés par des études sur le terrain et des évaluations environnementales approfondies.

De plus, les recherches novatrices de (Papakonstantis et al., 2011) ont exploré six angles distincts de déversement pour un jet flottant, variant de 45° à 90° par rapport à l'horizontale. Dans leur expérience, ils ont employé un réservoir de dimensions importantes

et ont également évalué la distance horizontale ainsi que la hauteur des limites de la source du jet.

(Amitouche et al., 2022) ont utilisé le code CORMIX pour simuler divers scénarios de dispersion de la station de Fouka à Tipaza, en Algérie, et analyser l'impact des variations climatiques, telles que la vitesse du vent et du courant, sur la dilution de la saumure. Ils ont révélé une salinité élevée dans les eaux d'admission, parfois supérieure à 40 g/L, due à une dilution insuffisante ou à une déviation du panache de saumure. Les résultats ont permis de tracer les profils du panache et d'identifier des solutions pour améliorer les performances du diffuseur.

(Purnama et al., 2011) ont réalisé des simulations CORMIX pour deux scénarios représentant les rejets précédents de saumure chauffée et les nouveaux rejets concentrés de saumure des usines Barka. Les résultats montrent que les normes de qualité de l'eau dans l'environnement marin côtier omanais, à l'intérieur de la zone réglementaire de mélange à un rayon de 150 mètres du point de rejet, ont été respectées pour les deux scénarios. Cependant, l'impact potentiel sur le benthos dû à l'attachement du nouveau panache de saumure au fond marin devrait être surveillé et étudié de manière approfondie.

Ces contributions notables s'ajoutent au corpus croissant de connaissances sur le sujet et fournissent des bases solides pour guider notre propre exploration à travers cette étude de cas, expérimentation et modélisation.

V.2 Présentation de la zone d'étude

V.2.1 Situation géographique de Ténès

La commune de Ténès s'étend sur une superficie de 92,28 km² dont 5,70 km² en zones urbaines et 86,58 Km² en zones rurales. Elle est limitée par :

- Au Nord : la mer Méditerranée ;
- Au Sud : Sidi Akkacha et Abou El-Hassen ;
- A l'Est : Oued Goussine ;
- A l'Ouest : Sidi Abderahmane.

V.2.2 Situation géographique et la topographie de la station de Dessalement

Le site de l'usine de Dessalement d'eau de mer de Ténès est localisé dans la wilaya de Chlef, daïra de Ténès, commune de Ténès à l'entrée Ouest de la ville de Ténès, plus précisément au lieu-dit « **Mainis** » à 7 Km du chef-lieu de commune.

A 52 Km à l'Est du chef-lieu de wilaya et à environ 110 Km à l'Ouest de la wilaya de Tipaza, le site est sillonné par la route nationale RN°11 en provenance de Mostaganem et en direction de Tipaza.

Le site considéré pour l'implantation de l'usine de dessalement offre une superficie des 8 hectares, il est limité par :

- Au Nord : par la mer Méditerranée ;
- Au Sud : par la route nationale N°11 ;
- A l'Ouest : par une petite unité de dessalement 5000 m³/j (ancienne station)
- A l'Est : par les habitations de Mainis.

V.2.3 Topographie du site

Le niveau de la surface actuelle du terrain varie de 2,5 m à 16m depuis la route nationale RN°11 jusqu'à la partie inférieure de la mer.



Figure V-1: Localité de la station de dessalement de Mainis

V.3 Présentation de l'unité de dessalement de l'eau de mer (Ténès)

La mise en service finale de la station de dessalement Ténès était en juin 2015 dont la capacité de production est de 200 000 m³/j par la technique d'osmose inverse, assurant l'approvisionnement en eau potable de plusieurs communes.

L'investissement a été réalisé par l'entreprise « *SONATRACH* et *SONELGAZ* » avec 49% et l'entreprise espagnole « *ABENGOA* » avec 51% de cet investissement.

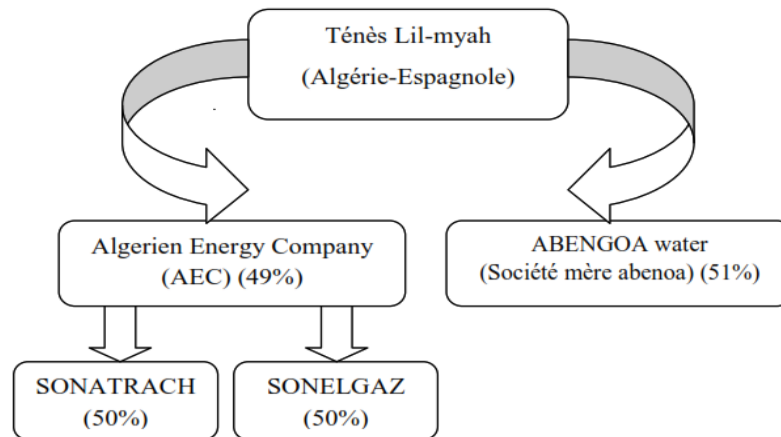


Figure V-2: La gestion de la station de Mainis (BOUCHAKOUR & SADOK Amina, 2017)

V.3.1 La captation de l'eau de mer

La première opération s'effectue au niveau de la station c'est la capture de l'eau de mer qui se fera directement de la mer au moyen de deux tuyauteries prenant appui sur le fond marin, d'un diamètre de 1800 mm chacune. Le débit maximal de capture est de $540\,000\text{m}^3/\text{j}$ ce qui implique une capacité excédentaire de 13,26%.

Voici la version corrigée :

Aux extrémités des tuyauteries de capture, une tour de captage sera installée afin d'aspirer de l'eau à une profondeur moyenne de 8 à 10 mètres, tout en limitant l'entrée des sables et des produits flottants.

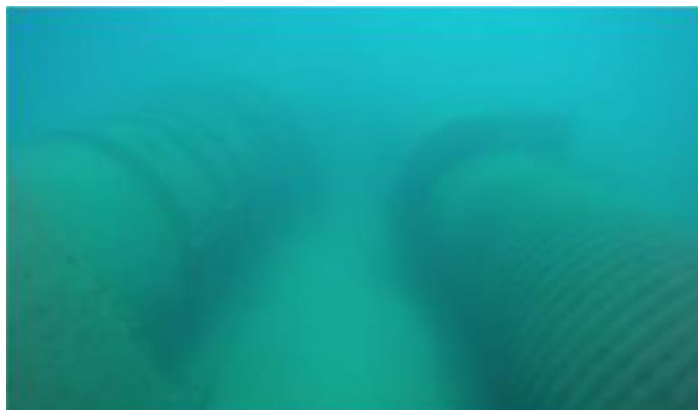


Figure V-3: Conduites de captage de l'eau de mer de la station de Mainis (BOUCHAKOUR & SADOK Amina, 2017)

V.3.2 System de rejet des eaux de saumure :

- Système de 06 diffuseurs doubles de diamètre de 280 mm ;
- Profondeur du premier port diffuseur : 4 m ;
- Profondeur du dernier port diffuseur : 5 m ;
- Profondeur moyenne du système diffuseur : 4,5 m ;
- Hauteur de sortie du jet : 0,75 m au-dessus du fond ;
- Ports diffuseurs alignés sur l'axe de l'émissaire ;
- Distance entre ports diffuseurs : 8 m ;
- Angle de sortie respectivement à (l'horizontale 60°) ;
- Distance entre la fin de la conduite de prise d'eau et le premier diffuseur : 290m.



Figure V-4: point de rejet de la station de dessalement de Ténès

V.4 Matériels et méthodes

Dans le cadre de cette étude, nous examinerons d'abord le diffuseur actuel utilisé pour le rejet des eaux hyper-salines (voir Figure V-5) à partir de la station de dessalement de Mainis. Nous évaluerons également son comportement face aux variations climatiques en effectuant de multiples simulations à l'aide d'un modèle spécialisé appelé « CORMIX ». L'objectif principal de cette démarche est de diagnostiquer l'efficacité du diffuseur.

V.4.1 Modèle CORMIX.

CORMIX, développé par l'Université de Cornell aux États-Unis, est un outil de modélisation numérique essentiel à notre recherche sur la dispersion et la dilution des polluants dans l'eau (Bouthiba et al., 2022) Ce logiciel utilise un modèle mathématique

sophistiqué pour simuler la dispersion des polluants en prenant en compte des paramètres tels que les conditions météorologiques, les courants, la température de l'eau et la topographie du fond marin.

Une fonctionnalité clé de CORMIX est sa capacité à calculer la zone de mélange, où les effluents sont dilués à un niveau acceptable pour l'environnement. Utilisé par des agences gouvernementales, des entreprises industrielles et des universités, CORMIX évalue l'impact environnemental des rejets de polluants, y compris les saumures des stations de Dessalement. Il est également employé pour planifier des opérations de déversement de déchets en mer, évaluer les risques environnementaux liés aux accidents maritimes et optimiser les systèmes de traitement des eaux usées.

CORMIX, un modèle de type stationnaire, appartient à la catégorie des modèles échelle de longueurs. Ces modèles mesurent l'influence relative du débit de l'effluent, de sa quantité de mouvement, de sa flottabilité et de la vitesse moyenne du courant du milieu récepteur sur la dispersion de l'effluent dans celui-ci (Bouthiba et al., 2022). Le modèle fournit une représentation tridimensionnelle efficace des processus de mélange et de transport d'un effluent dans divers milieux récepteurs. Les équations du modèle, basées sur l'analyse géométrique de l'effluent, permettent de résoudre la trajectoire tridimensionnelle et la concentration maximale au centre du panache (Amitouche et al., 2022; Bleninger et al., 2010; Loya-Fernández et al., 2012; Maalouf, 2014; Missimer et al., 2015; Purnama et al., 2011);

V.4.2 Utilisation Conjointe de CORMIX et du SIG :

L'approche méthodologique de cette recherche a bénéficié d'une collaboration synergique entre le logiciel CORMIX et le Système d'Information Géographique (SIG). Cette combinaison stratégique a permis une analyse plus holistique des rejets des stations de Dessalement, intégrant non seulement la dispersion et la dilution des polluants, mais également leur impact spatial dans le contexte géographique.

CORMIX :

Comme mentionné précédemment, le logiciel CORMIX a été le pilier de notre modélisation. Il a permis de simuler avec précision la dispersion des polluants dans l'environnement marin, tenant compte des divers paramètres tels que les conditions météorologiques, les courants, la température de l'eau, et la topographie du fond marin. La capacité de CORMIX à calculer la zone de mélange a été cruciale pour assurer la conformité aux normes environnementales et minimiser l'impact sur les écosystèmes marins.

Intégration avec le SIG :

En complément, le Système d'Information Géographique a été intégré dans notre approche méthodologique. Cette collaboration a permis de superposer les résultats de CORMIX sur des cartes géographiques détaillées, offrant une visualisation plus complète des impacts potentiels des rejets. L'utilisation du SIG a facilité la compréhension spatiale des résultats, permettant une évaluation plus approfondie des zones les plus touchées et la planification efficace de mesures de gestion.

Cette approche intégrée, combinant la modélisation précise de CORMIX avec la représentation spatiale du SIG (Figure V-5), a enrichi notre compréhension des implications environnementales des rejets des stations de dessalement. Elle a également renforcé la capacité à prendre des décisions éclairées en matière de gestion environnementale et de planification des opérations liées aux rejets industriels en mer.

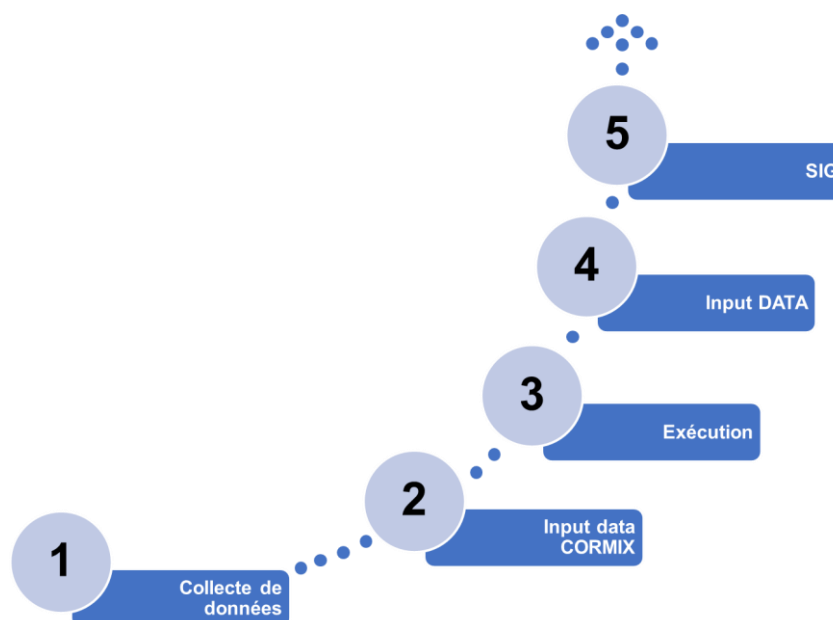


Figure V-5: Schéma du Processus d'Analyse des Rejets de CORMIX avec SIG

V.4.3 Paramètres de simulation :

Une série de paramètres (Tableau V 1) communs à l'ensemble des scénarios, représentent les données et les caractéristiques de la station de dessalement d'eau de mer de Mainis, a été établie afin de permettre de les comparer et les discuter.

Tableau V-1: Caractéristiques de rejet de la station de dessalement de MAINIS (Bouthiba et al., 2022)

Caractéristiques de l'effluent :	
Débit maximal de rejet	2.93 m ³ /s
Salinité	72 g/l
Accroissement de salinité	31.5
Densité (19.5°C)	1055.05 kg/m ³
Caractéristiques du milieu récepteur :	
Salinité	38 g/l
Densité (19.5°C)	1026.81 kg/m ³
Vitesse du vent	2 – 8 m/s
Vitesse du courant	0.02 – 0.4 m/s
Caractéristiques du diffuseur :	
Distance par rapport à la côte	150 m
Profondeur du premier port diffuseur :	4 m
Profondeur du dernier port diffuseur	5 m
Longueur de la section du diffuseur	40 m
Nombre de ports	12
Hauteur du diffuseur	0.75 m
Distance entre les ports du diffuseurs	8m
Diamètre des ports	0.28 m
Vitesse de sortie de rejet (de jet)	3.96 m/s
Angle de décharge	60°

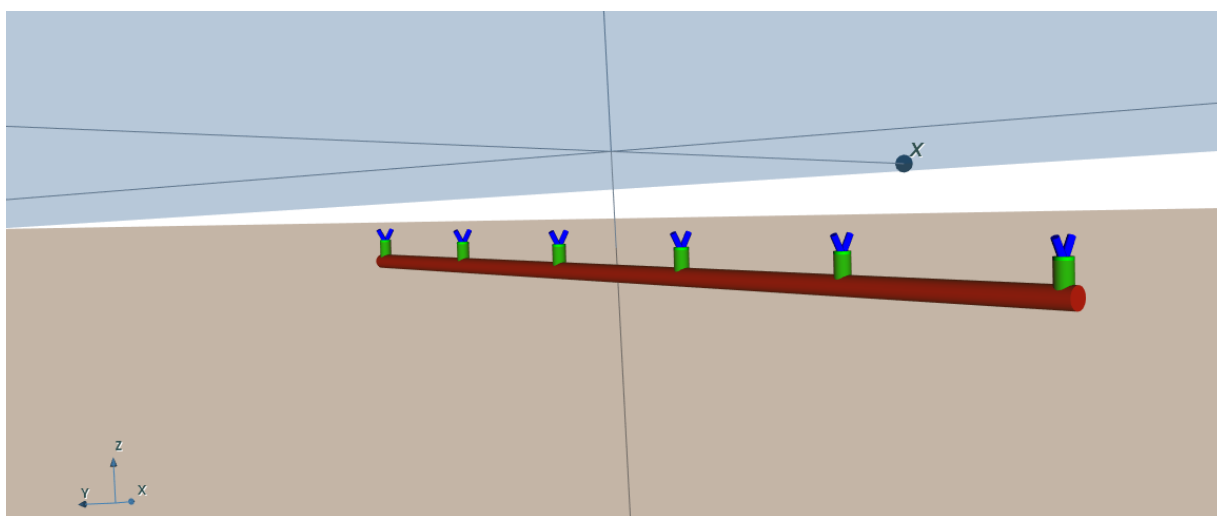


Figure V-6: Diffuseur de la station de Mainis -Image 3D sur CORMIX 11.0

Localisation du point de prise : $X_{UTM} = 341214$ m ; $Y_{UTM} = 4041905$ m ; La prise est effectuée à 8.0 m de profondeur (Figure V-8) et son alignement est montré dans la Figure V-7.

Localisation du point de rejet de saumure : $X_{UTM} = 341365$ m ; $Y_{UTM} = 4041611$ m ; la profondeur est de 4.5 m, le rejet est effectué à 0.75 m du fonds marin à 60° de l'horizontale, L'angle vertical (angle de décharge) $\text{THETA} = 60^\circ$, Les positions de l'émissaire et le point de captage sont montrés dans la Figure V-7 :



Figure V-7: Image sur google Earth du point de rejet et de captage

La figure V-7, tirée de Google Earth, montre clairement la turbidité de l'eau près du point de rejet, indiquée par un changement de couleur dans l'eau de mer. Cela est probablement dû à la saumure rejetée qui, en raison de sa densité plus élevée, se mélange avec l'eau de mer environnante, créant des motifs de turbulence visibles depuis le ciel. Le fait que ces turbulences soient clairement visibles suggère que le point de rejet est à une profondeur relativement faible, ce qui ne permet pas une dilution et une dispersion adéquates de la saumure dans l'eau de mer, augmentant ainsi le risque de concentration de salinité à proximité du point de rejet.

La proximité de la turbulence à la côte indique également que les courants marins ou les conditions de vent pourraient potentiellement pousser la saumure concentrée vers le rivage, ce qui pourrait avoir des effets néfastes sur les écosystèmes côtiers. Idéalement, le point de rejet devrait être situé à une profondeur plus grande pour faciliter une meilleure dispersion et dilution de la saumure.

La figure ci-dessous (Figure V-8) représente la bathymétrie de la zone d'étude.

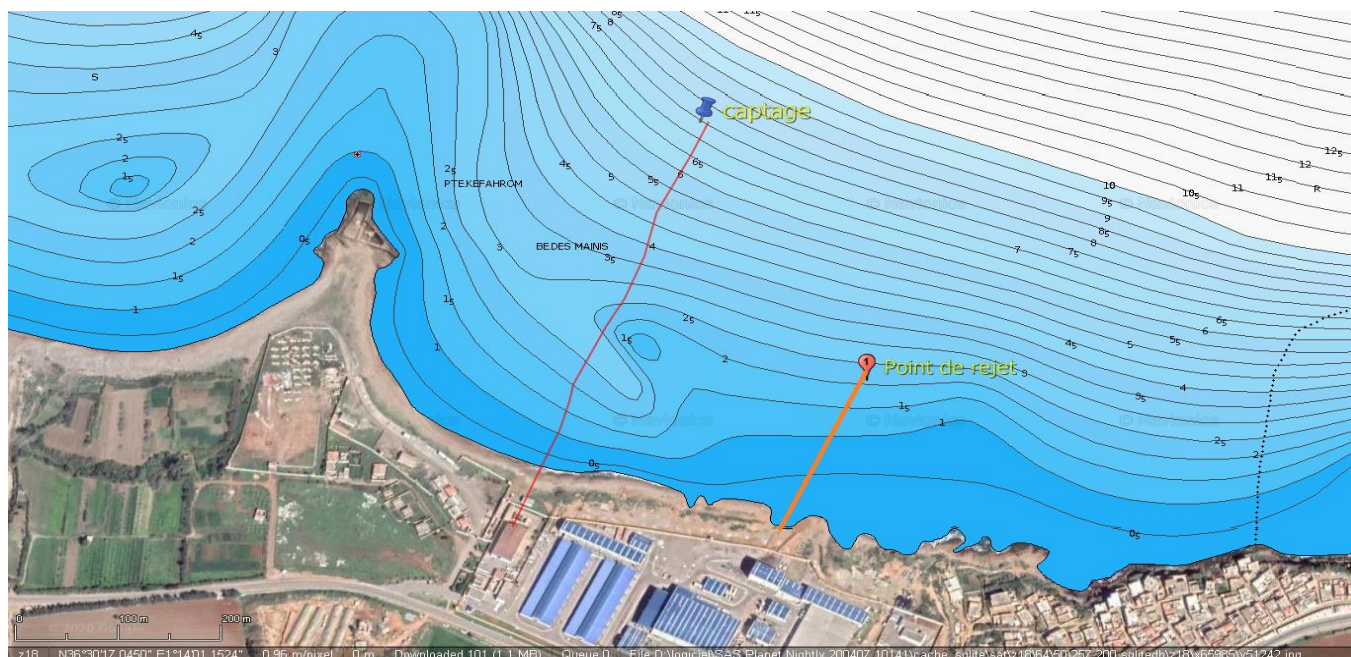


Figure V-8: Carte des courbes à niveau des profondeurs sur SAS Planet

D'après la figure ci-dessus (Figure V-7) on peut voir la turbulence créer par l'effet de vitesse de jet de saumure ce qui confirme que le diffuseur de la station n'est pas assez profond

La deuxième image représente une carte bathymétrique, montrant les profondeurs marines autour du point de captage et de rejet. Les lignes de contour indiquent la profondeur de l'eau, qui est essentielle pour comprendre comment la saumure rejetée se comportera dans l'environnement marin. Le point de rejet est situé à une profondeur de 4 mètres, ce qui est relativement peu profond. Dans des conditions idéales, les eaux de rejet doivent être libérées à des profondeurs où une dilution suffisante peut se produire rapidement et où les courants peuvent disperser efficacement la saumure pour minimiser l'impact écologique.

Une profondeur de rejet faible peut entraîner une série de conséquences écologiques, notamment :

- La formation de zones hyper salines près du fond marin, affectant la faune et la flore marines.
- Une réduction de l'oxygène dissous à proximité du point de rejet, pouvant affecter la vie marine.
- Des changements dans les communautés benthiques dues à l'augmentation de la salinité et des sédiments perturbés par le flux de rejet.

Les données visuelles fournies par ces images suggèrent que la conception actuelle du système de rejet de Mainis pourrait ne pas être optimale pour la protection des écosystèmes marins locaux. Pour améliorer cette situation, il pourrait être nécessaire de :

- Augmenter la profondeur du point de rejet pour permettre une dilution plus efficace de la saumure.
- Reconsidérer la position du point de rejet en fonction des courants dominants et des conditions océanographiques pour optimiser la dispersion.
- Évaluer l'utilisation de diffuseurs plus performants qui pourraient augmenter la dispersion de la saumure et réduire la salinité.
- Mener des études d'impact environnemental supplémentaires pour évaluer l'effet à long terme de la saumure sur les écosystèmes marins locaux et ajuster la gestion des rejets en conséquence.

Ces ajustements devront tenir compte à la fois des exigences opérationnelles de l'installation de dessalement et des impératifs de protection de l'environnement marin.

V.5 Résultats et discussions

Le taux de dilution requis de l'effluent est calculé et correspond à $S=36$, sur la base d'une augmentation de la salinité tolérée de 5%, (Missimer et al., 2015) Autrement dit, la salinité de notre rejet, qui est égale à 72 g/l, doit être diluée un peu plus de 36 fois afin que le panache qui est engendré ne dépasse pas les 38.5 g/l tolérés, une fois mélangée à l'eau de mer.

$$S = \frac{C_0 + nC_1}{n}$$

S : Dilution, *n* : Dilution, *C* : Concentration tolérante, *C₀* : effluent concentration, *C₁* : ambient concentration

V.5.1 Diagnostique du comportement du diffuseur dans le milieu récepteur :

Le diffuseur est l'élément central dans la dispersion de la saumure rejetée par les stations de dessalement dans l'environnement marin. Il est donc essentiel de comprendre son comportement pour évaluer l'impact environnemental de ces rejets. Dans cette partie, nous allons examiner les méthodes de diagnostic disponibles pour étudier le comportement du diffuseur et les résultats que nous avons obtenus à l'aide de ces méthodes. Ensuite, nous discuterons de l'impact de ces résultats sur la modélisation de la dispersion de la saumure et la prédiction de son impact sur l'environnement marin.

Pour ce faire nous avons étudié le comportement du diffuseur pour 3 couples de vitesses, un premier couple représente un cas défavorable, un second représente un cas intermédiaire et enfin un dernier représente un cas favorable (tableau V-2).

Tableau V-2: Cas de vitesses environnementales étudiées

Type de cas	Vitesse du courant (m/s)	Vitesse du vent (m/s)
1^{er} cas : défavorable	0,065	3,5
2^{eme} cas : intermédiaire	0,11	5
3^{eme} cas : favorable	0,2	8

Les Figure V-9 et V-10 ci-dessous représente les différentes dilutions et concentration pour les trois couples de vitesse du courant et du vent cités précédemment.

Concernant le premier et le deuxième cas, la dilution devient constante après les valeurs 20.90 et 23.40 successivement et le taux de dilution requis ne sera jamais atteint, c'est-à-dire que la saumure rejetée aura toujours une salinité non admissible pour le milieu récepteur Figure V-8, ce qui est très mauvais pour l'écosystème marin (LATTEMANN, 2010).

Pour le troisième cas, la dilution continue à augmenter mais le taux de dilution requis ne sera jamais atteint.

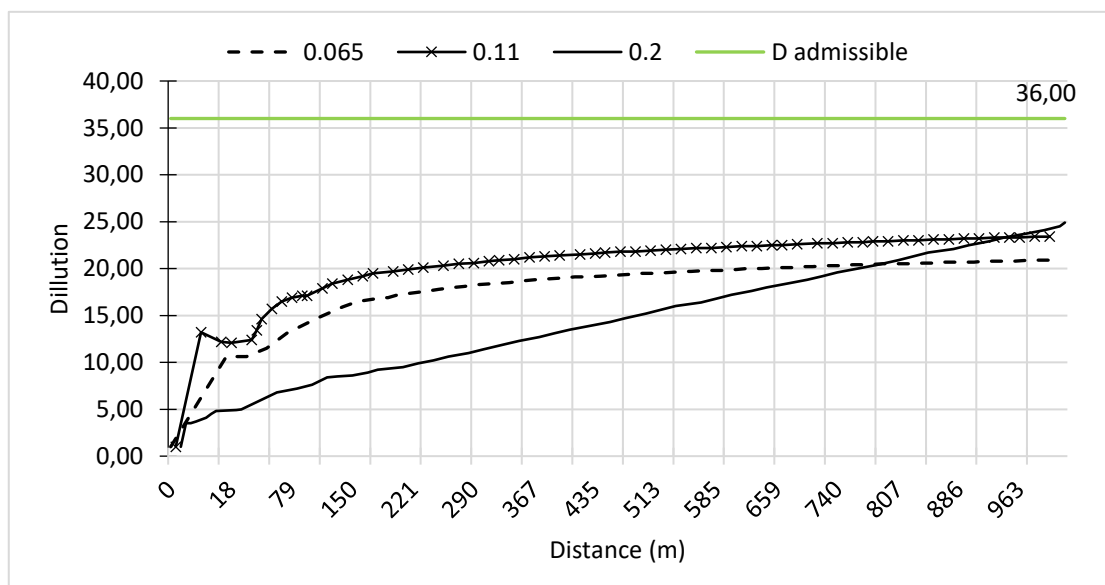


Figure V-9: Graphiques des dilutions en fonction de vitesses.

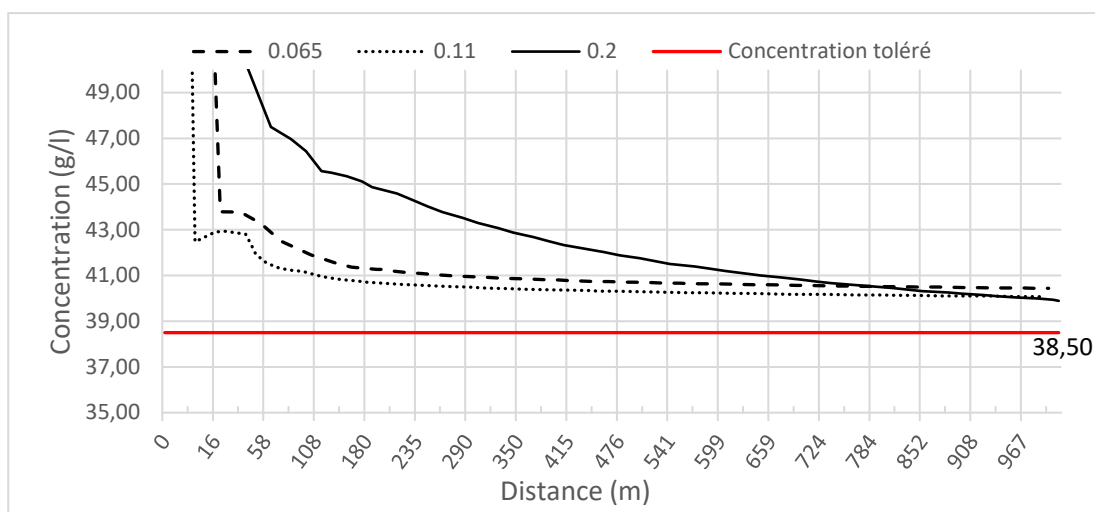


Figure V-10: Graphiques des concentrations en fonction de vitesses.

D'après ces résultats, nous pouvons dire que l'émissaire actuel de la station de dessalement de Mainis n'est pas performant, car il n'assure pas une bonne dilution de la saumure dans toutes les conditions environnementales possibles, et de ce fait l'impact négatif sur l'environnement sera élevé.

C'est pour cela que des modifications voire même des alternatives du diffuseur doivent être apportées.

Dans le but de tester l'éventuelle interaction entre les eaux de captage et celles de rejet de la saumure, plusieurs scénarios ont été simulés.

Tableau V-3: caractéristiques du scénario N°1

Longueur du diffuseur (m)	40m
Courant (m/s)	0,155
Vent (m/s)	6,5
Distance entre les ports (m)	8m
Profondeur (m)	4,5
Distance au rivage	150

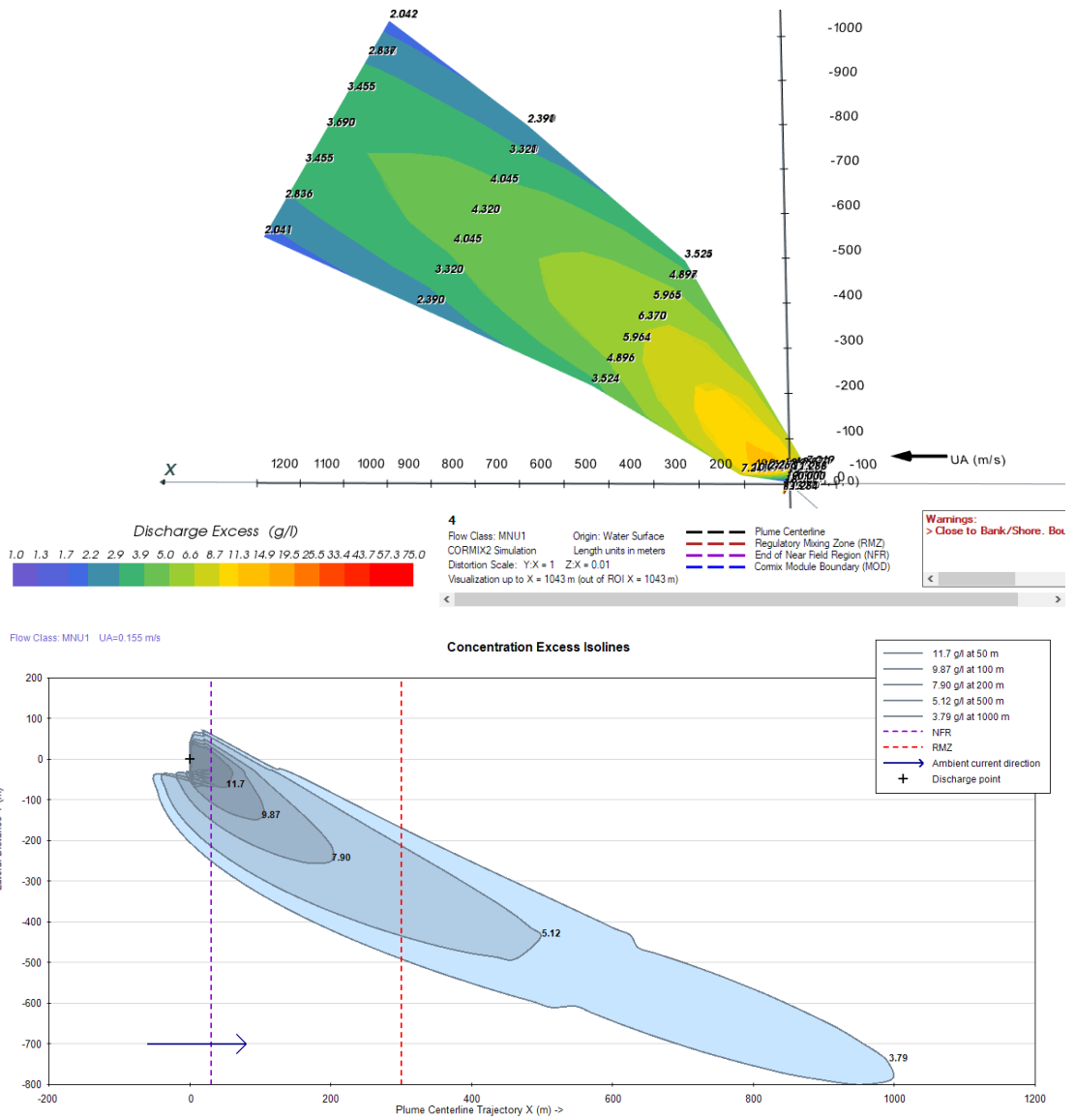


Figure V-11: Affichage du panache du scénario N°1 sur CORMIX

Les figures V-11 et V-12 montrent les résultats de simulation de scénario N°1 tracés sur QGIS3.16.18.

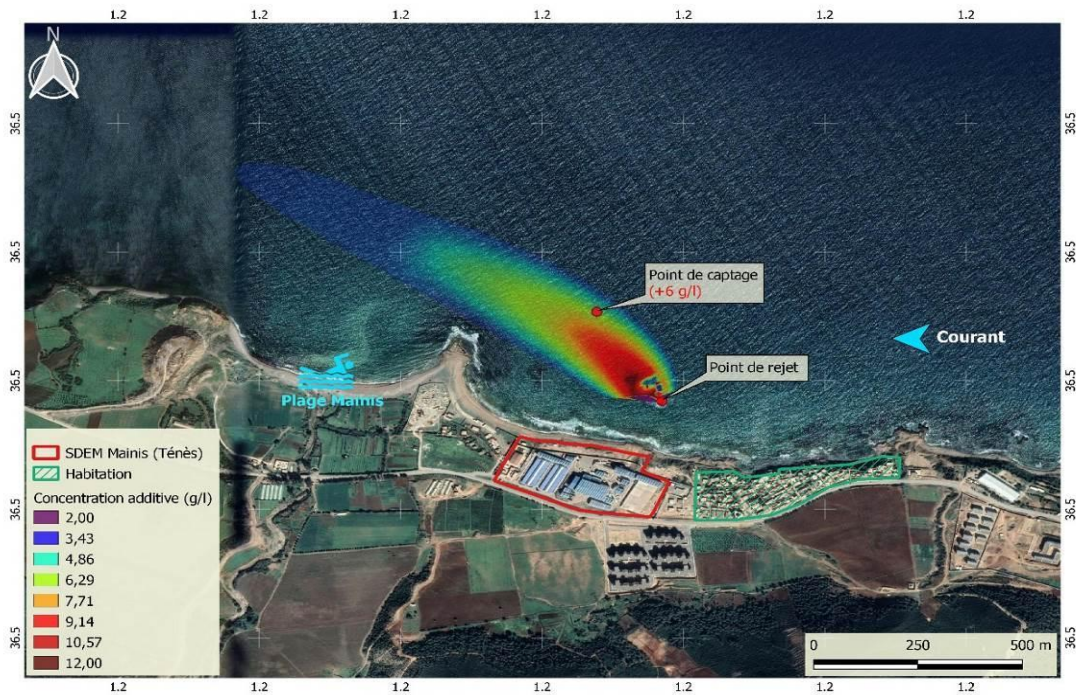


Figure V-12:Présentation des résultats de simulation CORMIX de panache sur SIG
(Sous-couche : google earth)

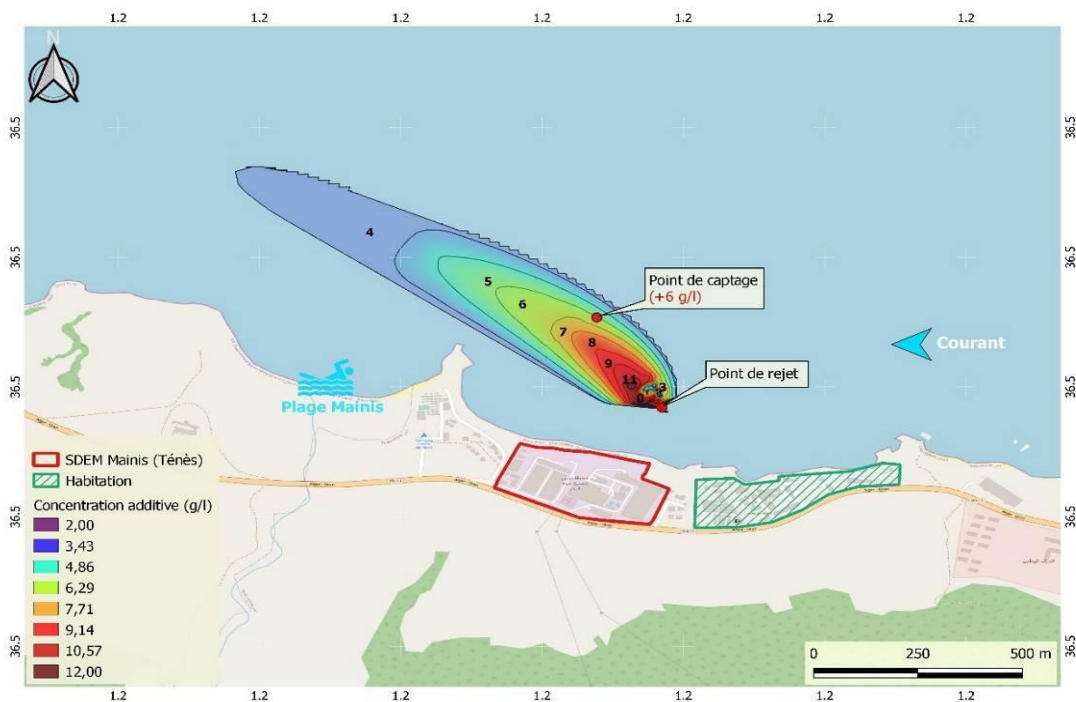


Figure V-13:Présentation des résultats de simulation CORMIX de panache sur SIG
(Sous-couche : google map)

La figure V-12 et V-13 présente les résultats de simulation de panache obtenus à l'aide du logiciel CORMIX GT 11.0 et intégrés dans le SIG QGis 3.16.18 avec une sous-couche de Google Earth. On peut clairement observer l'interaction entre les eaux de rejet de saumure et le point de captage. Avec un excès de concentration de salinité de +6 g/l au point de captage

et la saumure touche le fond marin après une distance de 18m avec une salinité de 44,79 g/l (selon les résultats de simulation de CORMIX), ce qui signifie que la position (coordonnées géographiques) du point captage et celle de rejets sont mal étudié d'un part, ou un mauvais dimensionnement du diffuseur de rejet d'autre part.

En outre on peut voir clairement sur les mêmes figures que le panache de rejet de saumure se converge et s'approche de la plage de Mainis. « Éloigner les rejets urbains des côtes et bien choisir la localisation du point du rejet afin de se servir de la capacité des courants marins et d'autres paramètres météorologiques pour éloigner le rejet des zones sensibles et augmenter la dilution ». (CHIBAN, 2013)

Cette représentation visuelle permet de mieux comprendre les phénomènes de dispersion et de mélange de la saumure dans l'environnement récepteur. Les informations obtenues à partir de cette simulation sont essentielles pour une gestion adéquate et durable des rejets de saumure des stations de dessalement d'eau de mer.

L'interaction entre les eaux de rejet et celle de captage peut avoir un impact négatif sur les performances de l'usine de dessalement, car les conditions de dessalement d'un volume d'eau à une concentration de 37 g/l sont différentes au dessalement du même volume d'eau avec une concentration de 42 g/l, ce qui entraîne une augmentation de la consommation d'énergie et une réduction de la durée de colmatage des membrane d'osmose inverse et par conséquent une augmentation du coût de dessalement.

Tableau V-4 Scénario N°2

Longueur du diffuseur (m)	40m
Courant (m/s)	0,2
Vent (m/s)	2
Distance entre les ports (m)	8m
Profondeur (m)	4,5
Distance au rivage	150

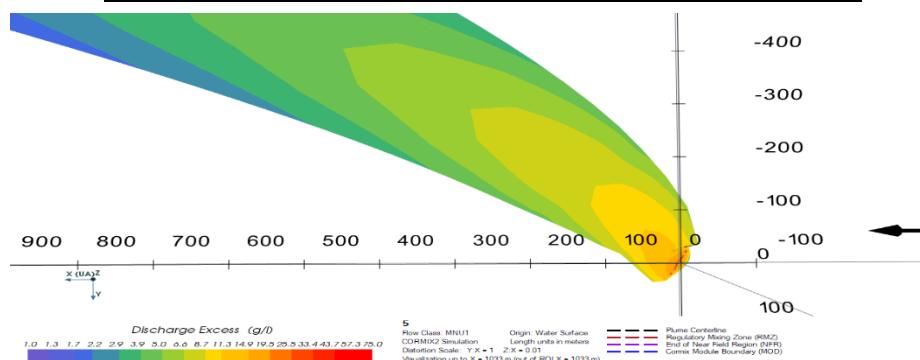


Figure V-14:Affichage du panache du scénario N°2 sur CORMIX

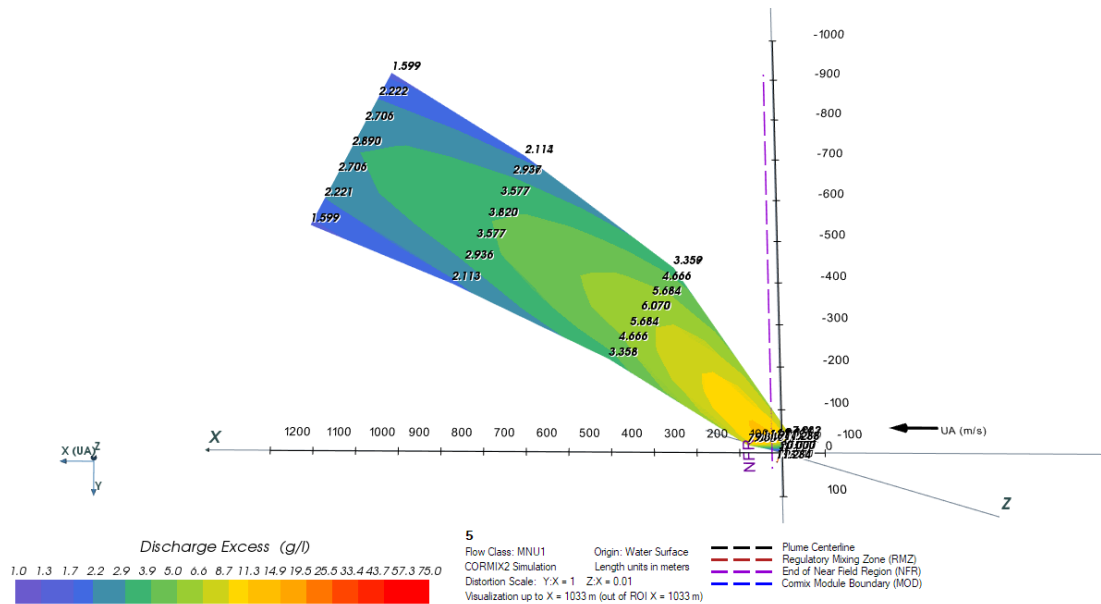


Figure V-15: Affichage du panache du scénario N°2 sur CORMIX

Tableau V-5 : Scénario N°3

Longueur du diffuseur (m)	40m
Courant (m/s)	0,065
Vent (m/s)	0,2
Distance entre les ports (m)	8m
Profondeur (m)	4,5
Distance au rivage	150

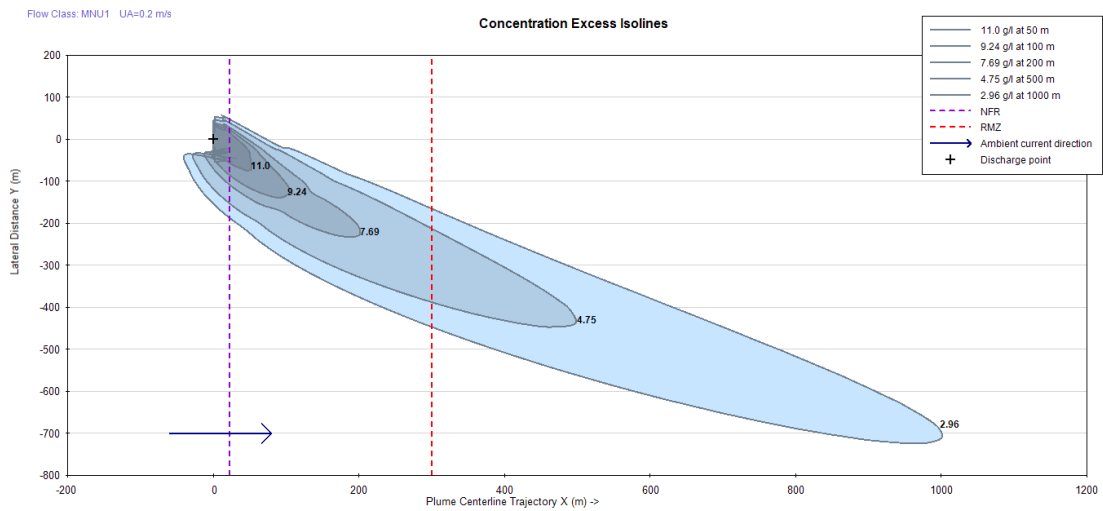


Figure V-16: Affichage du panache du scénario N°3 sur CORMIX

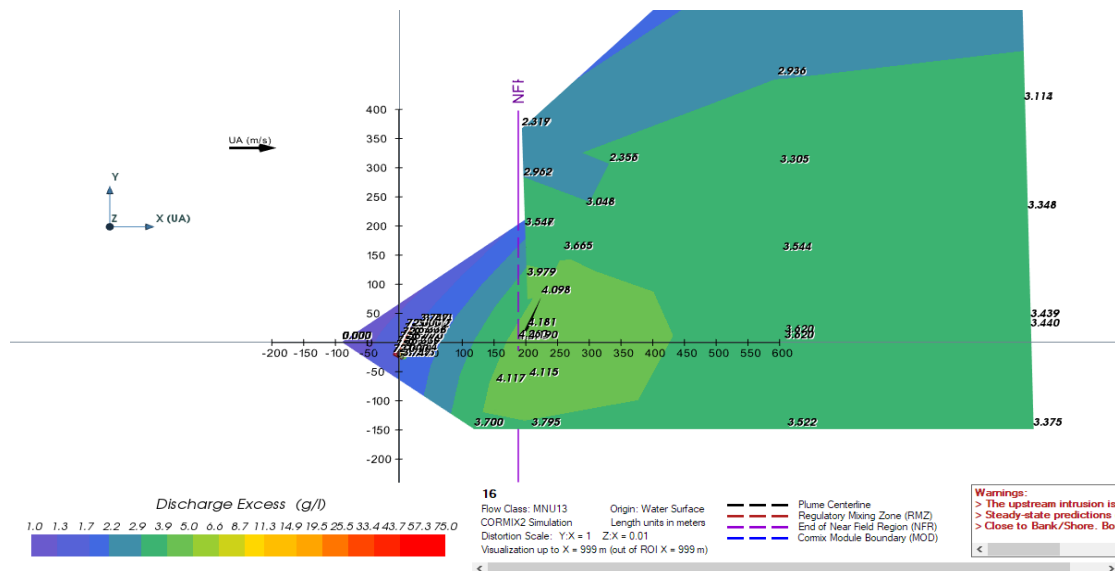


Figure V-17: Affichage du panache du scénario N°3 sur CORMIX

V.5.2 Améliorations et configuration alternative du diffuseur actuel :

Concernant les simulations étudiées, nous avons mis en évidence les variables clés du processus de dilution et étudié le rôle de chacune. Les variables mises en jeu dans ce contexte sont : Diamètre des ports, le nombre des ports, la distance entre les ports, la profondeur de diffuseur, on change une variable à la fois et on garde les autres données constantes.

V.5.2.1 Variation du diamètre des ports (vitesse de rejet) :

Pour un angle de décharge de 65° , une hauteur du diffuseur de 0,75 m, à une profondeur de 4,5 m et à une vitesse environnementale du courant de 0.065 m/s, la figure V-15 ci-dessous nous montrent les différentes dilutions pour les 3 différents diamètres $D_1=0.1$ m ($v=31,08$ m/s), $D_2=0.15$ m ($v=13.82$ m/s), $D_3=0.2$ m ($v=7,7$ m/s).

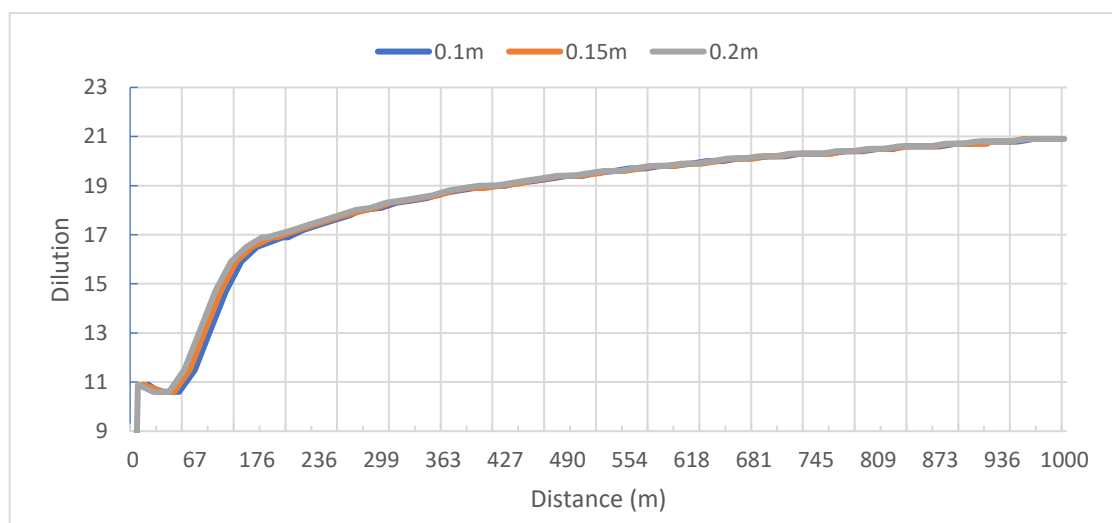


Figure V-18: Graphiques des dilutions en fonction des différents diamètres des ports

Nous constatons qu'il n'y avait pas une amélioration de la dilution lors de la variation de diamètre des ports, (Figure V-16) les courbes sont superposés les unes sur les autres, cette intervention sur le diffuseur est négative donc on doit chercher d'autre solution en changeant d'autre paramètre pour améliorer la dilution.

V.5.2.2 Variation du nombre des ports :

Dans ce scénario nous allons suivre la dilution de la saumure rejetée par l'usine de dessalement de Mainis et l'éventuelle interaction lors de modification de la conception de diffuseur. Pour ce faire on augmente le nombre de ports de 6 ports double au 15 ports double tout en conservant les mêmes caractéristiques du scénario précédent (**scénario N°3**).

Tableau V-6: Caractéristique du scénario N° 4

Longueur du diffuseur (m)	96
Courant (m/s)	0,05
Vent (m/s)	3
Distance entre les ports (m)	3,31
Profondeur (m)	4,5
Distance au rivage	150
Hauteur du diffuseur (m)	2
Nombre de port	15 double (30)

On remarque dans la figure V-17 que la dilution est assurée dès les premiers 100 m et il existe aussi une légère interaction entre les rejets de saumure et les eaux de captage dont un excès de la concentration (salinité) au point de captage est de (0,7 g/l). Cette faible variation de salinité n'influence pas sur le fonctionnement de SDEM.

Une amélioration est clairement remarquable par rapport à l'état initial (+6 g/l) (figure V-12), cette intervention sur la conception de l'émissaire influe positivement sur ses performances de fonctionnement et négativement sur le côté économique et sur le coût de diffuseur.

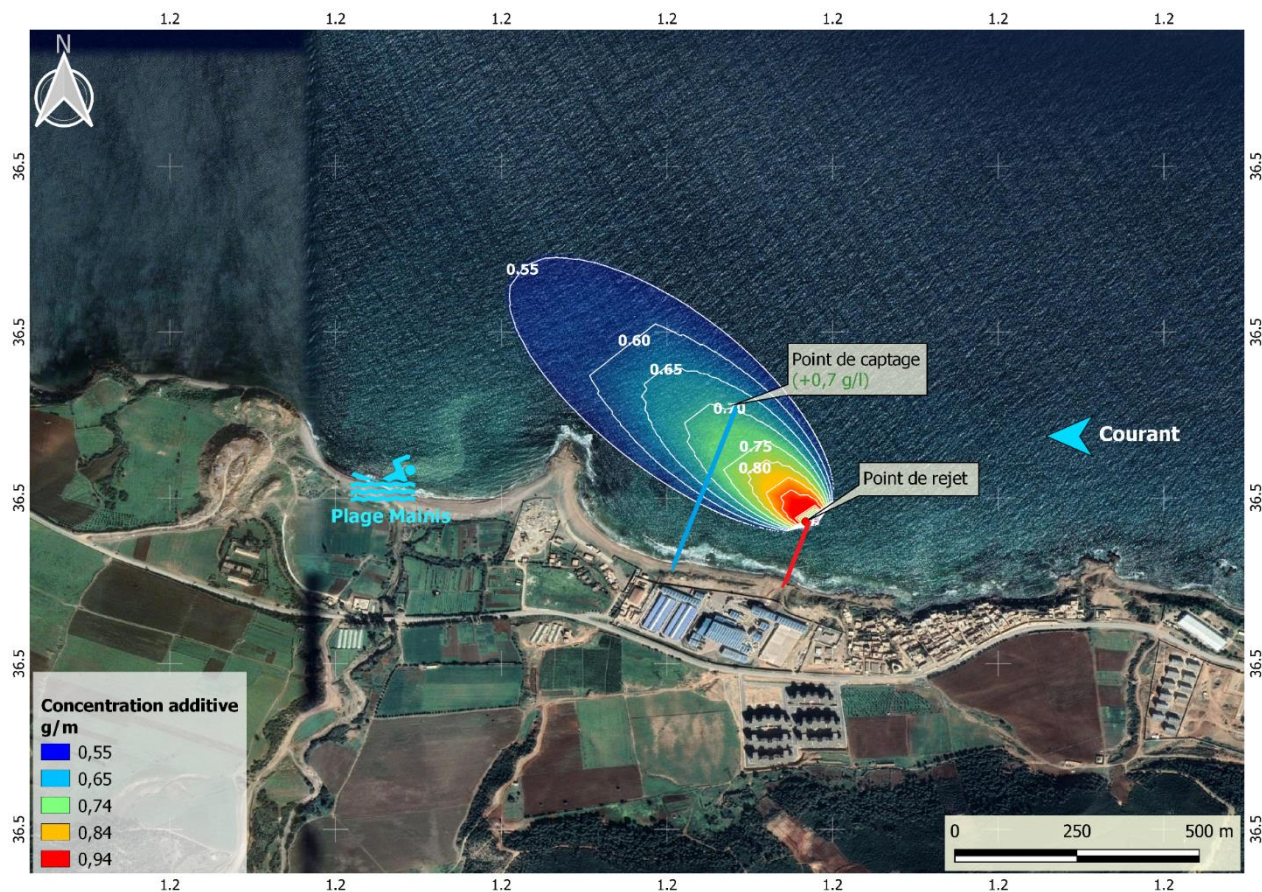


Figure V-19: Présentation des résultats de simulation sur SIG

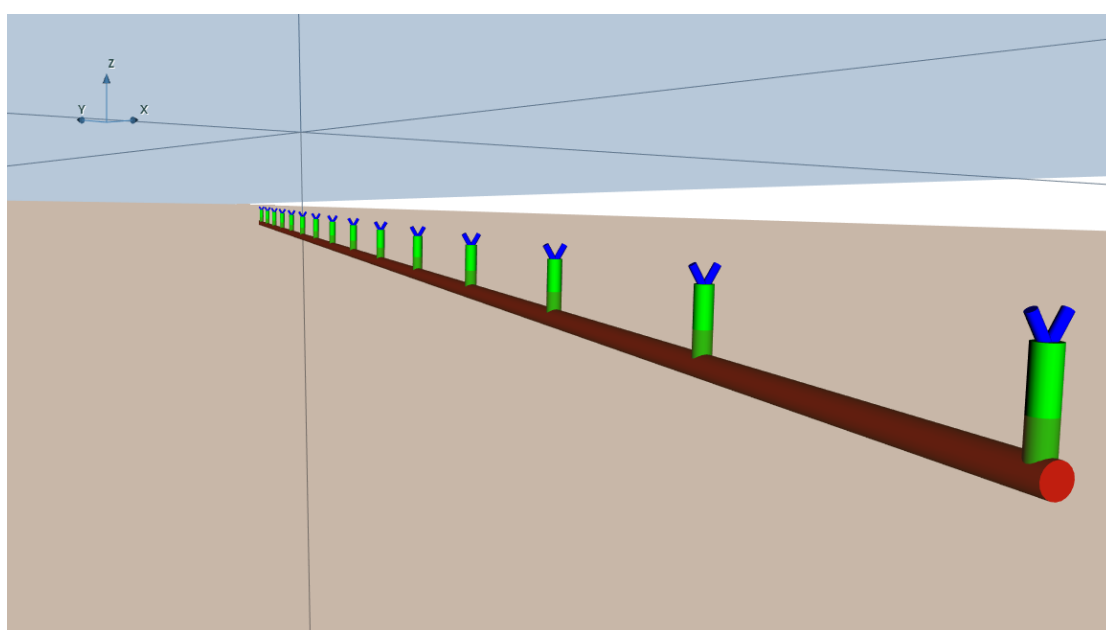


Figure V-20: Image 3D d'un diffuseur sur CORMIX

V.5.2.3 Variation de la distanciation entre les ports (longueur du diffuseur) :

Dans le but d'évaluer l'influence de la distanciation entre les ports sur la dilution, une simulation a été effectuée (scénario N°2) sur CORMIX 11.0 dont la variable est la distance entre les ports tout en gardons les autres caractéristique constantes (tableau V-7).

Tableau V-7: scénario N°2

Longueur du diffuseur (m)	100 (au lieu de 40 m)
Courant (m/s)	0,065
Vent (m/s)	3,5
Distance entre les ports (m)	20 (au lieu de 8m)
Profondeur (m)	4,5
Distance au rivage	150

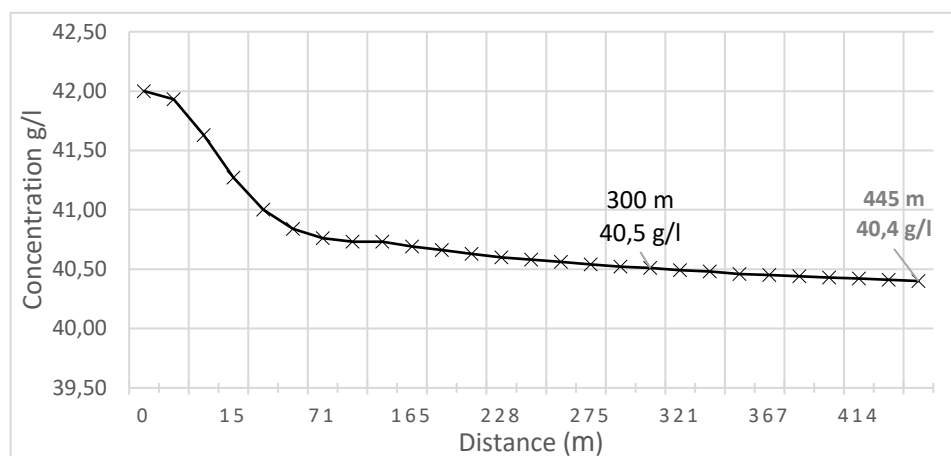


Figure V-21: Graphiques des concentrations (variation distance ports)

Le graphe ci-dessus illustre les résultats obtenus.

La concentration diminue jusqu'à 40,5 (41,94 g/l auparavant) après une distance de 300 m parcouru

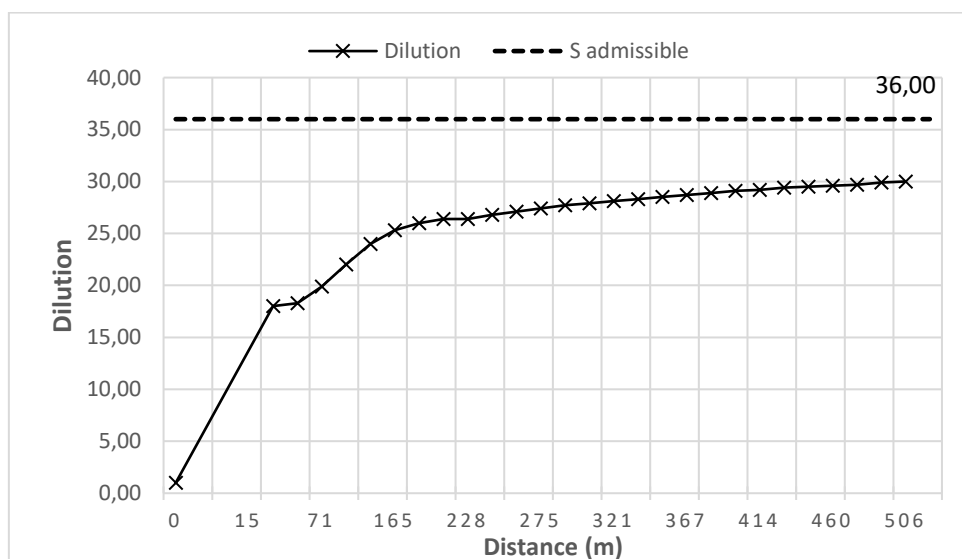


Figure V-22: Graphiques de dilution (variation distance entre ports).

Les résultats obtenus de ce scénario montrent que l'augmentation de la distanciation entre les ports de 8m à 20 m affecte clairement sur la dilution, cette dernière s'augmente de 18,3 au 27,8 après 300 m de distance parcouru, la longueur de diffuseur devient 100 au lieu de 40 m ce qui influence sur le coût de conception. L'amélioration de la dilution est efficace mais la dilution admissible n'a pas encore atteint.

V.5.2.4 Amélioration finale (longueur + profondeur du diffuseur) :

Après la détection du problème sur le diffuseur (distance entre les ports insuffisante), on applique dans cette phase d'étude d'autre intervention sur le diffuseur tout en gardant un équilibre sur le rapport coût / performance :

- La variation de la profondeur de l'émissaire sous-marine de 4,5 à 6,2 m (lorsque la profondeur s'augmente, la dilution s'augmente. (Roberts, 2015))
- La variation de la hauteur des ports par rapport au fond marin de 0,75 à 2 m, cette hauteur affecte sur le taux de dilution.

Tableau V-8: Scénario N°3

	Initial	Proposé
Longueur du diffuseur (m)	40 m	100
Courant (m/s)	0,065	0,065
Vent (m/s)	3,5	3,5
Distance entre les ports (m)	8m	20
Profondeur (m)	4,5	6,28
Distance au rivage (m)	150	200
Hauteur de jet par rapport au fond marine(m)	0,75m	2 m

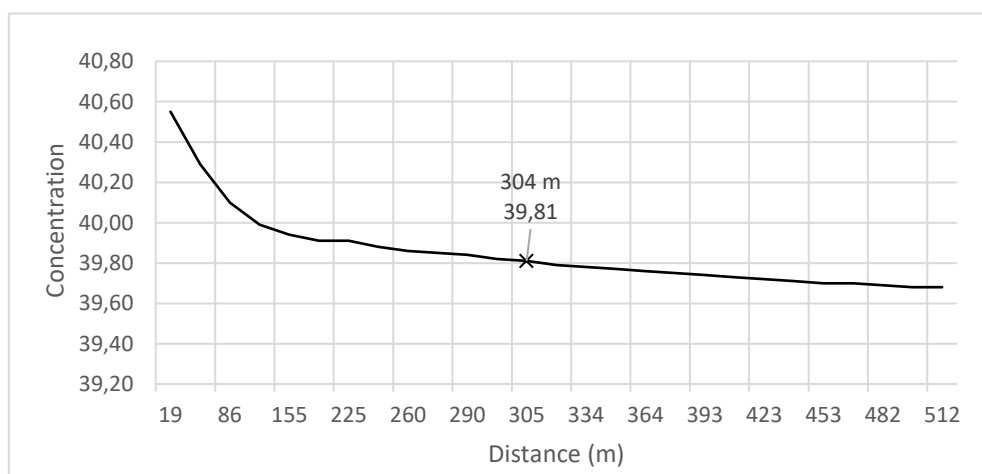


Figure V-23: Graph des concentrations (changement hauteur diffuseur).

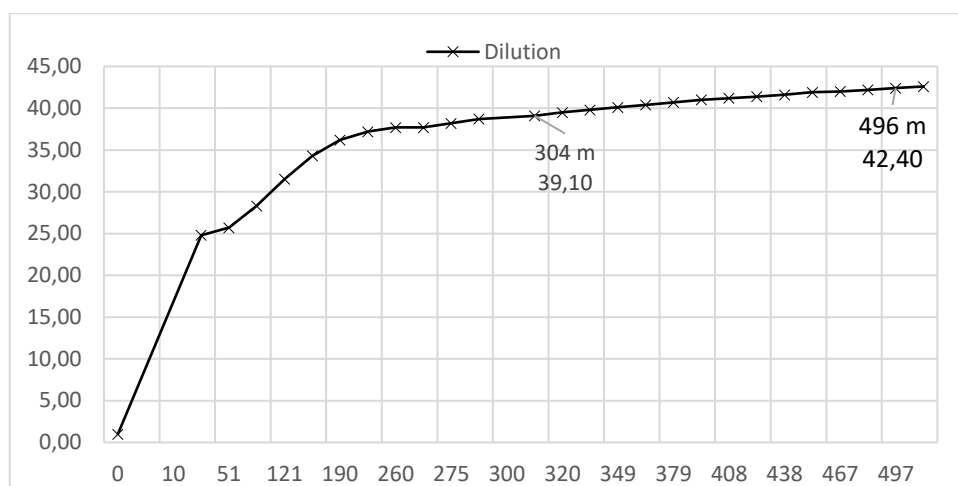


Figure V-24: Graphiques de dilution (changement hauteur du diffuseur).

On remarque que la concentration diminue jusqu'à 39,8 g/l (41,9 auparavant) après 300 m et de 39,60 g/l après 500 m de distance parcourue, cette configuration donne des résultats satisfaisants et améliore le fonctionnement du diffuseur de la station de dessalement de MAINIS, Cette conception est la plus favorable

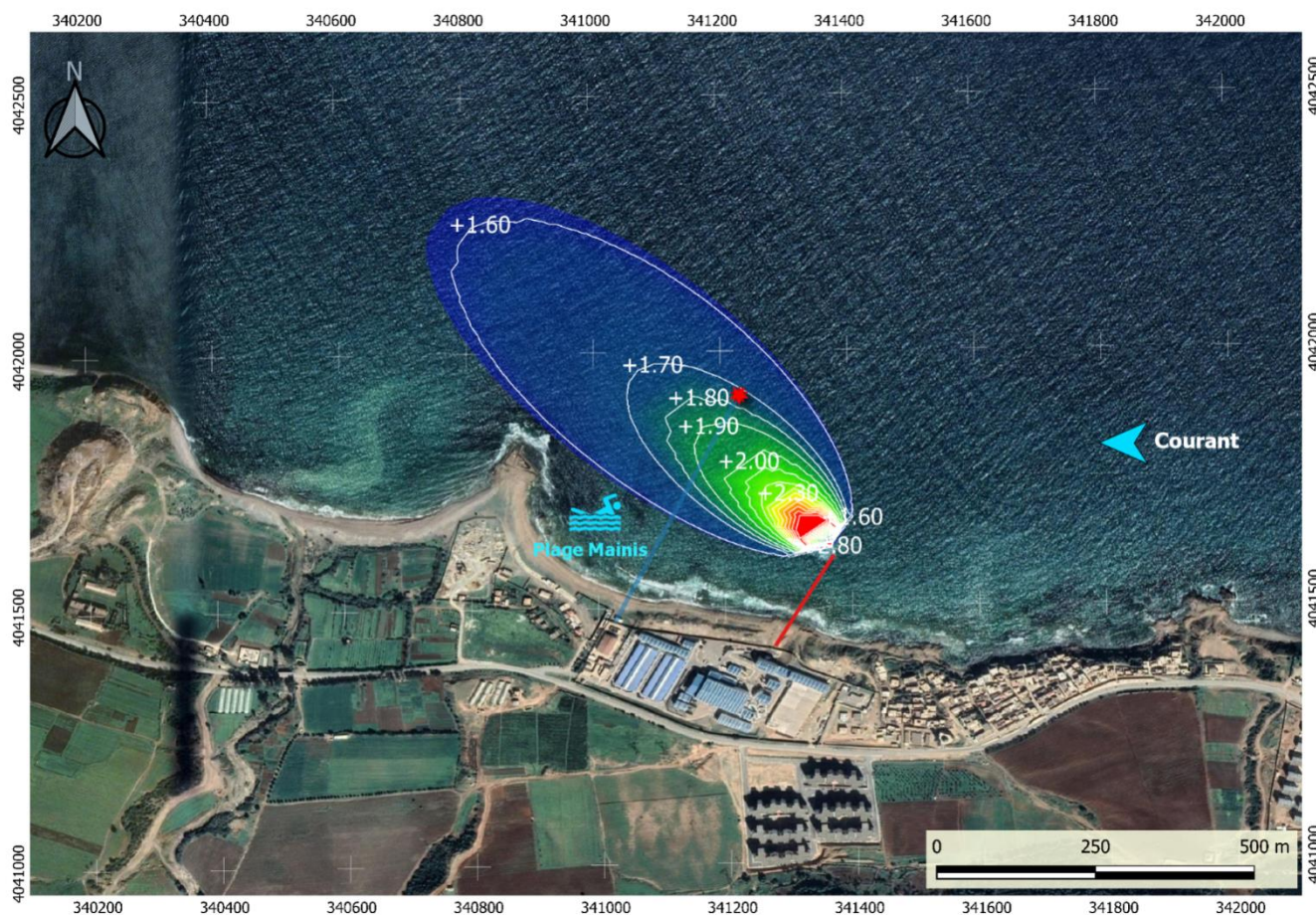


Figure V-25: Présentation des résultats de CORMIX GT 11 sur SIG

V.5.3 Comparaison entre la dilution dans la configuration initiale et la configuration finale proposé :

Afin vérifier le comportement du diffuseur après les modifications apportées sur sa conception, nous allons comparer la dilution de rejet de la saumure entre l'état initiale et l'état finale, cette comparaison est effectuée dans les mêmes conditions climatiques (vitesse du vent et du courant)

Tableau V-9: tableau comparatif entre l'état initiale et finale du diffuseur

Distance parcouru	Dilution		Taux d'augmentation
	Configuration Initiale	Configuration Finale Proposé	
100 m	14,7	28,30	92,5%
300m	18,3	38,7	111,5%
500 m	19,5	42,20	116,4%
1000 m	20 ,90	46,10	120,6%

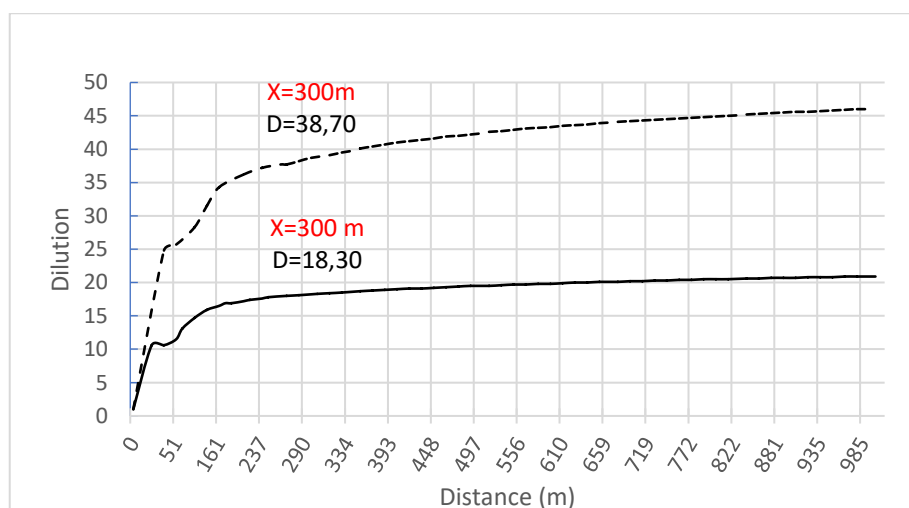


Figure V-26: Comparaison entre la dilution initiale et la dilution finale

L'augmentation de la dilution est remarquable dans les résultats obtenus (figure V-24), Les nouvelles configurations proposées donnent des bons résultats de dilution qu'auparavant.

V.5.4 Décalage du point de rejet

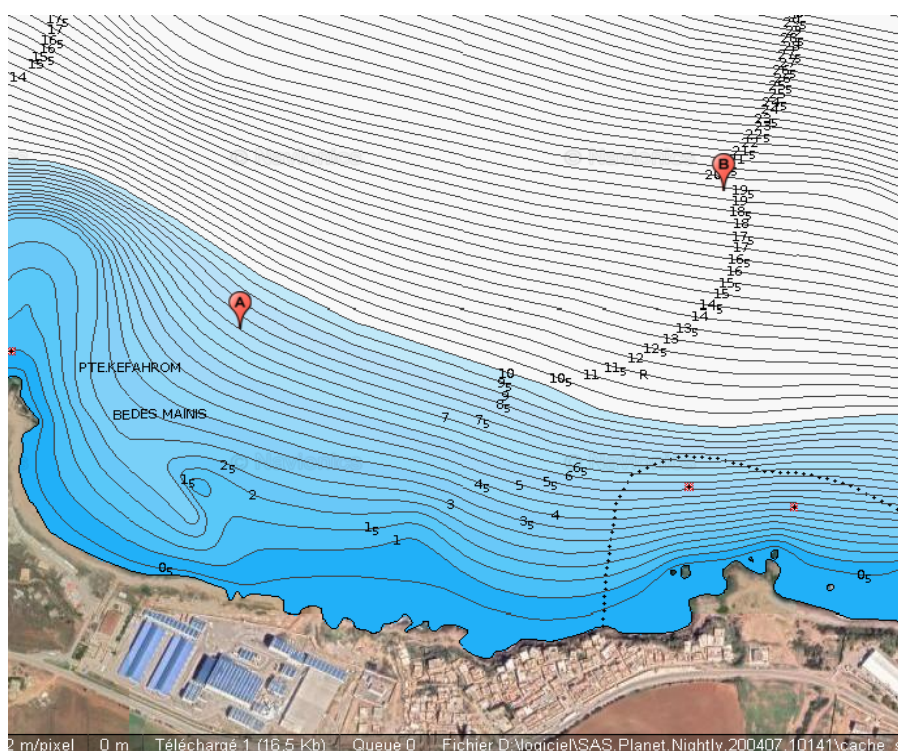
Afin de limiter l'impact environnemental des rejets de saumure sur milieu marin, nous éloignons le point de rejet de la plage et des zones sensibles, et nous choisissons avec précaution la localisation de ce point pour maximiser la dilution des rejets de saumure dans le milieu marin et d'éviter une éventuelle interaction entre les rejets et le point de prise.

Tableau V-10: tableau comparatif entre la position initial et la position proposé :

	État initiale	État proposer
Position (m)	X _{UTM} :341354	X _{UTM} :341931
	Y _{UTM} :4041608	Y _{UTM} :4042114
La distance rejet / captage (m)	290	720
La profondeur au point de rejet (m)	4,5	19
La longueur da la conduite (m)	200	950
Distance au rivage (m)	150	600

On propose le déplacement du point de rejet de saumure de la position A au position B selon coordonnées citées dans le tableau ci-dessus (tableau V-10) comme il est montré sur la figure 20, cette position permet de :

- Éviter l'effet de l'interaction entre les eaux de rejet et celles de captage
- Le bon fonctionnement de diffuseur vu la profondeur adéquate
- La dispersion de panache se faite loin de la plage (figure V-25)



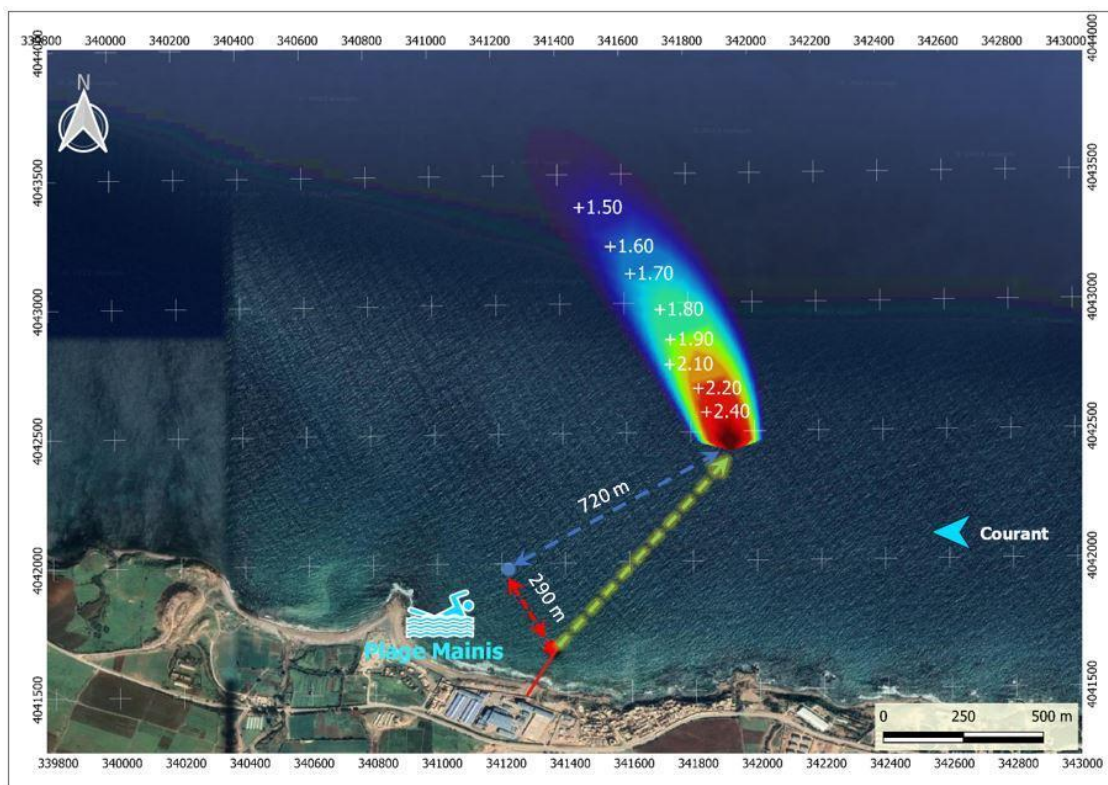


Figure V-28: Présentation des résultats de simulation de CORMIX sur SIG

V.5.5 La station de Megtaa :

Avec la mise en avant du diagnostic de la station de dessalement de MAINIS et la proposition d'une configuration optimale pour améliorer ses performances, notre étude se tourne désormais vers la station de MEGTAA. Cette transition permettra de comparer et d'analyser les stratégies potentielles pour optimiser son fonctionnement, contribuant ainsi à renforcer l'efficacité des infrastructures de désalinisation en Algérie

Tableau V-11: Données d'entrée pour les simulations de CORMIX

Caractéristiques de l'effluent :	
Débit maximal de rejet (m ³ /s)	8.31
Salinité (g/l)	62.60
Accroissement de salinité	25.6
Densité (19.5°C)	1046
Caractéristiques du milieu récepteur :	
Salinité (g/l)	37
Densité (19.5°C)	1026.29
Vitesse du vent (m/s)	2 – 8
Vitesse du courant (m/s)	0.02 – 2

Caractéristiques du diffuseur :	
Type de d'émissaire	Diffuseur multiports
Distance par rapport à la côte (m)	600
Profondeur au point de versement (m) :	8
Longueur de la section du diffuseur (m)	120
Nombre de ports	60
Hauteur du diffuseur (m)	0.6
Distance entre ports du diffuseurs(m)	2
Diamètre des ports (m)	0.15
Vitesse de sortie de rejet (de jet) (m/s)	7.8
Angle de décharge (C°)	45
Distance au rivage (captage) (m)	500

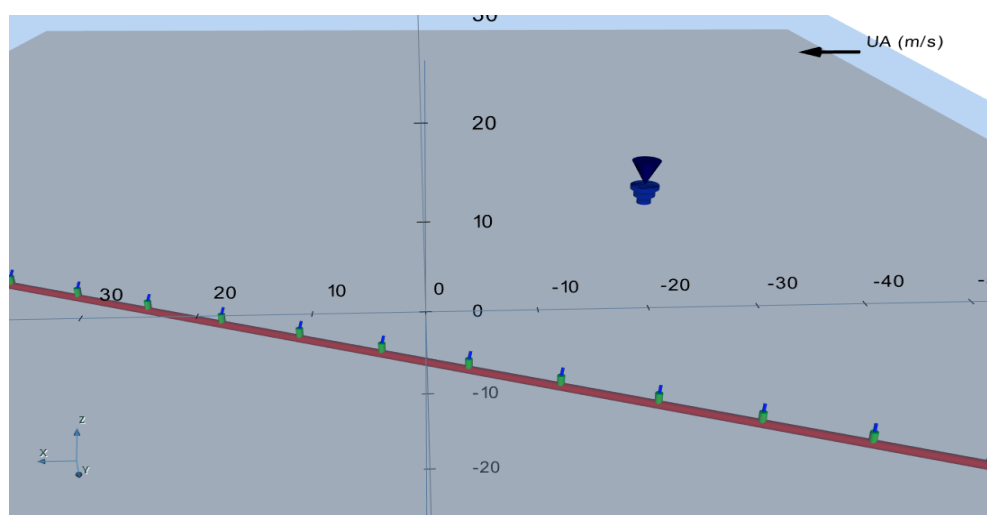


Figure V-29: Diffuseur de la station de Magtaa en 3D

Les émissaires en mer doivent assurer la dispersion et la dilution de ces effluents sans compromettre la qualité des eaux côtières à une profondeur et une distance de la côte suffisantes pour faciliter leur dilution. L'enjeu primordial est de garantir la qualité des eaux de baignade et de préserver l'environnement marin.

D'après le tableau V-11 il est clairement remarquable la différence entre les caractéristiques de ces deux stations, la station de Magtaa est dotée par un émissaire sous-marin de type diffuseur multiport (figure V-27) , elle est caractérisée par le nombre important des ports (60) ,Un rejet profond (8m) (figure V-28),Un diffuseur plus long (120 m), Ce qui est bon pour la dilution, en outre le débit important de la station de Magtaa ($8,31 \text{ m}^3/\text{s}$) nécessite un dispositif de rejet plus performant afin d'assurer la dilution de volume important de rejet de saumure dans cette zone.

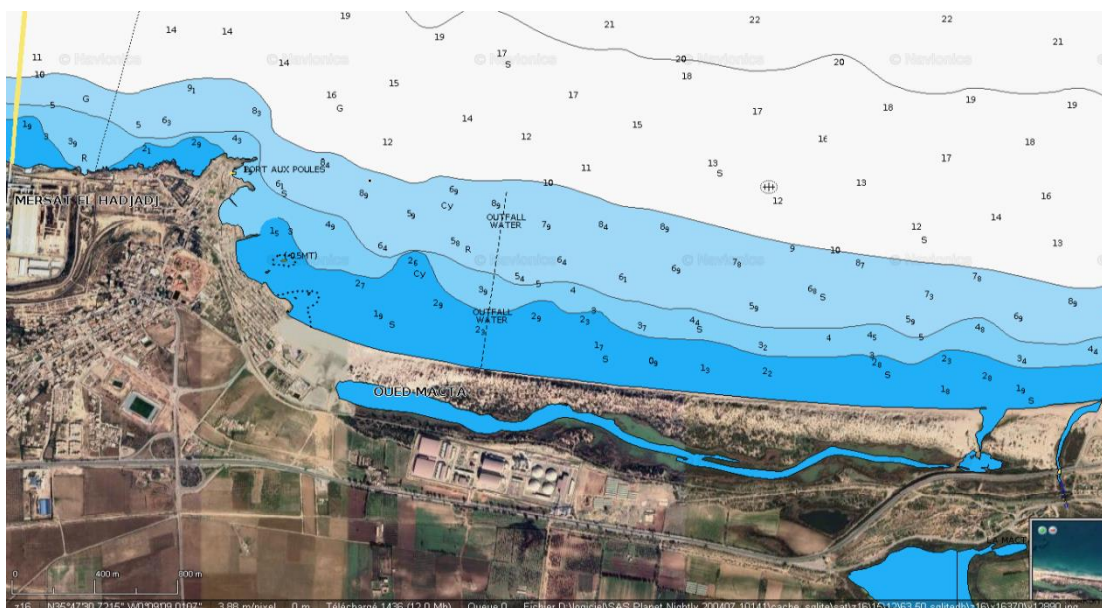


Figure V-30: carte levé bathymétrique de la conduite de rejet de Magtaa

V.5.5.1 Résultat et discussion

Pour évaluer techniquement l’efficacité de dilution des diffuseurs de ses deux stations de dessalement un diagnostic a été fait suite à des simulations des rejets de saumure sur CORMIX GT 11.0.

Le graphique (figure V-29) ci-dessus présente les résultats de la simulation de la variation de la concentration au cours de la distance parcourue pour les deux stations de dessalement sur CORMIX, sachant que les mêmes vitesses environnementales de courant (0,065m/s) et de vent (3,5 m/s) ont été maintenues dans les scénarios des simulations.

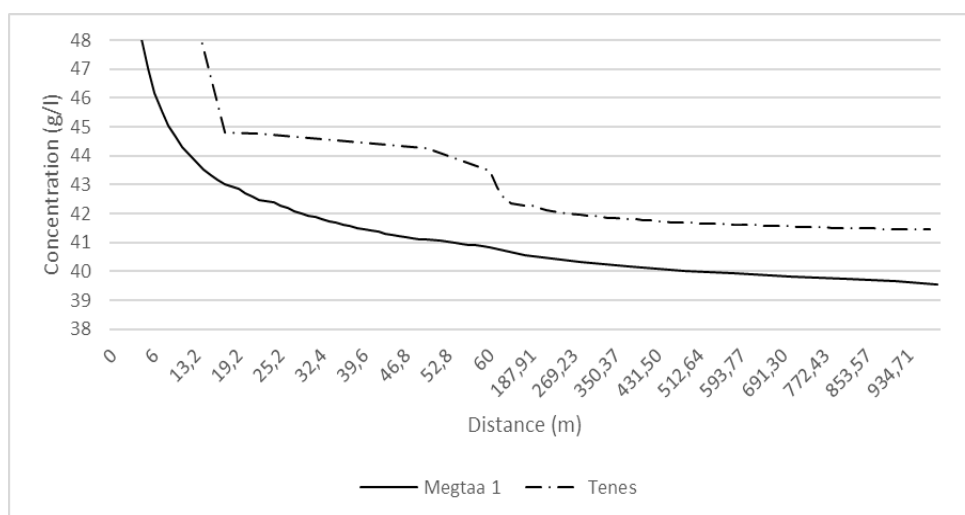


Figure V-31: Graphiques comparatif des concentrations (Ténès et Magtaa)

Selon les résultats de simulation de la station Magtaa la saumure touche le fond marin après une distance parcouru de 40 m avec une salinité de 41,41 g/l dans un temps T de 1,38 minutes, Selon les normes la concentration tolérée ne doit pas dépassé 39,9 g/l (+5% de la concentration ambiante) dans un rayon de 300m (Thomas M, et al., 2015), pour le cas de la

station Magtaa la salinité après 300 m de distance parcouru étai 40,2 g/l ce qui dépasse légèrement les norme (+0,7%), ses résultats restent satisfaisants.

V.5.5.2 Modifications et configuration alternative :

Les résultats de la dilution obtenue dans les simulations de la station de Magtaa dépassent légèrement les normes de rejet en mer, une petite intervention sur ce diffuseur au niveau de la distance entre les ports ça peut faire la différence puisque cette distance influe sur le fonctionnement de diffuseur et donc sur la dilution. (Roberts, 2015)

Le graphe ci-dessus (figure V-32) présente les résultats des simulations pour 3 scénarios, la variable mise en jeu dans ce contexte est la distance entre les ports tout en conservant les mêmes paramètres météorologiques telle qu'il est indiqué dans le tableau :

Tableau V-12: changement de distance entre les ports

Scénario	1	2	3
Courant (m/s)	0,065		
Vent (m/s)	3,5		
Profondeur (m)	8		
Distance entre les ports (m)	2,03	4,14	5.17
Longueur du diffuseur (m)	120	120	150
Nombre de port	60	30	30
Vitesse de jet (m/s)	7.837	15.67	15.67

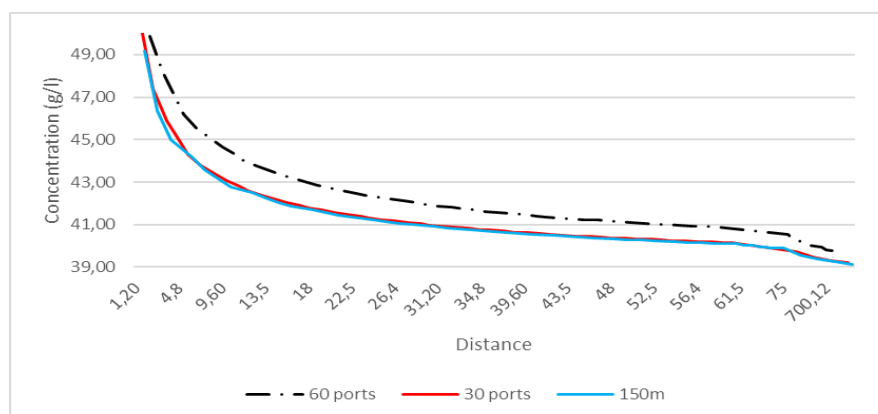


Figure V-32: Graphique des concentrations (changement distance entre ports)

Nous préconisons le scénario N°2 qui sert à augmenter la distance entre les ports en éliminant un port et en gardant l'autre, finalement nous aurons 30 ports avec la même longueur de diffuseur et une distance entre les ports de 4,14 m au lieu de 2,03 m (figure V-31), la salinité après 300m réduit de 40,2 g/l a 39,5 g/l , les normes donc sont assurées, Cette proposition permet d'augmenter la distance entre les ports sans allonger la longueur du diffuseur existant, ce qui minimise le coût de l'opération.

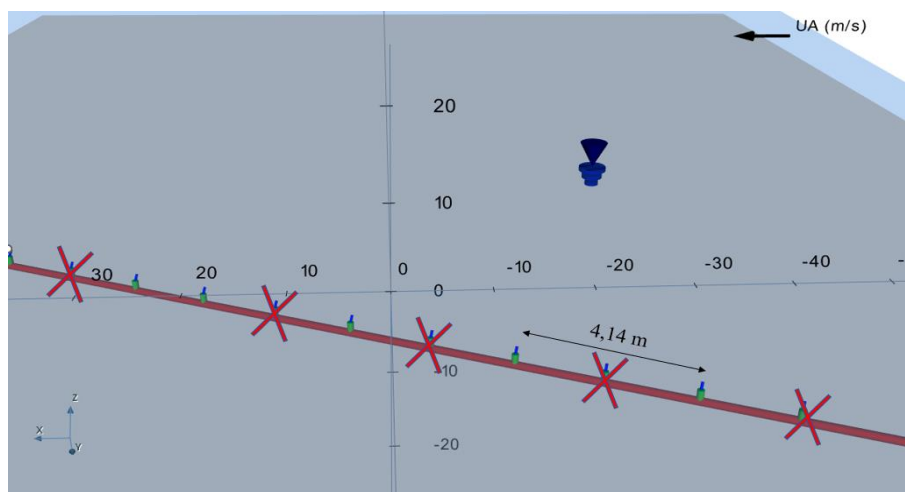


Figure V-33: Augmentation de distance entre les ports.

V.6 Dimensionnement des ouvrages de dilution

V.6.1 Présentation de zone d'étude

La station de dessalement d'El Marsa située à Ain Taya, wilaya d'Alger. Cette station est très importante car elle répond au besoin urgent d'approvisionnement en eau douce de la région. Avec une capacité de production de 60 000 m³/jour. L'objectif de cette partie était d'explorer des stratégies de gestion durable de la saumure produite lors du dessalement, on étudiera la possibilité de dilution de l'eau de mer comme solution viable.

V.6.2 Canal trapézoïdal à surface libre

Dans cette partie nous suggérons d'utiliser la dilution avec de l'eau de mer comme moyen avant le rejeter la saumure. Pour ce faire, on va dimensionner deux ouvrages qui permettent la dilution de saumure avec l'eau de mer, à savoir :

- Canal Trapézoïdal à surface libre
- Bassin de dilution

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

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

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

38 → 100%

X → 10%

Donc :

- $X = 3.5$

Ainsi la concentration du rejet après la dilution est :

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

Le débit d'eau Le débit total est : $Q_{tot} = 649521 \text{ m}^3/\text{j}$

V.6.3 Le dimensionnement du canal

Pour dimensionner le canal, on va suivre l'équation de Manning Strickler. Cette méthode consiste à calculer les dimensions du canal afin d'assurer un certain débit et une certaine vitesse.

Tableau V-13: Calcul du canal II

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

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

V.6.4 Système de pompage

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

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

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

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

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

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

En résumé :

Tableau V-14:Données du choix de la pompe

HMT (m)	Hg (m)	Q (m^3/s)
22	20	3.33

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

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

V.6.5 Choix des pompes

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

D'après ces outils et les données mentionnées dans le tableau V-17, le choix le plus économique était, la pompe **KSB KWP** avec 01 pompe en service et 01 pompe en réserve (stand-by) avec les caractéristiques suivantes :

Tableau V-15:Caractéristique de la pompe

Pompe	Rendement (%)	NPSH requis (m)	Puissance absorbée (kW)	Diamètre effectif (mm)	Débit (m ³ /h)
KSB KWP	91.40%	8.41	808.10	1114	11989.83

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

- **Conclusion :**

Pour conclure cette variante, on a dimensionné le canal trapézoïdal en utilisant la méthode Manning-Strickler. Cette méthode a permis de déterminer les dimensions optimales du canal, soit une largeur d'environ 3 mètres et une hauteur de 1 mètre. Afin de favoriser un mélange efficace de la saumure et de l'eau de mer, de petits obstacles seront placés au fond du canal pour créer une zone turbulente. De plus, afin de transporter l'eau de mer jusqu'au canal, un système de pompage d'une hauteur manométrique totale de 22 m a été conçu.

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

V.6.6 Bassin de dilution

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

- **Écoulement Gravitaire de l'Eau de Mer :** En plaçant le bassin en dessous du niveau de la mer, on exploite la gravité pour permettre à l'eau de mer d'entrer dans le bassin de manière naturelle et sans besoin de pompes. Cela réduit la consommation d'énergie et les coûts associés.
- **Dilution Naturelle de la Saumure :** La saumure arrive au bassin de la même manière, par écoulement gravitaire depuis la sortie de la conduite. Cette configuration nous permet de profiter de la différence de densité entre la saumure et l'eau de mer, ce qui favorise la dilution naturelle de la saumure dans l'environnement

marin. Cela contribue à minimiser les impacts environnementaux en évitant la création d'une zone de concentration élevée de saumure.

- **Simplicité et Fiabilité** : En évitant l'utilisation de pompes pour le transfert de l'eau de mer et de la saumure, nous réduisons la complexité du système. Moins de composants mécaniques signifient également moins de maintenance et moins de risques de défaillance.
- **Économie d'Énergie** : La gravité est une source d'énergie gratuite et renouvelable. En utilisant l'écoulement gravitaire, nous minimisons la consommation d'énergie du système, ce qui réduit les coûts opérationnels à long terme.

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

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

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

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

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

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

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

V.6.7 Dimensionnement du bassin

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

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

Tableau V-16: Caractéristique du bassin

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

V.6.8 Dimensionnement du déversoir

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

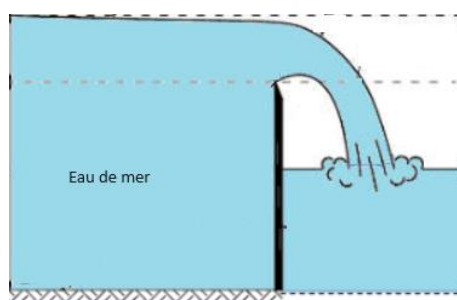


Figure V-34:Schéma simplifié du déversoir

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

de la gestion. Cette approche élimine la nécessité de calculs itératifs complexes, simplifiant ainsi notre projet tout en répondant à nos besoins en termes de débit souhaité.

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

Tableau V-17:Caractéristique du deversoir

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

V.6.9 Système de pompage

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

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

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

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

Tableau V-18:Caractéristiques du choix de la pompe

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

V.6.10 Choix des pompes :

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

Tableau V-19:Caractéristiques de la pompe KWP K

Pompe	Rendement (%)	NPSH requis (m)	Puissance absorbée (kW)	Diamètre effectif (mm)	Débit (m ³ /h)
KSB KWP	89.32	6.53	480.79	1079	9021.74

- **Troisième Option de Dilution :**

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

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

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

Au niveau du regard de jonction, la saumure gravitaire provenant de la station et l'eau de mer pompée se rencontrent. C'est à ce moment précis que la dilution se produit. Pour assurer un mélange efficace et une dilution optimale, des dispositifs de mélanges tels que des chicanes peuvent être installés au point de rencontre dans le regard de jonction. Ces dispositifs créent des zones de turbulence qui favorisent le mélange entre la saumure et l'eau de mer.

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

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

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

V.7 Conclusion :

Dans cette étude, nous avons utilisé une approche de simulation pour évaluer les impacts des rejets de saumures sur l'environnement. Les résultats ont montré que les rejets de saumures peuvent avoir des effets significatifs sur la qualité de l'eau, la biodiversité marine et les activités économiques telles que la pêche et le tourisme. Cependant, l'utilisation de technologies de dessalement plus efficaces et des stratégies de gestion des rejets de saumures appropriées peuvent contribuer à minimiser ces impacts.

Les modèles de simulation utilisés dans cette étude ont fourni des informations importantes pour comprendre les processus de dispersion et de dilution des rejets de saumures dans l'environnement marin. Ces modèles peuvent également être utilisés pour évaluer les impacts potentiels de différentes options de gestion des rejets de saumures, ce qui est utile pour prendre des décisions éclairées en matière de gestion environnementale.

En conclusion, la simulation est une méthode efficace pour évaluer les impacts des rejets de saumures et pour tester différentes options de gestion. Cependant, il est important de prendre en compte les limites et les incertitudes associées aux modèles de simulation, ainsi que les spécificités des écosystèmes marins locaux lors de l'application des résultats de simulation pour la gestion environnementale.

Chapitre VI :

***Durabilité du Dessalement - Une Approche
Durable et Sécurisée***

Chapitre VI: Durabilité du Dessalement - Une Approche Durable et Sécurisée

VI.1 Introduction

La raréfaction croissante des ressources en eau à l'échelle mondiale a fait du dessalement une solution incontournable pour répondre aux besoins croissants en eau douce. Cependant, cette transition vers le dessalement doit s'opérer de manière durable, minimisant les impacts environnementaux et assurant une sécurité opérationnelle. Ce chapitre se penche sur la question cruciale de la durabilité du dessalement, en mettant l'accent sur la mise en place de procédures à la fois durables et sécurisées.

Le dessalement, qu'il soit basé sur des technologies de distillation, d'osmose inverse ou d'autres méthodes novatrices, a émergé comme un pilier essentiel pour répondre aux défis de la pénurie d'eau. Cependant, la croissance rapide de cette industrie suscite des préoccupations quant à ses implications environnementales et opérationnelles. Cette dynamique souligne l'impératif de repenser la manière dont nous concevons, mettons en œuvre et gérons les installations de dessalement.

L'objectif principal de ce chapitre est d'analyser les différentes dimensions de la durabilité du dessalement, en examinant les facteurs environnementaux, énergétiques et opérationnels. À travers cette exploration, nous chercherons à identifier les meilleures pratiques et les technologies émergentes qui peuvent contribuer à rendre le dessalement plus durable tout en garantissant sa sécurité opérationnelle.

Alors que le dessalement offre une réponse à court terme aux besoins en eau, son intégration durable dans les politiques de gestion de l'eau nécessite une évaluation approfondie des impacts associés. Cette étude vise à combler les lacunes actuelles dans la compréhension de la durabilité du dessalement, offrant ainsi des insights cruciaux pour les décideurs, les chercheurs et les praticiens impliqués dans cette discipline.

Ce chapitre est organisé en plusieurs sections afin de fournir une analyse approfondie de la durabilité du dessalement. La première section établira le cadre théorique et contextualisera le sujet, tandis que la deuxième section se concentrera sur les facteurs de durabilité et de sécurité. La troisième section explorera les approches innovantes et les technologies durables, la conclusion synthétisera les résultats et formulera des recommandations pour guider les pratiques futures dans le domaine.

VI.2 Cadre Théorique et Contexte

Pour structurer notre analyse, il est essentiel d'établir un cadre conceptuel clair. Nous définirons les principaux termes liés à la durabilité du dessalement, y compris les dimensions environnementales, énergétiques et opérationnelles. Ce cadre conceptuel servira de base pour évaluer et comparer les différentes approches examinées dans les sections suivantes.

La durabilité du dessalement peut être abordée à travers trois dimensions interdépendantes : environnementale, énergétique et opérationnelle. Chaque dimension influence le potentiel global du dessalement à répondre aux besoins en eau tout en minimisant son empreinte écologique et en garantissant une sécurité opérationnelle optimale.

En établissant ce cadre théorique, nous posons les fondements nécessaires pour une analyse approfondie de la durabilité du dessalement. Les sections suivantes exploreront chacune de ces dimensions, offrant ainsi une vision holistique des meilleures pratiques et des innovations nécessaires pour rendre le dessalement non seulement viable mais également bénéfique pour notre environnement et nos sociétés.

VI.3 Facteurs de Durabilité et de Sécurité

VI.3.1 Impact Environnemental

L'impact environnemental du dessalement est au cœur des préoccupations, nécessitant une évaluation détaillée des conséquences écologiques de ces installations. Cela englobe les effets sur les écosystèmes marins, la qualité de l'eau à proximité des prises et rejets, ainsi que la biodiversité. Notre analyse vise à explorer les meilleures pratiques environnementales, y compris les technologies qui minimisent l'empreinte écologique et les méthodes de suivi et de gestion des impacts.

Les recherches précédentes (Missimer et al., 2015) ont souligné l'impact du dessalement sur les écosystèmes marins et les défis liés à la dispersion des concentrés salins. Notre exploration se concentrera sur les approches novatrices pour atténuer ces effets, intégrant des technologies écologiquement responsables et des protocoles de gestion des résidus qui respectent les écosystèmes locaux.

VI.3.2 Consommation Énergétique

La consommation énergétique dans les installations de dessalement demeure une préoccupation majeure, nécessitant une analyse approfondie des sources potentielles d'efficacité énergétique et des solutions pour intégrer les énergies renouvelables. Nous

explorerons cette dimension en nous appuyant sur des cas réels afin d'illustrer les défis et les avancées dans la réduction de la dépendance aux énergies non renouvelables.

- **État de la Consommation Énergétique dans les Installations de Dessalement :**

Pour comprendre la portée de la consommation énergétique, examinons quelques exemples concrets. L'usine de Dessalement de Carlsbad, en Californie, par exemple, utilise la technologie d'osmose inverse et a mis en œuvre des pompes à haute efficacité énergétique pour réduire la consommation d'énergie. Cette initiative souligne l'importance de l'adoption de technologies avancées pour optimiser les processus de Dessalement.

- **Intégration des Énergies Renouvelables**

Plusieurs installations de Dessalement ont commencé à explorer l'intégration d'énergies renouvelables.

2. Projet Pilote à Perth, Australie

L'usine de Dessalement de Perth, en Australie (Radcliffe & Page, 2020), est un exemple notable. Elle a mis en œuvre un système de microgrid alimenté par l'énergie solaire pour alimenter une partie de ses opérations. Cette démarche illustre comment les énergies renouvelables peuvent jouer un rôle crucial dans la réduction de l'empreinte carbone du Dessalement.

1. Dessalement Solaire à Al Khafji, Arabie Saoudite

La station de Dessalement d'Al Khafji en Arabie Saoudite est l'un des plus grands projets au monde alimenté par l'énergie solaire, visant à produire 60 000 m³ d'eau potable par jour. Ce projet utilise des panneaux solaires photovoltaïques pour minimiser sa dépendance aux combustibles fossiles, illustrant l'efficacité de l'énergie solaire dans les grandes installations de Dessalement.

3. Dessalement Éolien à Masdar City, Émirats Arabes Unis

Masdar City a lancé un projet pilote de Dessalement éolien, utilisant l'énergie éolienne pour alimenter une installation de Dessalement par osmose inverse. Ce projet témoigne de la viabilité des énergies renouvelables, même dans des régions où le solaire n'est pas la seule option viable.

- **Les avantages d'énergies renouvelables par rapport aux méthodes traditionnelles**

Les stations de Dessalement alimentées par des énergies renouvelables présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes traditionnelles :

1. Durabilité environnementale : Les énergies renouvelables utilisées pour la désalinisation, telles que l'énergie solaire et éolienne, sont des sources d'énergie propre qui ne produisent pas de gaz à effet de serre ni de pollution atmosphérique. Cela

- contribue à réduire l'empreinte carbone de la désalinisation et à préserver l'environnement.
2. Coûts réduits : Les technologies de désalinisation alimentées par des énergies renouvelables ont le potentiel de réduire les coûts de production d'eau douce par rapport aux méthodes traditionnelles. Bien que les coûts initiaux puissent être élevés, les améliorations technologiques, les effets d'apprentissage et l'augmentation de l'échelle de production devraient permettre de réduire les coûts à l'avenir.
 3. Disponibilité des ressources : Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne, sont disponibles dans de nombreuses régions du monde. Cela signifie que la désalinisation alimentée par des énergies renouvelables peut être mise en œuvre dans des endroits où les ressources en eau douce sont rares ou insuffisantes.
 4. Gestion des déchets : Les méthodes traditionnelles de désalinisation produisent une grande quantité de saumure, qui est un sous-produit concentré de l'eau salée. La gestion de cette saumure peut être un défi environnemental. Cependant, le document mentionne une solution innovante appelée le système SOL-BRINE, qui permet une gestion efficace de la saumure en récupérant des produits utiles et en réduisant les impacts environnementaux. (Xevgenos et al., 2016)

En résumé, la désalinisation alimentée par des énergies renouvelables offre des avantages tels que la durabilité environnementale, des coûts réduits, une disponibilité des ressources et une meilleure gestion des déchets par rapport aux méthodes traditionnelles de désalinisation.

- **Évolution des Technologies pour Réduire la Consommation Énergétique**

Des avancées technologiques telles que l'utilisation de membranes à faible consommation énergétique dans les processus d'osmose inverse ont considérablement amélioré l'efficacité énergétique des installations de dessalement. L'usine de dessalement de Sorek en Paléστine (Faigon, 2016), en adoptant ces nouvelles technologies, a réussi à réduire significativement sa consommation d'énergie par unité d'eau produite.

L'usine de dessalement d'eau de mer Barka II à Oman utilise des technologies avancées d'osmose inverse. Cette installation, conçue et exploitée par SUEZ, met en œuvre des membranes d'osmose inverse dans un système double-passe pour optimiser la production d'eau potable. Cette approche illustre comment les innovations en matière de membranes peuvent améliorer l'efficacité et réduire l'impact environnemental du dessalement. (Purnama et al., 2011)

La distillation, une autre méthode de dessalement, repose sur l'évaporation et la condensation de l'eau. L'efficacité de ces systèmes peut être améliorée par l'utilisation de sources de chaleur à bas coût ou la récupération de chaleur des processus industriels. Les technologies telles que la distillation multi-effets (MED) et la compression de vapeur mécanique (MVC) sont optimisées pour utiliser moins d'énergie par unité d'eau produite. La recherche dans ce domaine vise à améliorer l'échange thermique et à réduire les pertes d'énergie.

VI.3.3 Gestion des Résidus

La gestion des résidus, en particulier des concentrés salins, représente une composante critique de la durabilité du dessalement. Cette section examine diverses méthodes de traitement et d'élimination, mettant l'accent sur des approches qui minimisent les impacts environnementaux.

La gestion des résidus du dessalement s'est transformée au fil des ans, passant d'une nécessité de mitigation environnementale à une opportunité de valorisation économique et écologique. La recherche et le développement dans ce domaine ont abouti à l'émergence de plusieurs technologies prometteuses :

VI.3.3.1 Extraction de Minéraux

L'extraction de minéraux à partir des résidus de dessalement, en particulier de la saumure, est un domaine de recherche et de développement qui gagne en importance à mesure que la demande mondiale pour des minéraux critiques augmente. Cette section approfondit le processus, les défis, et les avantages associés à cette technologie de valorisation.

La saumure issue des processus de dessalement est riche en minéraux dissous tels que le magnésium, le calcium, le potassium, le lithium, et d'autres éléments trace. L'extraction de ces minéraux repose sur différents procédés physico-chimiques capables de séparer et de concentrer les composés d'intérêt à partir de mélanges complexes.

- La station de dessalement d'Al Khafji en Arabie Saoudite valorise les résidus de saumure en utilisant des bassins d'évaporation solaire, un processus de cristallisation pour récupérer des sels comme le chlorure de sodium et le sulfate de magnésium, ainsi que des méthodes chimiques pour extraire des minéraux tels que le calcium et le lithium.
- Extraction de Lithium dans les Andes (Chili et Argentine) : Bien que principalement associée à l'extraction de lithium des salars, la technologie d'extraction à partir de saumures est également pertinente pour les saumures de dessalement. Les processus

d'évaporation solaire et d'extraction chimique permettent de récupérer le lithium utilisé dans les batteries pour véhicules électriques et autres applications de stockage d'énergie.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour l'extraction de minéraux à partir de la saumure, chacune présentant des avantages et des inconvénients spécifiques :

- **Précipitation chimique** : Ce procédé implique l'ajout de réactifs chimiques pour induire la formation de solides à partir des ions en solution, qui peuvent ensuite être séparés par filtration ou décantation. C'est une méthode couramment utilisée pour le magnésium et le calcium.
- **Électrodialyse et électrolyse** : Ces technologies utilisent des courants électriques pour provoquer le déplacement des ions à travers des membranes, permettant la séparation et la concentration des minéraux. Elles sont particulièrement intéressantes pour l'extraction de métaux de grande valeur comme le lithium.
- **Nanofiltration et osmose inverse** : Bien que principalement utilisées pour des applications de purification de l'eau, ces méthodes de filtration membranaire peuvent également être adaptées pour récupérer certains minéraux spécifiques.

VI.3.3.1.1 Avantages de l'Extraction de Minéraux

- **Réduction des déchets** : En valorisant la saumure, cette approche contribue à réduire le volume total de résidus à gérer, atténuant ainsi les impacts environnementaux associés à leur élimination.
- **Sécurité d'approvisionnement** : L'extraction de minéraux à partir de la saumure peut contribuer à sécuriser l'approvisionnement en ressources critiques, en diversifiant les sources d'extraction hors des méthodes d'exploitation minière traditionnelles.
- **Viabilité économique** : La commercialisation des minéraux extraits peut offrir une source de revenus additionnelle pour les opérateurs de dessalement, améliorant ainsi la rentabilité globale des installations.

VI.3.3.1.2 Défis et Perspectives

- **Coûts opérationnels** : Les technologies d'extraction nécessitent souvent d'importants investissements initiaux et peuvent entraîner des coûts opérationnels élevés, en particulier pour l'énergie et les réactifs chimiques.
- **Gestion des impuretés** : La présence d'impuretés dans la saumure peut compliquer l'extraction et la purification des minéraux, nécessitant des étapes supplémentaires de traitement.

- **Impact environnemental** : Bien que l'extraction de minéraux puisse réduire le volume de saumure à éliminer, elle génère également des déchets solides et liquides qui doivent être gérés de manière responsable.

VI.3.3.2 Récupération de Métaux

Les concentrés salins peuvent également contenir des métaux précieux ou stratégiques. Des techniques d'extraction sélective, telles que l'électrodéposition, peuvent être explorées pour récupérer ces métaux, offrant une alternative à l'extraction minière traditionnelle.

- **Projet d'Extraction de Lithium de saumure de dessalement (États-Unis)** : Aux États-Unis, certaines initiatives visent à extraire le lithium des saumures produites par les installations de dessalement, notamment en Californie. Ces projets sont en phase de recherche et développement, avec l'objectif d'exploiter la concentration relativement élevée de lithium dans certaines saumures pour répondre à la demande croissante de ce métal.
- **Récupération de l'Uranium à partir des eaux de dessalement (Inde)** : Le Bhabha Atomic Research Centre en Inde a développé une technologie permettant de récupérer l'uranium des eaux de mer en utilisant une résine absorbante. Bien que ce processus soit principalement envisagé pour l'extraction directe à partir de l'eau de mer, des principes similaires peuvent être appliqués aux saumures de dessalement, offrant une source supplémentaire d'uranium pour l'énergie nucléaire.

Les techniques de Récupération sont :

- **Adsorption** : Utilise des matériaux adsorbants, tels que des charbons actifs ou des résines spécifiques, pour capturer sélectivement les ions métalliques présents dans la saumure. Les métaux sont ensuite élus de l'adsorbant et récupérés sous forme concentrée.
- **Échange ionique** : Similaire à l'adsorption, cette méthode emploie des résines d'échange ionique pour retirer sélectivement les métaux de la saumure. Elle est particulièrement adaptée pour les métaux à forte valeur ajoutée.
- **Extraction par solvant** : Implique l'utilisation de solvants organiques pour extraire sélectivement les métaux de la phase aqueuse. Cette technique est souvent utilisée pour la récupération de métaux spécifiques, tels que le lithium.

Les avantages de cette technique :

- Valorisation des éléments traces métalliques présents dans les résidus de dessalement, Réduction de l'impact environnemental associé à l'élimination des saumures concentrées.

- Apport d'une contribution significative à l'approvisionnement en métaux critiques pour la technologie et l'industrie.

VI.3.3.3 Production d'Énergie

Certaines technologies de valorisation visent à exploiter l'énergie potentielle des concentrés salins. Des processus tels que la pressurisation osmotique ou l'électrodialyse peuvent être utilisés pour générer de l'électricité à partir de la différence de salinité entre les concentrés salins et l'eau de mer environnante.

Comme le plant de Dessalement et Production d'Énergie (Norvège) : La Norvège a mis en place une installation pilote combinant le dessalement et la production d'énergie grâce à la technologie de la pression osmotique inverse (PRO).

En exploitant le gradient de salinité entre la saumure de dessalement et l'eau de mer, l'installation génère de l'énergie renouvelable, illustrant le potentiel d'intégration de la production d'énergie dans les processus de dessalement.

VI.3.3.4 Agriculture et Aquaculture

Les concentrés salins traités peuvent être utilisés de manière bénéfique dans l'agriculture et l'aquaculture. L'irrigation avec des concentrés salins dilués peut être adaptée à certaines cultures, tandis que les nutriments contenus dans les résidus peuvent être exploités pour des applications agricoles ou aquacoles spécifiques.

La saumure contient des niveaux élevés de magnésium et de calcium, qui peuvent être bénéfiques pour certains types de sols, en améliorant leur structure et en augmentant leur capacité à retenir l'eau. Certaines plantes, dites halophytes, sont naturellement tolérantes au sel et peuvent être cultivées efficacement avec de l'eau saumâtre. Ces plantes offrent des opportunités pour la production de biomasse, de fourrage, et même de nourriture.

L'aquaculture utilise la saumure diluée pour élever des espèces marines, telles que les poissons, les crustacés, et les algues. L'intégration de l'aquaculture avec le dessalement, souvent désignée sous le terme d'aquaponie saline, permet de recycler efficacement la saumure tout en produisant des ressources alimentaires de valeur.

Les bassins d'aquaculture peuvent être directement alimentés avec de la saumure diluée pour élever des espèces tolérantes au sel, comme certaines espèces de poissons (tilapia) ou de crustacés.

La saumure peut fournir un milieu de culture idéal pour certaines algues marines, qui sont valorisées pour leur rôle dans l'alimentation humaine, la production de biocarburants, et comme absorbeurs de CO₂.

Des systèmes aquacoles intégrés, combinant la culture de plantes halophytes et l'élevage d'espèces marines, peuvent créer des écosystèmes productifs qui maximisent l'utilisation des ressources et minimisent les déchets.

VI.3.3.5 Recherche de Nouvelles Applications

La recherche de nouvelles applications pour les résidus de dessalement se concentre sur l'innovation et l'exploration de moyens créatifs pour utiliser la saumure et d'autres sous-produits, au-delà des méthodes traditionnelles. Cette approche vise à transformer les défis environnementaux associés au dessalement en opportunités économiques et écologiques.

La recherche continue de pousser les limites des applications possibles de la saumure et d'autres résidus de dessalement. Cela inclut le développement de nouveaux procédés de traitement et de purification pour rendre la saumure utilisable dans encore plus d'applications industrielles et environnementales.

Les efforts pour trouver de nouvelles utilisations bénéficient de collaborations entre chercheurs en dessalement, ingénieurs environnementaux, biologistes, et spécialistes de l'industrie. Ces collaborations aident à identifier des solutions innovantes qui peuvent être à la fois écologiquement durables et économiquement viables.

VI.3.3.6 Intégration des Meilleures Pratiques

Les meilleures pratiques pour la gestion des résidus évoluent avec les avancées technologiques et les connaissances accrues. L'intégration de systèmes de traitement innovants et de pratiques de gestion responsables devrait être au cœur des opérations de dessalement pour minimiser l'impact sur les écosystèmes environnants.

VI.3.4 Sécurité Opérationnelle

La sécurité opérationnelle des installations de dessalement est un pilier essentiel pour assurer le fonctionnement continu des procédés et la protection des ressources en eau. Cette section se penche sur les protocoles de sécurité existants, identifie les risques potentiels associés aux opérations de dessalement, et explore les meilleures pratiques en matière de sécurité opérationnelle.

- **Protocoles de Sécurité Existants**

Les installations de dessalement mettent en œuvre une série de protocoles de sécurité pour prévenir les incidents et assurer la sûreté des opérations. Cela inclut des procédures de gestion des produits chimiques, des plans d'urgence, et des mesures de protection des travailleurs.

- **Risques Potentiels**

Les opérations de dessalement peuvent être exposées à divers risques, allant des défaillances mécaniques aux événements naturels imprévus. Comprendre ces risques potentiels est impératif pour mettre en place des mesures préventives et des plans d'intervention efficaces.

- **Formation et Sensibilisation**

La formation du personnel est un élément clé de la sécurité opérationnelle. Le personnel doit être compétent dans l'utilisation des équipements, la gestion des urgences, et la mise en œuvre des protocoles de sécurité. La sensibilisation continue contribue à maintenir un niveau élevé de vigilance.

- **Maintenance Préventive**

La maintenance préventive des équipements joue un rôle crucial dans la sécurité opérationnelle. Un programme rigoureux de maintenance préventive permet de détecter et de corriger les défaillances potentielles avant qu'elles ne deviennent des problèmes critiques.

- **Évaluation des Performances en Temps Réel**

L'évaluation en temps réel des performances des installations de dessalement permet de détecter rapidement tout écart par rapport aux normes de sécurité. Les systèmes de surveillance avancés et les capteurs automatisés contribuent à une gestion proactive des risques.

- **Amélioration Continue**

L'amélioration continue des protocoles de sécurité est une composante essentielle de la sécurité opérationnelle. L'analyse des incidents, la rétroaction du personnel, et l'incorporation des leçons apprises contribuent à renforcer constamment la sécurité des opérations.

VI.4 Approches Innovantes et Technologies Durables

Dans cette section, nous explorerons les avancées technologiques et les approches innovantes qui contribuent à rendre le dessalement plus durable. En mettant l'accent sur les solutions émergentes, nous examinerons comment ces technologies peuvent améliorer l'efficacité énergétique, réduire l'impact environnemental et renforcer la sécurité opérationnelle des installations de dessalement.

VI.4.1 Technologies d'Osmose Inverse de Nouvelle Génération

Les progrès dans les membranes d'osmose inverse ont considérablement amélioré l'efficacité énergétique du dessalement. Les membranes plus performantes permettent une

séparation plus efficace des sels, réduisant ainsi la pression nécessaire pour le processus d'osmose inverse. Cette évolution contribue à diminuer la consommation énergétique globale des installations de dessalement.

VI.4.2 Dessalement Assisté par Énergie Solaire

L'intégration de l'énergie solaire dans le dessalement offre une voie vers la durabilité énergétique. Les technologies de dessalement assisté par énergie solaire utilisent la chaleur solaire pour alimenter les processus de dessalement, réduisant ainsi la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles et limitant les émissions de carbone.

AquaSolar Maroc : Cette station de dessalement d'eau mobile et modulaire fonctionne à l'aide de l'énergie solaire thermique et photovoltaïque. Le projet, lancé en 2013, a été développé avec le soutien de l'IRESEN (Institut de recherche en énergie solaire et énergies renouvelables). La station pilote est installée au Green Energy Park de Ben Guerir et est opérationnelle, avec des tests de fonctionnement et de performance en cours. Elle combine deux technologies de dessalement (osmose inverse et distillation membranaire) et deux technologies solaires (photovoltaïque et thermique), ce qui permet d'augmenter le volume d'eau traitée tout en minimisant la quantité de saumure produite.

Desaltec-z1 en Tunisie : Cette station de dessalement utilise l'énergie solaire thermique pour dessaler l'eau d'un puits par le procédé d'osmose inverse. Inaugurée dans l'huilerie Slim à Zarzis, la station a été réalisée par la société Solartech-Sud. Elle a une capacité de 3,1 m³ d'eau par heure avec un rendement supérieur à 73% et réduit le taux de salinité de 90%. Le projet a été conçu par Ahmed Friaa, ancien directeur de l'École nationale des ingénieurs de Tunis, et a été mis en œuvre par sept ingénieurs tunisiens.

Ces projets illustrent l'intégration réussie de technologies de dessalement d'eau innovantes avec l'utilisation d'énergies renouvelables, répondant aux besoins spécifiques des régions confrontées à des défis en matière d'accès à l'eau potable tout en réduisant l'empreinte carbone.

VI.4.3 Techniques d'Électrodialyse

Les techniques d'électrodialyse évoluent pour offrir des alternatives prometteuses dans le dessalement. L'utilisation de membranes électro dialytiques permet un dessalement plus efficace, tandis que des avancées dans les matériaux de membranes contribuent à prolonger leur durée de vie, réduisant ainsi la nécessité de remplacements fréquents.

L'usine de dessalement de Carlsbad illustre l'efficacité de l'électrodialyse inverse (EDI) dans la réduction de la consommation énergétique. En intégrant cette technologie innovante, l'usine a non seulement réduit son empreinte carbone mais a également atteint des

niveaux de productivité élevés, contribuant ainsi à l'approvisionnement durable en eau dans la région.

VI.4.4 Systèmes de Pressurisation Osmotique

Les systèmes de pressurisation osmotique exploitent la différence de salinité entre l'eau de mer et l'eau traitée pour générer de l'énergie. Cette approche novatrice peut contribuer à la production d'électricité tout en réduisant la consommation énergétique globale des installations de dessalement.

VI.4.5 Utilisation de l'Intelligence Artificielle (IA) pour l'Optimisation Opérationnelle

L'intégration de l'intelligence artificielle dans les opérations de dessalement offre des possibilités d'optimisation opérationnelle. Les systèmes basés sur l'IA peuvent analyser en temps réel les données opérationnelles, permettant une gestion plus précise des paramètres et une réduction de la consommation énergétique tout en maintenant la sécurité des opérations.

VI.4.6 Développement de Matériaux Innovants

Le développement de matériaux innovants pour les composants des installations de dessalement joue un rôle crucial dans l'amélioration de la durabilité. Des matériaux résistants à la corrosion, durables et respectueux de l'environnement contribuent à prolonger la durée de vie des installations tout en réduisant les besoins de maintenance.

Conclusion

En conclusion de ce chapitre dédié à la durabilité du dessalement, nous avons exploré en détail des aspects clés liés à la production d'eau douce à partir d'eau de mer. Notre analyse s'est concentrée sur des facteurs essentiels tels que la consommation énergétique, la gestion des résidus, et l'intégration de technologies novatrices.

La consommation énergétique dans le dessalement demeure un défi significatif, mais des progrès prometteurs ont été identifiés grâce à des solutions énergétiquement efficaces, notamment l'électrodialyse inverse et le dessalement à l'énergie solaire. Ces avancées ouvrent la voie à des pratiques plus durables et à une réduction de l'empreinte carbone des installations de dessalement.

La gestion des résidus, bien que mentionnée ici, a fait l'objet d'une analyse approfondie dans un chapitre spécifique de cette thèse. En consacrant une section dédiée à cette dimension cruciale, nous avons pu examiner en détail les pratiques actuelles, les technologies de valorisation émergentes, et les meilleures stratégies pour minimiser l'impact environnemental des concentrés salins issus du dessalement.

Les exemples réels, ont illustré la mise en œuvre réussie de pratiques durables dans le domaine du dessalement. Ces cas concrets renforcent la conviction que des solutions novatrices peuvent être appliquées pour rendre le dessalement plus respectueux de l'environnement et économiquement viable.

En somme, ce chapitre a jeté un regard approfondi sur les aspects clés de la durabilité du dessalement. En mentionnant explicitement que la gestion des résidus a été examinée de manière approfondie dans un chapitre distinct, nous invitons les lecteurs à explorer davantage cette dimension spécifique. Ces résultats contribuent à l'avancement des connaissances dans le domaine du dessalement durable et guideront les futures initiatives visant à rendre cette pratique vitale plus sécurisée et respectueuse de l'environnement.

Conclusion générale

Conclusion générale :

En conclusion, cette étude de modélisation, réalisée à l'aide du logiciel CORMIX axée spécifiquement sur les stations "Mainis" et "Megtaa" en Algérie, a fourni des insights cruciaux sur l'efficacité de dilution et le comportement des systèmes de rejets de ces installations vitales.

Le diagnostic initial du diffuseur de la station "Mainis" dans des conditions météorologiques variées en tenant compte de la position du point de prélèvement d'eau a révélé des lacunes dans sa performance, notamment une inefficacité dans la dilution des rejets de saumure et une interaction défavorable entre les eaux de captage et de rejets, engendrant un excès de concentration de +6 g/l.

Les modifications apportées à la conception du diffuseur, telles que le changement de diamètre et nombre des ports, ont montré des résultats négatifs. Cependant, l'augmentation des distances entre les ports s'est révélée être une solution efficace, améliorant considérablement la performance du diffuseur et réduisant l'excès de concentration au point de captage. Cependant, l'application de cette proposition s'est avérée coûteuse.

L'ajustement de la localisation du point de rejet a émergé comme une alternative prometteuse, évitant l'interaction néfaste entre les eaux de rejet et celles de captage, favorisant un fonctionnement optimal du diffuseur et dispersant le panache de rejet loin de la plage. Les simulations ont permis de déterminer une nouvelle localisation favorable, soulignant l'importance de cette approche pour atténuer les impacts environnementaux.

Le diagnostic de la station "Megtaa" a révélé une performance satisfaisante, mais des améliorations ont été suggérées pour optimiser davantage le diffuseur. La proposition de réduire le nombre de ports tout en maintenant la distance entre eux a été mise en œuvre avec succès, garantissant que les normes de salinité sont respectées sans nécessiter une extension coûteuse du diffuseur existant.

Les résultats ont été visuellement présentés à l'aide de SIG, facilitant la détection des impacts, la surveillance et le suivi du panache de rejet, et à promouvoir une utilisation plus durable des ressources en eau douce et en eau de mer. Toutefois, la dilution de la saumure avant le rejet dans la mer demeure la solution ultime, éliminant définitivement les risques environnementaux.

Orientés vers l'avenir, plusieurs perspectives de recherche émergent de cette étude, offrant des opportunités passionnantes pour approfondir notre compréhension et améliorer davantage la gestion des rejets des stations de dessalement en Algérie.

- Explorer des méthodes novatrices de dilution des rejets en amont du processus de rejet en utilisant des technologies de mélange, et évaluer leur faisabilité ainsi que leur efficacité pour minimiser les risques environnementaux
- Initiatives de recherche pour évaluer les impacts à long terme des rejets de saumure sur les écosystèmes marins et côtiers, en mettant l'accent sur la récupération naturelle et la résilience des communautés biologiques.
- Encourager la collaboration entre différentes disciplines scientifiques, notamment l'écologie, la géographie, l'ingénierie et les sciences environnementales, pour aborder de manière holistique les défis liés aux rejets des SDEM.
- Réaliser des études comparatives avec d'autres stations de dessalement à travers le monde, en analysant différentes approches de gestion des rejets pour identifier les meilleures pratiques et les leçons à tirer.

En somme, cette étude met en exergue l'importance cruciale d'approches intégrées, allant de la modélisation avancée à des recommandations opérationnelles, pour assurer une gestion durable des rejets des SDEM en Algérie et au-delà. Ces résultats et recommandations ont des implications pratiques significatives pour la préservation des écosystèmes marins et des ressources en eau, renforçant ainsi le chemin vers un développement durable.

Références bibliographiques :

- ABUALTAYEF, M., AL-NAJJAR, H., MOGHEIR, Y., & Seif, A. K. (2016). *Numerical modeling of brine disposal from Gaza central seawater desalination plant. Arabian Journal of Geosciences*, 9(10). <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2591-7>
- AMITOUICHE, M. (2016). *Impact des rejets des stations de dessalement sur le milieu récepteur*. Thèse de Doctorat en sciences. Université Mohamed Khider de Biskra - Algérie
- AMITOUICHE, M., Lefkir, A., Remini, B., Sebki, M. S., & Aissaoui, L. (2022). *Diagnosis and improvement of diffuser performance of Fouk Desalination Plant (Algeria). Desalination and Water Treatment*, 255, 94–100. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28325>
- ARAFAT, H. A. (2017). *Desalination sustainability: A technical, socioeconomic, and environmental approach*. pp. 425, ISBN: 978-0-12-809791-5
- BATES, B., KUNDZEWICZ, Z. W., & Wu, S. (2008). *Le changement climatique et l'eau, Document technique VI du GIEC*. pp.228, ISBN : 978-92-9169-223-1
- BAZARGAN, A. (2018). *A Multidisciplinary Introduction to Desalination*. pp: 716, ISBN: 9788793379541
- BELLO, A. S., ZOUARI, N., DA'ANA, D. A., HAHLADAKIS, J. N., & Al-Ghouti, M. A. (2021). *An overview of brine management: Emerging desalination technologies, life cycle assessment, and metal recovery methodologies. Journal of Environmental Management*, 288 (112358) 0301-4797. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112358>
- BENMOUSSAT, A, HABI. (2017). *Desalination processes of the sea water and their environmental impact. Le Journal de l'eau et de l'environnement*. 8 (15) 43-55. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/37473>
- BLENINGER, T., NIEPELT, A., JIRKA, G. H., LATTEMANN, S., PURNAMA, A., Al-Barwani, H. H., & Doneker, R. L. (2010). *Environmental hydraulics framework of the design of discharges from desalination plants. Environmental Hydraulics, Proceedings of the 6th International Symposium on Environmental Hydraulics, 23-25 Juin 2010, Athens - Greece*
- BOUCHAKOUR, N., & SADOK Amina. (2017). *Impact environnemental de la station de dessalement de l'eau de mer de Ténès (wilaya de Chlef)*. Thèse de Master en Mines. Université Abderrahmane Mira, Bejaia-Algérie.
- BOUTHIBA, A., AMITOUICHE, M., MOUDJEBER, D.-E., MAHMOUDI, H., & GOOSEN, M. T. F. A. (2022). *Simulation study of the interaction between brine discharge*

and catchment water of a desalination plant in Tenes, Algeria under various hydrodynamic conditions. *Desalination and water treatment*, 279, 16–28. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.29063>

CAMBRIDGE, M. L., ZAVALA-Perez, A., CAWTHRAY, G. R., STATTON, J., MONDON, J., & KENDRICK, G. A. (2019). *Effects of desalination brine and seawater with the same elevated salinity on growth, physiology and seedling development of the seagrass *Posidonia australis**. *Marine Pollution Bulletin*, 140, 462–471. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.02.001>

CHEVRON, A. (2015). *Gorgon Gas Development and Jansz Feed Gas Pipeline: Reverse Osmosis Brine Disposal via Ocean Outfall Environmental Management and Monitoring Plan*. Rapport technique, ISSN 1836-0491

CHIBAN, S. (2013). *Modélisation de la déposition des particules solides dans les rejets urbains conduits à la mer par émissaires marins*. Thèse de Doctorat en science. Université de Strasbourg-France

FAIGON, M. (2016). *Success behind advanced SWRO desalination plant*. *Filtration + Separation*, 53(3), 29–31. [https://doi.org/10.1016/S0015-1882\(16\)30121-5](https://doi.org/10.1016/S0015-1882(16)30121-5)

FALKENBERG, L. J., & STYAN, C. A. (2015). *The use of simulated whole effluents in toxicity assessments: A review of case studies from reverse osmosis desalination plants*. *Desalination*, 368, 3–9. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2015.01.014>

FERNANDEZ-Torquemada, Y., CARRATALA, A., & LIZASO, J. L. S. (2019). *Impact of brine on the marine environment and how it can be reduced*. *Desalination and Water Treatment*, 167, 27–37. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24615>

GHAFFOUR, N., BUNDSCHUH, J., MAHMOUDI, H., & GOOSEN, M. F. A. (2015). *Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems*. *Desalination*, 356, 94–114. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2014.10.024>

GIEC. (2021-2023). *Sixième Rapport d'évaluation (AR6)*. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Global Water Intelligence. (2019). *Global Desalination Report 2019*.

HEIHSEL, M., LENZEN, M., MALIK, A., & GESCHKE, A. (2019). *The carbon footprint of desalination: An input-output analysis of seawater reverse osmosis desalination in*

Australia for 2005–2015. Desalination, 454, 71–81.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.12.008>

JONES, E., QADIR, M., VAN VLIET, M. T. H., SMAKHTIN, V., & KANG, S. mu. (2019). *The state of desalination and brine production: A global outlook. Science of the Total Environment* (Vol. 657, 1343–1356). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>

LATTEMANN, S. (2010). *Development of an environmental impact assessment and decision support system for seawater desalination plants*. These de doctorat. Université de Technologie de Delft. Salzgitter-Allemagne.

LOYA-FERNANDEZ, Á., FERRERO-VICENTE, L. M., MARCO-MENDEZ, C., MARTINEZ-GARCIA, E., ZUBCOFF, J., & SANCHEZ-LIZASO, J. L. (2012). *Comparing four mixing zone models with brine discharge measurements from a reverse osmosis desalination plant in Spain. Desalination, 286, 217–224.*
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.11.026>

MAALOUF, S. (2014). *Planning and Design of Desalination Plants Effluent Systems*. Thèse de Doctorat. Université de Californie

MARC-ANTOINE Eyl-Mazzega and ÉLISE Cassignol (2022), *The Geopolitics of Seawater desalination*, Études de l’Ifri, France.

MAUREL, A. (2006). *Dessalement de l’eau de mer et des eaux saumâtres*. pp 286. ISBN : 978-2-7430-0890-1

MISSIMER, T. M., JONES, B., & MALIVA, R. G. (2015). *Environmental Science Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-Osmosis Desalination Facilities Innovations and Environmental Impacts*. pp 544. ISBN : 978-3-319-13202-0

(MEER, 2023) Ministère de l’Environnement et des Energies Renouvelables, *Rapports de l’Algérie sur les changements climatiques*

OMS, & UNICEF. (2021). *Progress on drinking water, sanitation and hygiene*. <http://apps.who.int/bookorders>. Rapport.

PANAGOPOULOS, A., HARALAMBOUS, K. J., & LOIZIDOU, M. (2019). *Desalination brine disposal methods and treatment technologies. Science of the Total Environment, Vol. 693.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.351>

PAPAKONSTANTIS, I. G., CHRISTODOULOU, G. C., & PAPANICOLAOU, P. N. (2011). *Inclined negatively buoyant jets 2: concentration measurements. Journal of Hydraulic Research, 49(1), 13–22.* <https://doi.org/10.1080/00221686.2010.542617>

- PEREIRA, S. P., ROSMAN, P. C. C., SÁNCHEZ-LIZASO, J. L., Neto, I. E. L., SILVA, R. A. G., & RODRIGUES, M. (2021). *Brine outfall modeling of the proposed desalination plant of Fortaleza, BRAZIL. Desalination and Water Treatment*, 234, 22–30. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27557>
- PETERSEN, K. L., HECK, N., REGUERO, B. G., Potts, D., HOVAGIMIAN, A., & PAYTAN, A. (2019). *Biological and physical effects of brine discharge from the Carlsbad Desalination plant and implications for future desalination plant constructions. Water*, 11 (2) 208. <https://doi.org/10.3390/w11020208>
- PURNAMA, A., AL-BARWANI, H. H., BLENINGER, T., & Doneker, R. L. (2011). *CORMIX simulations of brine discharges from Barka plants, Oman. Desalination and Water Treatment*, 32(1–3), 329–338. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.2718>
- RADCLIFFE, J. C., & PAGE, D. (2020). *Water reuse and recycling in Australia — history, current situation and future perspectives. Water Cycle*, 1, 19–40. <https://doi.org/10.1016/J.WATCYC.2020.05.005>
- ROBERTS, P. J. W. (2015). *Near field flow dynamics of concentrate discharges and diffuser design. Environmental Science and Engineering. Environmental Science*, 149, 369–396.
- RODRIGUEZ, F. A., SANTIAGO, D. E., FRANQUIZ SUAREZ, N., ORTEGA MENDEZ, J. A., & VEZA, J. M. (2012). *Comparison of evaporation rates for seawater and brine from reverse osmosis in traditional salt works: empirical correlations. Water Supply*, 12(2), 234–240. <https://doi.org/10.2166/ws.2012.133>
- SHAHZAD, M. W., BURHAN, M., ANG, L., & Ng, K. C. (2017). *Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability. Desalination Vol. 413*, 52–64. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.03.009>
- SOLA, I., ZARZO, D., CARRATALA, A., FERNANDEZ-TORQUEMADA, Y., DE-LA-OSSA-CARRETERO, J. A., DEL-PILAR-RUSO, Y., & SANCHEZ-LIZASO, J. L. (2020). *Review of the management of brine discharges in Spain. Ocean and Coastal Management*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105301>
- TAHRAOUI DOUMA, N, KETTAB. A, ABEDLALI et M, BOUGHRARA. F. (2010). *Qualité des eaux de mer après dessalement au niveau de la station de dessalement de la ville de Ténès, Chlef. Impact de dessalement sur l'environnement (milieu aquatique). WATMED 5*, 26-28 Mai 2010, Lille – France.

UNESCO. (2018). *Rapport mondial des Nations unies sur la mise en valeur des ressources en eau*. Paris, France.

VOUTCHKOV, Nikolay, (2020) *How Can We Make Desalination More Reliable, Efficient and Sustainable*. *Oceanography & Marine Biology*. 1(4) 2687-8089. <https://doi.org/10.33552/AOMB.2020.01.000520>

XEVGENOS, D., MOUSTAKAS, K., MALAMIS, D., & LOIZIDOU, M. (2016). *An overview on desalination & sustainability: renewable energy-driven desalination and brine management*. *Desalination and Water Treatment*, 57(5), 2304–2314. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.984927>

ZIOLKOWSKA, J. R., & REYES, R. (2017). *Chapter 3.1.3 - Prospects for Desalination in the United States, Experiences from California, Florida, and Texas* (pp. 298–316). ISBN: 9780128032374

ZIZI, Nabila. (2013). *Station de dessalement de l'eau de mer en Algérie : choix des sites prioritaire*. Thèse de magister en science, Université des sciences et de la technologie Houari-Boumediene-Algérie.

C = centerline concentration (includes reaction effects, if any)
 Uc = Local centerline excess velocity (above ambient)
 TT = Cumulative travel time

X	Y	Z	S	C	BV	BH	Uc	TT
0.00	0.00	-3.75	1.0	0.720E+02	0.01	24.00	3.965	.000001

END OF MOD201: DIFFUSER DISCHARGE MODULE

 BEGIN MOD224: NEGATIVELY BUOYANT LINE PLUME

Profile definitions:

BV = top-hat thickness, measured vertically
 BH = top-hat half-width, measured horizontally in y-direction
 ZU = upper plume boundary (Z-coordinate)
 ZL = lower plume boundary (Z-coordinate)
 S = hydrodynamic average (bulk) dilution
 C = average (bulk) concentration (includes reaction effects, if any)
 TT = Cumulative travel time

Control volume inflow:

X	Y	Z	S	C	BV	BH	TT
0.00	0.00	-3.75	1.0	0.720E+02	0.01	24.00	.00000E+00

** WATER QUALITY STANDARD OR CCC HAS BEEN FOUND **

The pollutant concentration in the plume falls below water quality standard or CCC value of 0.370E+02 due to mixing in this control volume. The actual extent of the zone at whose boundary the water quality standard or the CCC is exceeded will be smaller than the control volume outflow values predicted below.

MIXING ZONE / TOXIC DILUTION / REGION OF INTEREST PARAMETERS

C0 = 0.7200E+02 CUNITS= g/l
 NTOX = 0
 NSTD = 1 CSTD = 0.3700E+02
 REGMZ = 1
 REGSPC= 1 XREG = 300.00 WREG = 0.00 AREG = 0.00
 XINT = 1000.00 XMAX = 1000.00

X-Y-Z COORDINATE SYSTEM:

ORIGIN is located at the WATER SURFACE an at the diffuser mid-point:
 150.00 m from the LEFT bank/shore.
 X-axis points downstream, Y-axis points to left, Z-axis points upward.

COORDINATE SYSTEM SPECIFIED (WGS84 Decimal):

PHI = 70.00 ALPHA = 36.00
 LAT = 1.2285700
 LON = 36.5066986

NSTEP = 50 display intervals per module

 BEGIN MOD201: DIFFUSER DISCHARGE MODULE

Due to complex near-field motions: EQUIVALENT SLOT DIFFUSER (2-D) GEOMETRY

Profile definitions:

BV = Gaussian 1/e (37%) half-width, in vertical plane normal to trajectory
 BH = top-hat half-width, in horizontal plane normal to trajectory
 S = hydrodynamic centerline dilution

Control volume outflow:

X	Y	Z	S	C	BV	BH	TT
1.52	0.00	-4.50	3.5	0.204E+02	0.46	24.46	.20011E+01

Cumulative travel time = 2.0011 sec (0.00 hrs)

END OF MOD224: NEGATIVELY BUOYANT LINE PLUME

BEGIN MOD232: LAYER BOUNDARY IMPINGEMENT/UPSTREAM SPREADING

Vertical angle of layer/boundary impingement = -90.00 deg
 Horizontal angle of layer/boundary impingement = 0.00 deg

UPSTREAM INTRUSION PROPERTIES:

Upstream intrusion length = 20.78 m
 X-position of upstream stagnation point = -19.26 m
 Thickness in intrusion region = 0.97 m
 Half-width at downstream end = 57.57 m
 Thickness at downstream end = 0.71 m

Control volume inflow:

X	Y	Z	S	C	BV	BH	TT
1.52	0.00	-4.50	3.5	0.204E+02	0.46	24.46	.20011E+01

Profile definitions:

BV = top-hat thickness, measured vertically
 BH = top-hat half-width, measured horizontally in y-direction
 ZU = upper plume boundary (Z-coordinate)
 ZL = lower plume boundary (Z-coordinate)
 S = hydrodynamic average (bulk) dilution
 C = average (bulk) concentration (includes reaction effects, if any)
 TT = Cumulative travel time

X	Y	Z	S	C	BV	BH	ZU	ZL
-19.26	0.00	-4.50	9999.9	0.000E+00	0.00	0.00	-4.50	-4.50 .187
-18.27	0.00	-4.50	12.9	0.557E+01	0.27	8.14	-4.23	-4.50 .200
-13.41	0.00	-4.50	5.4	0.133E+02	0.64	19.78	-3.86	-4.50 .200
-8.56	0.00	-4.50	4.2	0.173E+02	0.83	26.76	-3.67	-4.50 .200
-3.70	0.00	-4.50	3.7	0.196E+02	0.93	32.26	-3.57	-4.50 .200
1.16	0.00	-4.50	3.5	0.204E+02	0.97	36.95	-3.53	-4.50 .200
6.02	0.00	-4.50	3.7	0.196E+02	0.95	51.77	-3.55	-4.50 .310
10.88	0.00	-4.50	4.0	0.178E+02	0.88	53.10	-3.62	-4.50 .623
15.73	0.00	-4.50	4.4	0.162E+02	0.81	54.33	-3.69	-4.50 .936
20.59	0.00	-4.50	4.7	0.152E+02	0.76	55.47	-3.74	-4.50 .125
25.45	0.00	-4.50	4.9	0.147E+02	0.73	56.55	-3.77	-4.50 .156
30.31	0.00	-4.50	5.0	0.144E+02	0.71	57.57	-3.79	-4.50 .187

Cumulative travel time = 187.7113 sec (0.05 hrs)

END OF MOD232: LAYER BOUNDARY IMPINGEMENT/UPSTREAM SPREADING

** End of NEAR-FIELD REGION (NFR) **

In this design case, the diffuser is located CLOSE TO BANK/ShORE.
 Some lateral boundary/shore interaction occurs at end of near-field.
 This may be related to a design case with a very LOW AMBIENT VELOCITY.
 The dilution values in one or more of the preceding zones may be too high.
 Carefully evaluate results in near-field and check degree of interaction.

Consider locating outfall further away from bank or shore.
 In the next prediction module, the plume centerline will be set
 to follow the bank/shore.

BEGIN MOD310: BOTTOM DENSITY CURRENT

Profile definitions:

BV = top-hat thickness, measured vertically
 BH = top-hat half-width, measured horizontally in Y-direction
 ZU = upper plume boundary (Z-coordinate)

