

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université d'Aïn Témouchent BELHADJ BOUCHAIB
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Hydraulique
Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Hydraulique
Spécialité : Hydraulique Urbaine



Mémoire de fin d'études
Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

THÈME

L'impact de la saumure rejeté SUR L'écosystème marin

Réalisé par :

- BOUKHOBZA YASSINE
- MEHADJI MOHAMED

Encadré par :

- M. A. NEHARI

Soutenu publiquement le 29 juin 2026 devant le jury composé de :

Président : Mme BENCHKOUR M.C.B

Encadrant : M. A. NEHARI M.C.B

Examineur : M. M. BENAICHA M.A.A

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire de fin d'études.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent en premier lieu à notre encadreur, **M. Nhari Abdel Rahman**, Maître de Conférences au Département d'Hydraulique de l'Université d'Aïn Témouchent Belhadj Bouchaïb, pour la confiance qu'il nous a accordée, sa disponibilité constante, ses conseils avisés et la rigueur scientifique qu'il a su nous transmettre tout au long de ce travail.

Nous remercions l'ensemble du corps enseignant du Département d'Hydraulique pour la qualité de la formation dispensée durant notre cursus, ainsi que les membres du jury qui ont bien voulu évaluer ce travail.

Nos remerciements vont également à la **Beni Saf Water Company SPA** pour les documents techniques mis à disposition, ainsi qu'au bureau d'études **CONAIMA** dont les travaux de modélisation hydrodynamique ont constitué une source de référence essentielle pour le quatrième chapitre.

Enfin, nous exprimons notre profonde reconnaissance à nos familles pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs encouragements tout au long de ce parcours académique.

À tous, merci.

Dédicace

*À nos parents, source inépuisable d'amour et de sacrifice,
dont le soutien indéfectible a rendu possible chaque étape de ce parcours.*

À nos frères et sœurs, pour leur présence et leur affection.

À nos amis et camarades de promotion, pour les moments de travail partagé.

À tous ceux qui nous ont guidés et inspirés vers la connaissance.

Ce travail vous est dédié.

BOUKHOBZA Yassine

Résumé

Le dessalement de l'eau de mer constitue une réponse stratégique à la pénurie hydrique croissante en Algérie. Ce mémoire porte sur l'étude de la diffusion de la saumure rejetée par une station de dessalement d'eau de mer et la conception du système de rejet (émissaire sous-marin et diffuseur). Le travail s'articule en quatre chapitres : (I) impact environnemental de la saumure sur les écosystèmes marins côtiers méditerranéens — stress osmotique sur les herbiers de *Posidonia oceanica* et *Cymodocea nodosa*, effets des contaminants chimiques résiduels, impacts à long terme sur la biodiversité benthique ; (II) stratégies de gestion et de valorisation de la saumure, des technologies membranaires avancées (HPRO, électrodialyse, distillation membranaire) au concept de Rejet Zéro Liquide (ZLD) ; (III) techniques de dispersion — conduites, émissaires marins, diffuseurs multiports inclinés, modélisation hydrodynamique ; (IV) étude de cas approfondie de la station de Chatt El Hilal à Beni Saf (200 000 m³/jour, osmose inverse) par modélisation CORMIX v.4.2GT, évaluant l'impact sur les prairies de *Cymodocea nodosa* et validant la configuration optimale du diffuseur (P1 : profondeur 8 m, D3 = 1,07 m, v = 3 m/s, inclinaison 45°, □S max = 1 707 mg/L < seuil 2 000 mg/L).

Mots-clés : Dessalement · Saumure · Émissaire sous-marin · Diffuseur · CORMIX · Osmose inverse · *Cymodocea nodosa* · *Posidonia oceanica* · Dispersion · Beni Saf · Algérie · Impact environnemental · Rejet Zéro Liquide · ZLD

Abstract (English)

Seawater desalination represents a strategic response to the growing freshwater scarcity in Algeria. This thesis studies the diffusion of brine discharged from a seawater desalination plant and proposes an optimised design for the discharge system (submarine outfall and diffuser). The work is structured in four chapters: (I) environmental impact of brine on Mediterranean coastal marine ecosystems — osmotic stress on *Posidonia oceanica* and *Cymodocea nodosa* seagrass beds, residual chemical contaminant effects, long-term biodiversity impacts; (II) brine management and valorisation strategies, from advanced membrane technologies (HPRO, electrodialysis, membrane distillation) to the Zero Liquid Discharge (ZLD) concept; (III) dispersion techniques — discharge pipelines, submarine outfalls, inclined multiport diffusers, hydrodynamic modelling; (IV) in-depth case study of the Chatt El Hilal plant at Beni Saf (200,000 m³/day, reverse osmosis) using CORMIX v.4.2GT modelling, assessing the impact on *Cymodocea nodosa* meadows and validating the optimal diffuser configuration (P1: depth 8 m, D3=1.07 m, v=3 m/s, inclination 45°, □S max=1,707

mg/L < threshold 2,000 mg/L).

Keywords: Desalination · Brine · Submarine outfall · Diffuser · CORMIX · Reverse osmosis · Cymodocea nodosa · Posidonia oceanica · Dispersion · Beni Saf · Algeria · Environmental impact · Zero Liquid Discharge · ZLD

Sommaire

Table of Contents

Remerciements	2
Dédicace	3
Résumé	4
Sommaire	1
Liste des Figures	3
Liste des Tableaux	4
Liste des Tableaux	5
Liste des Abréviations	6
Introduction Générale.....	8
CHAPITRE I:	1
Impact de la Saumure sur l'Environnement Marin	1
Introduction	2
I. Généralités sur le dessalement de l'eau :	3
I.1 Contexte et Nécessité du Dessalement :	3
I.2 Définition et Principe du Dessalement.....	4
I.3 Principales Technologies de Dessalement	4
I.4 Étapes Générales du Processus de Dessalement.....	5
I.5 Production de Saumure : Sous-Produit Inévitable	6
I.6 définition et origine de la saumure.....	7
I.7 caractéristiques générales de la saumure	8
I.8 Différence entre l'eau de mer naturelle et la saumure rejetée	11
I.9 Dispersion du panache de saumure dans le milieu marin	12
I.10 Effets de la saumure (salinité et température) sur le biote marin	15
I.11 Impact des substances chimiques issues du procédé de dessalement.....	19
I.12 Effets à long terme des rejets de saumure sur les écosystèmes marins.....	23
Conclusion :	27
Chapitre II :	1
Gestion et valorisation de la saumure	1
Introductions :	28
II.1 Contraintes de la Gestion de la Saumure	28
II.2 Stratégies de Gestion de la Saumure.....	30
II.3 Technologies Avancées de Traitement de la Saumure	32
II.4 Valorisation de la Saumure — De l'effluent à la ressource.....	37
II.5 Rejet Zéro Liquide (Zero Liquid Discharge — ZLD)	40
Conclusions :	44
CHAPITRE III :	1
Techniques de Dispersion de la Saumure dans les Milieux Aquatiques	1
Introduction :	46
II.1 Principe de la Dispersion de la Saumure	46
II.1.1 But de la dispersion	46
II.1.2 Principe de dilution rapide dans le milieu marin	46
II.1.3 Notion de zone de mélange (mixing zone).....	47

III.1.4 Systèmes de Rejet de la Saumure	48
III.1.5 Conduite de rejet (pipeline)	49
Tableau 3.2 : Matériaux utilisés pour les conduites de rejet de saumure.....	51
III.1.6 Émissaires marins.....	52
III.2 Diffuseurs de Saumure.....	53
III.2.1 Diffuseur simple	54
III.2.2 Diffuseur multiport	55
III.3 Diffuseurs inclinés	56
III.4 Méthodes d'Amélioration de la Dispersion	59
III.4.1 Augmenter la vitesse de sortie et le nombre d'orifices.....	59
III.4.2 Orientation des jets et choix de la profondeur.....	60
III.5 Modélisation de la Dispersion.....	61
III.5.1 Modèles hydrodynamiques utilisés.....	61
III.5.1 Simulation du mélange et importance dans la conception.....	63
III.5.2 Exemples de Techniques dans les Stations de Dessalement Algériennes	64
III.5.3 Station Magtaa — Oran	65
III.5.4 Station El Hamma — Alger	66
Conclusion.....	69
Introduction Générale.....	2
IV.1Présentation de la Station de Dessalement de Chatt El Hilal.....	4
IV.1.1 Localisation Géographique	4
IV.1.2 Technologie et Caractéristiques Techniques	5
IV.2 Système de Captage de l'Eau de Mer	5
IV .3 Système de Rejet de la Saumure — Émissaire Sous-Marin	6
IV.4 Présentation du Rejet de Saumure.....	7
IV.4.1 Localisation du Point de Rejet.....	7
IV.4.2 Propriétés Physico-Chimiques de la Saumure.....	7
IV.4.3 Description du Diffuseur.....	7
IV.5 Étude de Simulation Existante — CONAIMA (2006)	8
IV.5.1 Méthodologie.....	8
IV.5.1.1 Le Modèle CORMIX v. 4.2GT.....	8
IV.5.1.2 Campagne de Mesures In Situ — Automne 2005	9
IV.5.2 Paramètres d'Entrée des Simulations.....	10
IV.6 Résultats — Analyse de l'Effet de la Hauteur de la Bouche	11
IV.7 Résultats — Effet du Diamètre de Bouche et de la Vitesse de Sortie	12
IV .8 Résultats — Effet de l'Inclinaison du Diffuseur	13
IV.9 Résultats — Facteurs de Dilution selon le Courant et la Distance.....	13
III.2 Étude numérique d'un système Venturi pour l'amélioration de la dilution de la saumure	15
III.2.1 Principe du système Venturi.....	15
III.2.2 Objectif de la simulation	16
III.2.3 Modèle numérique	16
III.2.4 Effet du système Venturi sur l'écoulement.....	16
III.2.5 Résultats de la simulation	17
III.2.6 Analyse environnementale	17
Conclusion.....	19
Conclusion Générale	20
Bibliographie Générale.....	93

Liste des Figures

N°	Titre	Page
Figure I.1	Évolution de la capacité nationale de dessalement en Algérie (2000–2023)	4
Figure I.2	Schéma général du procédé de dessalement de l'eau	6
Figure I.4	Comparaison visuelle des paramètres physico-chimiques de l'eau de mer et de la saumure	9
Figure I.5	Solubilité de l'oxygène dissous en fonction de la salinité et de la température	11
Figure I.6	Profil de stress écologique comparé (saumure OI vs thermique)	12
Figure I.7	Schéma de dispersion du panache de saumure	13
Figure I.8	Profil de dilution du panache de saumure	14
Figure I.9	Temps d'exposition des organismes marins au panache de saumure	16
Figure I.10	Variation de la salinité journalière des eaux de fond	17
Figure I.11	Courbes de tolérance à la salinité des espèces marines	19
Figure I.12	<i>Cymodocea nodosa</i> et <i>Zostera noltii</i>	20
Figure I.13	<i>Amphibalanus improvisus</i>	20
Figure I.14	Comparaison entre l'eau de mer naturelle et la saumure rejetée	21
Figure I.15	Concentrations des polluants dans la saumure	24
Figure I.16	<i>Synodus</i> sp.	26
Figure I.17	Séquence temporelle des impacts écologiques	28
Figure II.1 à II.10	Figures du chapitre II	32–46
Figure III.1 à III.10	Figures du chapitre III	51–75
Figure IV.1	Plan de masse de la station de Beni Saf	78
Figure IV.2	Tour de captage et conduite de prise d'eau	79
Graphique IV.2	Effet du diamètre de bouche sur la dilution	87
Graphique IV.5	Effet de l'inclinaison du diffuseur sur la dilution	87
Graphique IV.3	Facteurs de dilution CORMIX	88

Liste des Tableaux

N°	Titre	Page
Tableau I.1	Comparaison des paramètres physico-chimiques : eau de mer naturelle vs saumure rejetée	8
Tableau I.3	Contaminants et produits chimiques issus des procédés de dessalement	22
Tableau I.4	Synthèse des effets à long terme des rejets de saumure	27
Tableau II.2	Coûts comparatifs des filières de gestion de la saumure	33
Tableau II.3	Performances comparées des variantes d'électrodialyse	37
Tableau II.4	Comparaison des configurations de distillation membranaire	39
Tableau II.5	Sels récupérables de la saumure et leurs valeurs commerciales	41
Tableau II.6	Applications industrielles de la réutilisation de la saumure	43
Tableau II.7	Défis et solutions pour le ZLD	45
Tableau II.8	Analyse comparative multicritère des méthodes de gestion	46
Tableau III.1	Structure de la zone de mélange et impacts biologiques associés	52
Tableau III.2	Matériaux utilisés pour les conduites de rejet	55
Tableau III.3	Relation entre distance de rejet, profondeur et performances de dilution	55
Tableau III.4	Caractéristiques d'un diffuseur simple	59
Tableau III.5	Comparaison diffuseur simple vs diffuseur multiport	60
Tableau III.6	Effet de l'angle d'inclinaison sur la dilution	62
Tableau III.7	Quantification des gains de dilution	65
Tableau III.9	Caractéristiques du système de rejet de la station El Hamma	73
Tableau IV.1	Caractéristiques physico-chimiques de l'effluent	78
Tableau IV.2	Caractéristiques de l'émissaire	80
Tableau IV.3	Propriétés physico-chimiques comparées eau de mer / saumure	81
Tableau IV.4	Résultats des mesures in situ	83
Tableau IV.5	Paramètres d'entrée CORMIX	84

Liste des Tableaux

N°	Titre	Page
Tableau I.1	Comparaison des paramètres physico-chimiques : eau de mer naturelle vs saumure rejetée	8
Tableau I.3	Contaminants et produits chimiques issus des procédés de dessalement (OI vs thermique)	22
Tableau I.4	Synthèse des effets à long terme des rejets chroniques de saumure sur les compartiments écologiques côtiers	27
Tableau II.2	Coûts comparatifs des filières de gestion de la saumure	4
Tableau II.3	Performances comparées des variantes d'électrodialyse	8
Tableau II.4	Comparaison des configurations de distillation membranaire	10
Tableau II.5	Sels récupérables de la saumure et leurs valeurs commerciales	12
Tableau II.6	Applications industrielles de la réutilisation directe de la saumure	14
Tableau II.7	Défis et solutions pour la mise en œuvre du Zero Liquid Discharge (ZLD)	16
Tableau II.8	Analyse comparative multicritère des méthodes de gestion de la saumure	17
Tableau III.1	Structure de la zone de mélange et impacts biologiques associés	5
Tableau III.2	Matériaux utilisés pour les conduites de rejet de saumure	8
Tableau III.3	Relation entre distance de rejet, profondeur et performances de dilution	8
Tableau III.4	Caractéristiques typiques d'un diffuseur simple	12
Tableau III.5	Comparaison quantitative : diffuseur simple vs diffuseur multiport	13
Tableau III.6	Effet de l'angle d'inclinaison sur la dilution initiale du jet	15
Tableau III.7	Quantification des gains de dilution selon les leviers d'amélioration	18
Tableau III.9	Caractéristiques du système de rejet de la station El Hamma (Alger)	26
Tableau IV.2	Caractéristiques physico-chimiques de l'effluent	80
Tableau IV.1	Propriétés physico-chimiques comparées : eau de mer / saumure	83
Tableau IV.1	Résultats des mesures in situ (automne 2005)	85
Tableau IV.2	Paramètres d'entrée CORMIX – Configuration optimale P1	86

Liste des Abréviations

Abréviation	Signification
ABE	Agence du Bassin de l'Est
ADE	Algérienne Des Eaux
AGMD	Air Gap Membrane Distillation — Distillation membranaire à lame d'air
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydriques
BRO	Batch Reverse Osmosis — Osmose inverse discontinue
BPED	Bipolar Electrodialysis — Électrodialyse bipolaire
CCRO	Closed Circuit Reverse Osmosis — Osmose inverse en circuit fermé
CHBr ₃	Bromoforme — sous-produit de la chloration en présence de bromures
CL50	Concentration létale pour 50 % de la population test
CORMIX	Cornell Mixing Zone Expert System — Modèle de dispersion hydrodynamique
CTD	Conductivity–Temperature–Depth — Sonde hydrographique
DCMD	Direct Contact Membrane Distillation — Distillation membranaire à contact direct
ED	Électrodialyse
EDR	Electrodialysis Reversal — Électrodialyse inversée
EIE	Étude d'Impact Environnemental
ERD	Energy Recovery Device — Dispositif de récupération d'énergie
ERI	Energy Recovery Inc. — Fabricant de dispositifs de récupération d'énergie
GRP	Glass-Reinforced Plastic — Plastique renforcé de fibres de verre
HDD	Horizontal Directional Drilling — Forage dirigé horizontal
HPRO	High Pressure Reverse Osmosis — Osmose inverse haute pression
IWPP	Independent Water and Power Plant — Centrale intégrée de production d'eau et d'électricité
MATE	Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
MD	Membrane Distillation — Distillation membranaire
MED	Multi-Effect Distillation — Distillation multi-effets
MEE	Multi-Effect Evaporation — Évaporation multi-effets
MSF	Multi-Stage Flash — Distillation par détente multi-étagée
MVR	Mechanical Vapour Recompression — Recompression mécanique de vapeur
NaCl	Chlorure de sodium
Na ₂ S ₂ O ₅	Métabisulfite de sodium — Agent de déchloration utilisé dans les installations d'osmose inverse
OI	Osmose Inverse
PEHD	Polyéthylène Haute Densité
PNDES	Programme National de Dessalement de l'Eau de Mer (Algérie)
PTFE	Polytétrafluoroéthylène (Téflon) — Matériau utilisé pour les membranes de distillation membranaire

Abréviation	Signification
PVDF	Polyfluorure de vinylidène — Matériau utilisé pour les membranes de distillation membranaire
SGMD	Sweeping Gas Membrane Distillation — Distillation membranaire à balayage gazeux
SWRO	Seawater Reverse Osmosis — Osmose inverse de l'eau de mer
TDS	Total Dissolved Solids — Solides dissous totaux
TR	Taux de récupération (%)
US EPA	United States Environmental Protection Agency — Agence américaine de protection de l'environnement
UTM	Universal Transverse Mercator — Système de projection cartographique
VMD	Vacuum Membrane Distillation — Distillation membranaire sous vide
WET	Whole Effluent Toxicity — Test de toxicité globale de l'effluent
WGS 84	World Geodetic System 1984 — Système géodésique mondial de référence
YSI	Yellow Springs Instruments — Fabricant de sondes multiparamétriques
ZLD	Zero Liquid Discharge — Rejet liquide nul (Rejet Zéro Liquide)

Introduction Générale

Introduction Générale

Les ressources en eau douce constituent un élément fondamental pour le développement humain, économique et social. Cependant, leur disponibilité diminue progressivement à l'échelle mondiale sous l'effet combiné de la croissance démographique, de l'urbanisation rapide et du changement climatique. Cette situation engendre une pression croissante sur les ressources hydriques conventionnelles, rendant leur exploitation de plus en plus insuffisante pour répondre aux besoins en eau potable.

Face à cette pénurie, la désalinisation de l'eau de mer s'est imposée comme une solution stratégique, en particulier dans les régions côtières arides et semi-arides comme l'Algérie. Le Programme National de Dessalement (PNDES) a permis la mise en service de plusieurs grandes stations côtières — Hama (Alger, 200 000 m³/j), El-Mactaa (Oran, 500 000 m³/j), Fouka (Tipaza, 120 000 m³/j) — représentant plus de 20 % de l'approvisionnement national en eau potable. Ce recours massif au dessalement, bien qu'indispensable, génère en contrepartie un sous-produit inévitable : la **saumure**, concentrat hypersalin dont la salinité atteint 60 à 80 g/L par osmose inverse — soit le double de l'eau de mer naturelle.

Le rejet de cette saumure dans le milieu marin constitue une problématique environnementale majeure. Une concentration élevée en sels peut perturber l'équilibre physico-chimique de l'eau de mer, affecter la biodiversité marine et modifier le fonctionnement des écosystèmes côtiers. Les impacts potentiels incluent le stress osmotique des organismes marins, la diminution de l'oxygène dissous et la dégradation des habitats naturels — en particulier les herbiers de *Posidonia oceanica* et *Cymodocea nodosa*, habitats protégés par la Convention de Barcelone. Dans ce contexte, la gestion appropriée du rejet, basée sur des systèmes techniques adaptés, permettrait de réduire significativement les impacts négatifs sur le biosystème marin tout en assurant la durabilité des projets de dessalement.

Ce mémoire s'articule autour de **quatre chapitres complémentaires** :

Chapitre I — Impact de la saumure sur l'environnement marin : caractérisation physico-chimique de la saumure, mécanismes de formation et de dispersion du panache, effets sur le biote marin et impacts à long terme sur les écosystèmes côtiers méditerranéens.

Chapitre II — Gestion et valorisation de la saumure : contraintes techniques et économiques, stratégies de réduction à la source et de recyclage, technologies avancées (électrodialyse, HPRO, distillation membranaire, cristallisation) et concept de Rejet Zéro Liquide (ZLD).

Chapitre III — Techniques de dispersion de la saumure : conduites de rejet, émissaires marins, diffuseurs (simple, multiport, incliné), méthodes d'amélioration des performances, modélisation hydrodynamique (CORMIX, MIKE 3) et exemples algériens (Magtaa, El Hama).

Chapitre IV — Étude de cas — Station de Chatt El Hilal, Beni Saf : présentation de la station et de l'émissaire sous-marin, simulations CORMIX v.4.2GT, analyse paramétrique du diffuseur et évaluation de l'impact sur les herbiers de *Cymodocea nodosa*.

Introduction Générale

Cette étude vise ainsi à contribuer à une meilleure compréhension des enjeux environnementaux liés au rejet de la saumure et à proposer des orientations pour une gestion plus durable des stations de dessalement en Algérie, en cohérence avec les exigences réglementaires nationales et les standards internationaux de protection du milieu marin.

CHAPITRE I :

Impact de la Saumure sur l'Environnement Marin

Introduction

Les ressources en eau douce constituent un élément fondamental pour le développement humain, économique et social. Cependant, leur disponibilité diminue progressivement à l'échelle mondiale sous l'effet combiné de la croissance démographique, de l'urbanisation rapide et du changement climatique. Cette situation engendre une pression croissante sur les ressources hydriques conventionnelles, notamment les eaux de surface et les eaux souterraines, rendant leur exploitation de plus en plus insuffisante pour répondre aux besoins en eau potable.

Face à cette pénurie, la désalinisation de l'eau de mer s'est imposée comme une solution stratégique, en particulier dans les régions côtières arides et semi-arides, telles que l'Algérie. Le recours massif à cette technologie permet d'assurer l'approvisionnement en eau potable indépendamment des aléas climatiques, mais génère en contrepartie un sous-produit appelé saumure, caractérisé par une forte salinité et la présence de composés chimiques issus des procédés de traitement.

Le rejet de cette saumure dans le milieu marin constitue aujourd'hui une problématique environnementale majeure. Une concentration élevée en sels peut perturber l'équilibre physico-chimique de l'eau de mer, affecter la biodiversité marine et modifier le fonctionnement des écosystèmes côtiers. Les impacts potentiels incluent le stress osmotique des organismes marins, la diminution de l'oxygène dissous et la dégradation des habitats naturels, en particulier lorsque les systèmes de rejet ne sont pas correctement adaptés aux conditions locales.

Dans ce contexte, l'étude des effets de la saumure rejetée par les stations de dessalement, notamment celles de type BWC, revêt une importance capitale. Une gestion appropriée du rejet, basée sur des systèmes techniques adaptés aux conditions locales, permettrait de réduire significativement les impacts négatifs sur le biosystème marin tout en assurant la durabilité des projets de dessalement.

Cette étude s'articule autour de quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à l'impact de la saumure sur l'environnement marin, en mettant en évidence ses effets sur les paramètres physico-chimiques de l'eau et sur les organismes vivants.
- Le deuxième chapitre présente les différents types de systèmes de rejet de la saumure, leurs principes de fonctionnement et leurs influences sur le milieu récepteur.
- Le troisième chapitre traite des systèmes de rejet adaptés au contexte algérien, en tenant compte des caractéristiques côtières, environnementales et réglementaires.
- Le quatrième chapitre est dédié à une étude de cas de la station BWC, visant à analyser les modalités de rejet de la saumure et à évaluer ses effets potentiels sur le biosystème marin.

Chapitre I : impact de la saumure sur l'environnement marin

Cette étude vise ainsi à contribuer à une meilleure compréhension des enjeux environnementaux liés au rejet de la saumure et à proposer des orientations pour une gestion plus durable des stations de dessalement en Algérie.

I. Généralités sur le dessalement de l'eau :

I.1 Contexte et Nécessité du Dessalement :

La raréfaction des ressources en eau douce constitue aujourd'hui l'un des défis majeurs du développement durable à l'échelle mondiale. L'augmentation rapide de la population, l'urbanisation accélérée, l'intensification des activités agricoles et industrielles ainsi que les effets du changement climatique exercent une pression croissante sur les ressources hydriques conventionnelles, notamment les eaux de surface et les nappes souterraines (UNEP, 2001 ; Lattemann & Höpner, 2008).

Dans les régions arides et semi-arides, particulièrement en zone méditerranéenne, la disponibilité en eau douce est fortement limitée par la variabilité climatique et la récurrence des épisodes de sécheresse. L'Algérie, dont plus de 80 % du territoire est classé aride ou saharien, présente une dotation en eau de seulement 300 m³/habitant/an — bien en dessous du seuil de stress hydrique de l'OMS (1 000 m³/hab/an). Elle a connu durant les dernières décennies plusieurs périodes de déficit pluviométrique sévère, entraînant une diminution significative des réserves en eau et une dégradation des ressources souterraines (Drouiche, 2021).

Face à cette situation, le Programme National de Dessalement (PNDES) a permis la mise en service de plusieurs grandes stations côtières : Hamma (Alger, 200 000 m³/j), El-Mactaa (Oran, 500 000 m³/j), Fouka (Tipaza, 120 000 m³/j), et une douzaine d'autres installations couvrant collectivement plus de 20 % des besoins nationaux en eau potable. En Algérie, deux principales catégories d'eau sont concernées par le dessalement : l'eau de mer, principalement traitée dans les stations côtières, et l'eau saumâtre, issue de nappes souterraines à salinité intermédiaire.

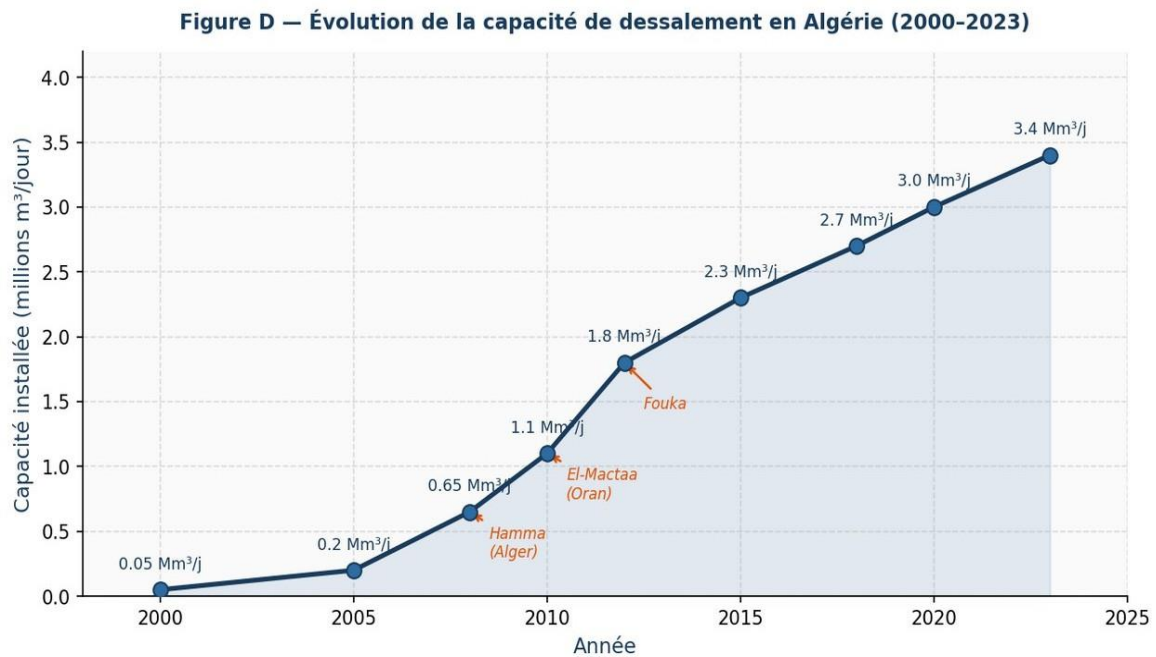


Figure I.1 : Évolution de la capacité nationale de dessalement en Algérie (2000–2023). L'essor de grandes stations comme Hamma et El-Mactaa reflète l'urgence hydrique nationale.

Source : Drouiche, 2021 ; ABE, 2023.

I.2 Définition et Principe du Dessalement

Le dessalement est un procédé physico-chimique visant à éliminer les sels dissous et autres impuretés présents dans l'eau de mer ou l'eau saumâtre afin de produire une eau conforme aux normes de potabilité (Boucha, 2017). L'eau de mer possède une salinité moyenne d'environ 35 g/L de sels dissous totaux (TDS), principalement constitués de chlorure de sodium ($\text{NaCl} \approx 78\%$), ainsi que d'autres ions : MgZ^+ , CaZ^+ , K^+ , SO_4Z^- et HCO_3^- . Le dessalement consiste à séparer ces sels de la phase aqueuse par des procédés thermiques (changement de phase) ou membranaires (séparation sous pression) (Einav et al., 2003 ; UNEP, 2001).

I.3 Principales Technologies de Dessalement

I.3.1 Osmose Inverse (OI) — Technologie dominante

L'osmose inverse est aujourd'hui la technologie la plus répandue, représentant environ 69 % de la capacité mondiale installée. Elle consiste à appliquer une pression de 55 à 80 bars sur l'eau de mer pour forcer l'eau à traverser une membrane semi-perméable en polyamide aromatique qui retient les sels. Le taux de récupération typique est de 40 à 50 % — pour 100 m³ d'eau de mer admise, 40 à 50 m³ d'eau douce sont produits et 50 à 60 m³ de saumure sont rejetés. Ce procédé consomme 3 à 5 kWh/m³ avec systèmes de récupération d'énergie (Lattemann & Höpner, 2008 ; Drouiche, 2021).

Le prétraitement de l'eau de mer avant l'OI fait appel à la coagulation-floculation, la filtration sur sable et cartouches, la chloration puis la déchloration par bisulfite de sodium, et l'ajout d'inhibiteurs de tartre.

Chapitre I : impact de la saumure sur l'environnement marin

Ces produits chimiques se retrouvent partiellement dans la saumure rejetée, constituant l'une des sources de contamination chimique du milieu marin.

I.3.2 Dessalement Thermique (MSF, MED)

Les procédés thermiques reposent sur l'évaporation partielle de l'eau de mer suivie de la condensation de la vapeur. La distillation multi-effets (MED) et la distillation par détente multi-étagée (MSF) sont principalement utilisées dans les pays du Golfe. Ils consomment 10 à 15 kWh/m³ et produisent une saumure rejetée à +5 à +15 °C au-dessus de la température ambiante, pouvant contenir des résidus de chlore résiduel — contrairement aux installations OI où le chlore est systématiquement neutralisé avant les membranes (Einav et al., 2003 ; UNEP, 2001).

I.4 Étapes Générales du Processus de Dessalement

Quel que soit le procédé, le dessalement comprend quatre étapes (Maurel, 2006 ; Lattemann & Höpner, 2008) :

1. Prise et alimentation en eau de mer : captage par prises côtières ou forages marins, acheminement vers l'installation. La profondeur et la localisation de la prise influencent la qualité de l'eau d'alimentation.
2. Prétraitement : protection des équipements et membranes contre le colmatage, l'entartrage et la prolifération biologique. Comprend coagulation-floculation, filtration multicouche, chloration/déchloration, antitartres.
3. Procédé de dessalement : séparation des sels par OI ou procédé thermique, produisant simultanément eau douce et saumure concentrée.
4. Post-traitement : reminéralisation, ajustement du pH (chaux + CO₂) pour rendre l'eau compatible avec les réseaux de distribution et les normes de potabilité.

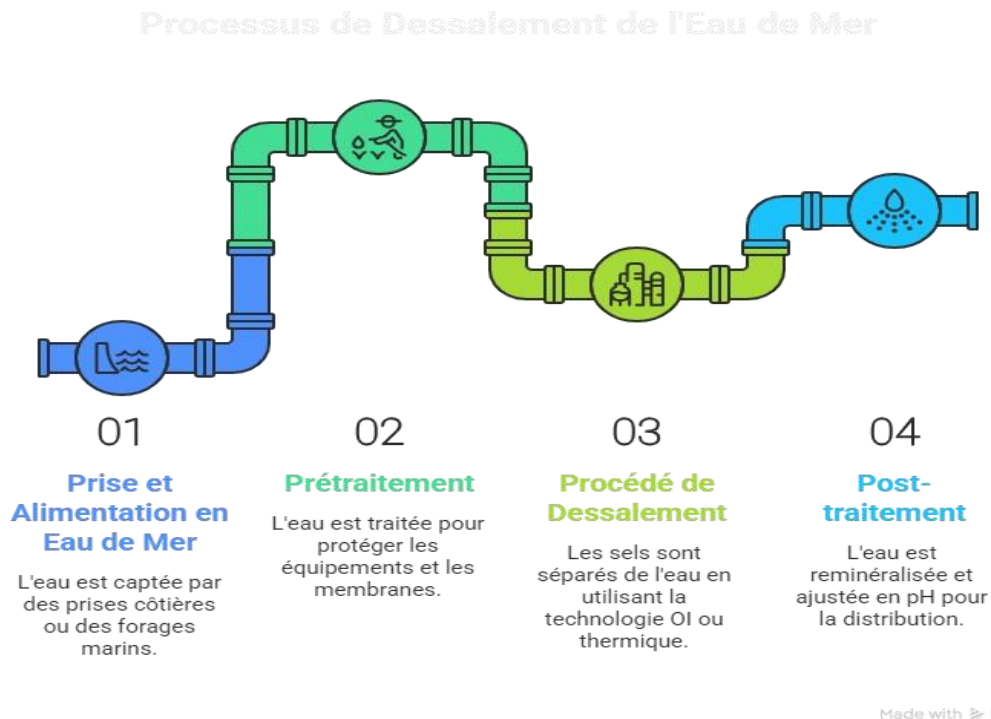


Figure I.02 : Schéma général du procédé de dessalement de l'eau. Les quatre grandes étapes génèrent chacune des flux susceptibles d'impacter l'environnement marin, la saumure étant le rejet le plus problématique.

I.5 Production de Saumure : Sous-Produit Inévitable

Le dessalement génère inévitablement un concentrat salin. Sa salinité peut atteindre 60 à 80 g/L pour l'OI, associée à une température élevée pour les procédés thermiques. À l'échelle mondiale, les installations produisent collectivement plus de 141,5 millions de m³ de saumure par jour — soit 1,5 fois le volume d'eau douce produit. En Algérie, les 13 grandes stations côtières génèrent collectivement plus de 5 millions de m³ de saumure par jour rejetés dans les eaux côtières

méditerranéennes, dont la richesse biologique remarquable en fait un milieu particulièrement vulnérable (UNEP, 2001 ; Lattemann & Höpner, 2008 ; Drouiche, 2021).

I.6 définition et origine de la saumure

I.6.1 Définition de la Saumure

La saumure est un effluent liquide à forte salinité issu du procédé de dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Elle correspond à la fraction d'eau non convertie en eau douce lors de la séparation, et se caractérise par une concentration en sels dissous totaux (TDS) généralement deux fois supérieure à celle de l'eau de mer d'alimentation, pouvant dépasser 80 g/L selon le taux de récupération et la technologie employée.

La saumure peut également contenir des résidus de produits chimiques utilisés lors des étapes de prétraitement et d'exploitation : antitartres, biocides, agents de coagulation et produits de nettoyage des membranes. Ces composés lui confèrent un potentiel impact environnemental significatif sur les milieux récepteurs, bien au-delà de la seule augmentation de la salinité (Drouiche, 2021 ; Agourar & Bengriche, 2018).

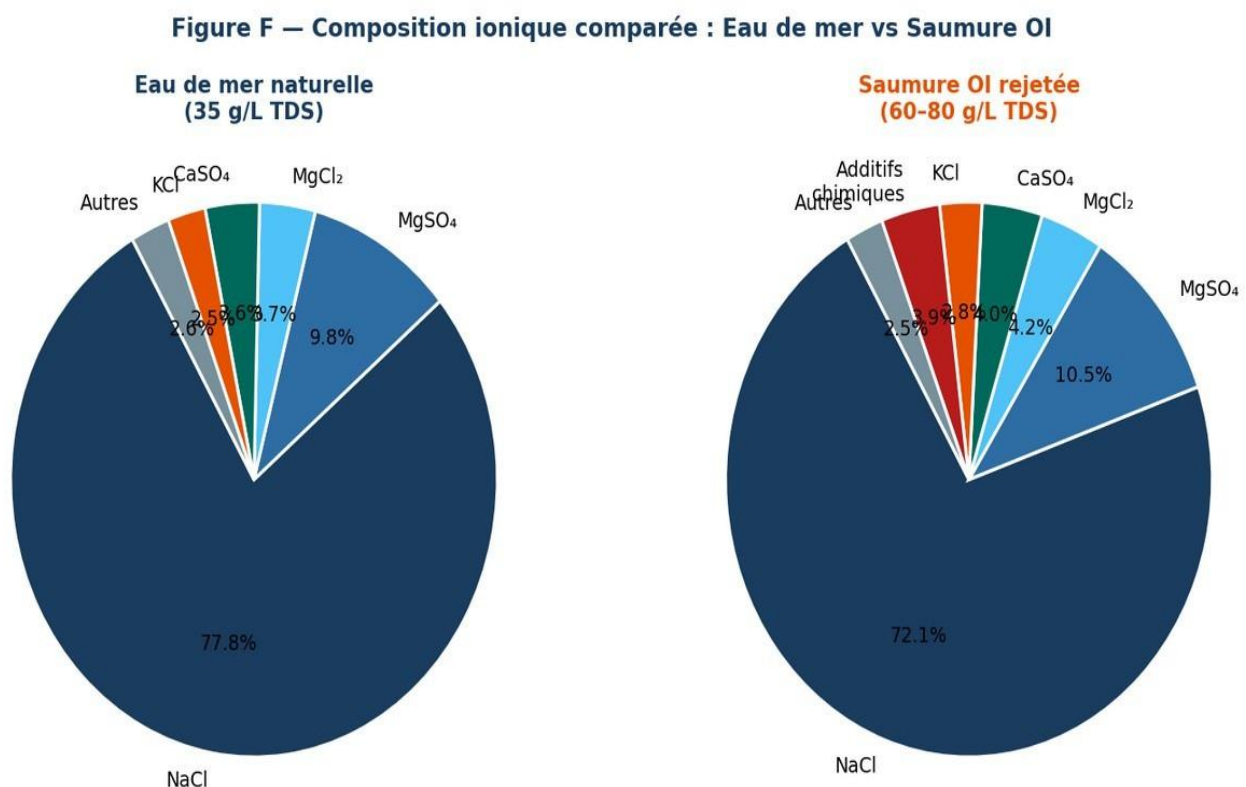


Figure I.03 : Composition ionique comparée de l'eau de mer naturelle et de la saumure OI rejetée.

I.6.2 Origine de la Saumure selon les Technologies

La saumure résulte directement du procédé de séparation. Dans les stations OI, elle correspond au concentrat en sortie des membranes — contenant la majorité des sels initiaux et les résidus chimiques du prétraitement. Pour les stations thermiques (MSF, MED), elle est issue de l'évaporation partielle de l'eau de mer, laissant un résidu liquide à salinité élevée et à température supérieure à celle du milieu récepteur.

Chapitre I : impact de la saumure sur l'environnement marin

Ainsi, l'origine de la saumure est intrinsèquement liée au procédé et aux conditions d'exploitation de la station (Bengriche et al., 2017 ; Drouiche, 2021 ; UNEP, 2001).

I.7 caractéristiques générales de la saumure

La saumure produite par les stations de dessalement possède des caractéristiques physico-chimiques distinctes qui la différencient nettement de l'eau de mer naturelle et conditionnent l'intensité de ses impacts écologiques sur les milieux récepteurs.

Tableau 01 : Comparaison des paramètres physico-chimiques : eau de mer naturelle vs saumure rejetée

Paramètre	Eau de mer naturelle	Saumure OI	Saumure thermique (MSF/MED)	Références
Salinité (g/L)	≈ 35	60 – 80	45 – 65	Einav et al., 2003 ; UNEP, 2001
TDS (mg/L)	≈ 35 000	50 000 – 85 000	40 000 – 70 000	Drouiche, 2021
Densité (kg/L)	≈ 1,025	1,035 – 1,045	1,030 – 1,040	Lattemann & Höpner, 2008
Température	Naturelle (20–28 °C)	≈ ambiante (+1–3 °C)	Élevée (+5 à +15 °C)	Einav et al., 2003
pH	7,8 – 8,3	6,5 – 8,0	7,5 – 8,5	Lattemann & Höpner, 2008
Oxygène dissous (mg/L)	6 – 9	3 – 6 (réduit)	< 3 (très réduit)	Habet, 2010 ; UNEP, 2001
Mg ²⁺ (mg/L)	≈ 1 290	2 200 – 3 800	1 800 – 3 200	Einav et al., 2003
Produits chimiques	Absents / naturels	Antitartres, biocides, résidus bisulfite	Biocides, produits de corrosion, résiduel	Einav et al., 2003 ; Lattemann, 2008
Comportement dans le milieu	en mélange par les courants	panache dense de fond hypersalin	éche chaud dense	et Lattemann & Höpner, 2008
Impact écologique	Équilibre naturel	ss osmotique et chimique	Stress thermique, osmotique et chimique	UNEP, 2001 ; Drouiche, 2021

Sources : Einav et al., 2003 ; Lattemann & Höpner, 2008 ; UNEP, 2001 ; Habet, 2010 ; Drouiche,

**Figure A — Comparaison des paramètres physico-chimiques :
Eau de mer naturelle vs Saumure rejetée**

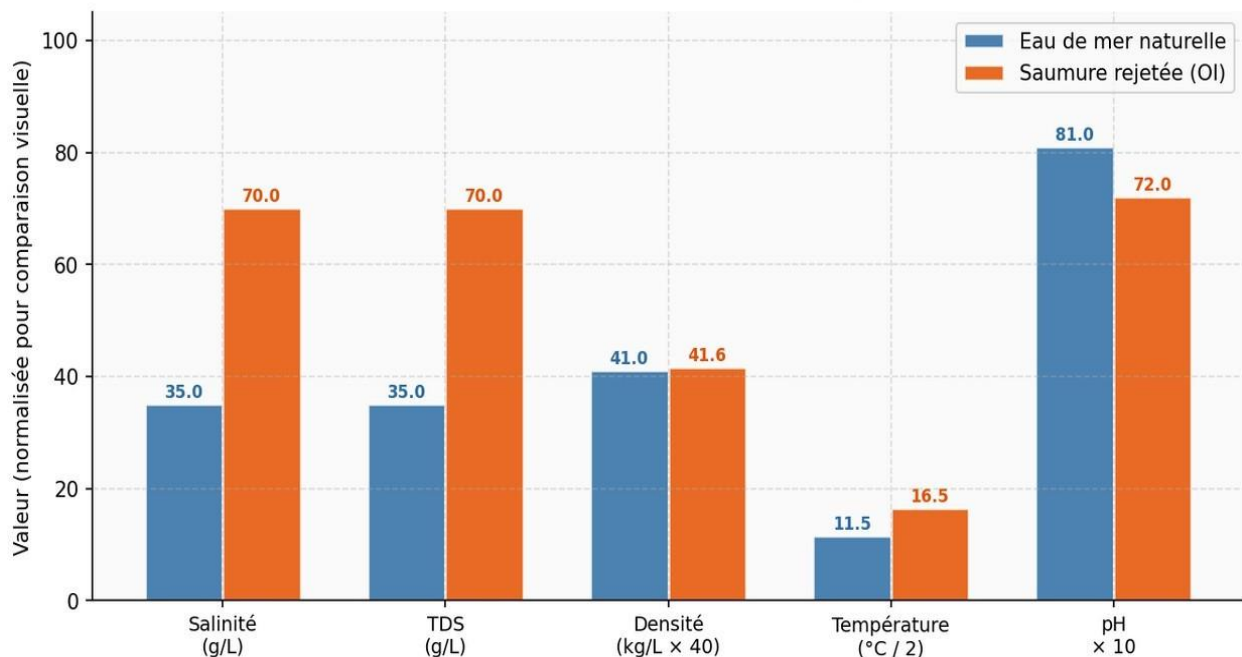


Figure I. 4 : Comparaison visuelle des paramètres physico-chimiques clés de l'eau de mer naturelle (bleu) et de la saumure OI (orange). Tous les paramètres de stress sont systématiquement plus élevés dans la saumure rejetée.

I.7.1 Salinité et Densité

La salinité est le paramètre le plus caractéristique de la saumure. Avec 60 à 80 g/L de TDS

— près du double de l'eau de mer (≈ 35 g/L) — la saumure constitue un environnement hypersalin hostile à la grande majorité des espèces marines côtières méditerranéennes dont les plages de tolérance s'étendent généralement entre 33 et 40 g/L (Einav et al., 2003 ; Lattemann & Höpner, 2008).

La densité accrue (jusqu'à 1,040 kg/L contre 1,025 kg/L) est un paramètre hydrodynamique déterminant : la saumure s'enfonce vers le fond marin et s'accumule en couche de fond, créant un panache hypersalin particulièrement néfaste pour les organismes benthiques sessiles qui ne peuvent pas fuir. Dans les zones à faible hydrodynamisme, ce panache peut persister longtemps, amplifiant les impacts sur la macrofaune benthique et les herbiers marins.

I.7.2 Température et pH

Dans les procédés thermiques (MSF, MED), la saumure est rejetée à +5 à +15 °C au-dessus de la température ambiante. Cette élévation thermique crée un stress additionnel synergique avec le stress osmotique — les effets combinés chaleur et salinité élevée étant documentés comme plus dommageables que chaque facteur pris isolément. La température élevée réduit également la solubilité de l'oxygène,

Chapitre I : impact de la saumure sur l'environnement marin

contribuant aux phénomènes d'hypoxie benthique.

Le pH de la saumure varie entre 6,5 et 8,5 selon les produits chimiques utilisés. L'utilisation d'acides pour le contrôle du tartre peut abaisser localement le pH, perturbant les processus de calcification des coraux et des mollusques, et l'équilibre acido-basique interne des poissons (Habet, 2010 ; Drouiche, 2021).

I.7.3 Oxygène Dissous

La solubilité de l'oxygène diminue avec l'augmentation de la salinité et de la température. La saumure rejetée présente une teneur en oxygène dissous réduite (parfois < 3 mg/L pour les saumures thermiques chaudes, contre 6–9 mg/L pour l'eau de mer naturelle). Cette réduction peut créer des conditions hypoxiques dans les zones d'accumulation de la saumure, menaçant directement la respiration des organismes aérobies.

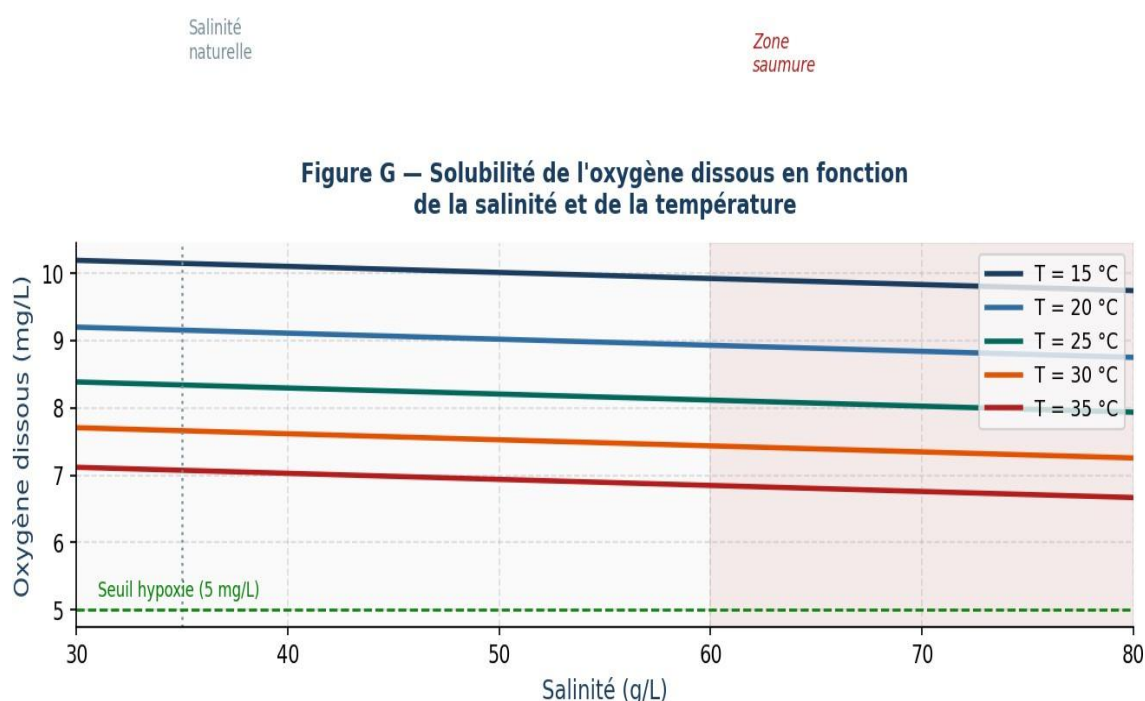


Figure I.05 : Solubilité de l'oxygène dissous en fonction de la salinité et de la température. La zone rouge (saumure OI 60–80 g/L) présente des niveaux d'oxygène souvent inférieurs au seuil d'hypoxie de 5 mg/L lors des épisodes de chaleur estivale.

I.7.4 Produits Chimiques Résiduels

Au-delà des ions inorganiques, la saumure contient divers résidus chimiques issus du prétraitement et de l'exploitation. Ces composés — antitartres, biocides, sous-produits de chloration, métaux de corrosion — peuvent exercer des effets toxiques sur les organismes marins même à des concentrations

traces et perturber les équilibres écochimiques des zones de rejet (Lattemann & Höpner, 2008 ; Einav et al., 2003 ; UNEP, 2001).

I.8 Différence entre l'eau de mer naturelle et la saumure rejetée

I.8.1 Paramètres Physico-Chimiques

L'eau de mer naturelle et la saumure rejetée présentent des différences significatives sur le plan physico-chimique et sur le plan de leurs effets sur les écosystèmes. L'eau de mer naturelle possède une salinité stable d'environ 35 g/L avec un équilibre naturel avec les écosystèmes. En revanche, la saumure se caractérise par une salinité de 60 à 80 g/L, une densité accrue favorisant son accumulation en fond de mer, et la présence de résidus de produits chimiques anthropiques absents de l'eau de mer naturelle. Ces différences expliquent le fort potentiel d'impact écologique de la saumure sur les écosystèmes marins côtiers (Einav & Lokiec, 2003 ; Habet, 2010 ; Drouiche, 2021).

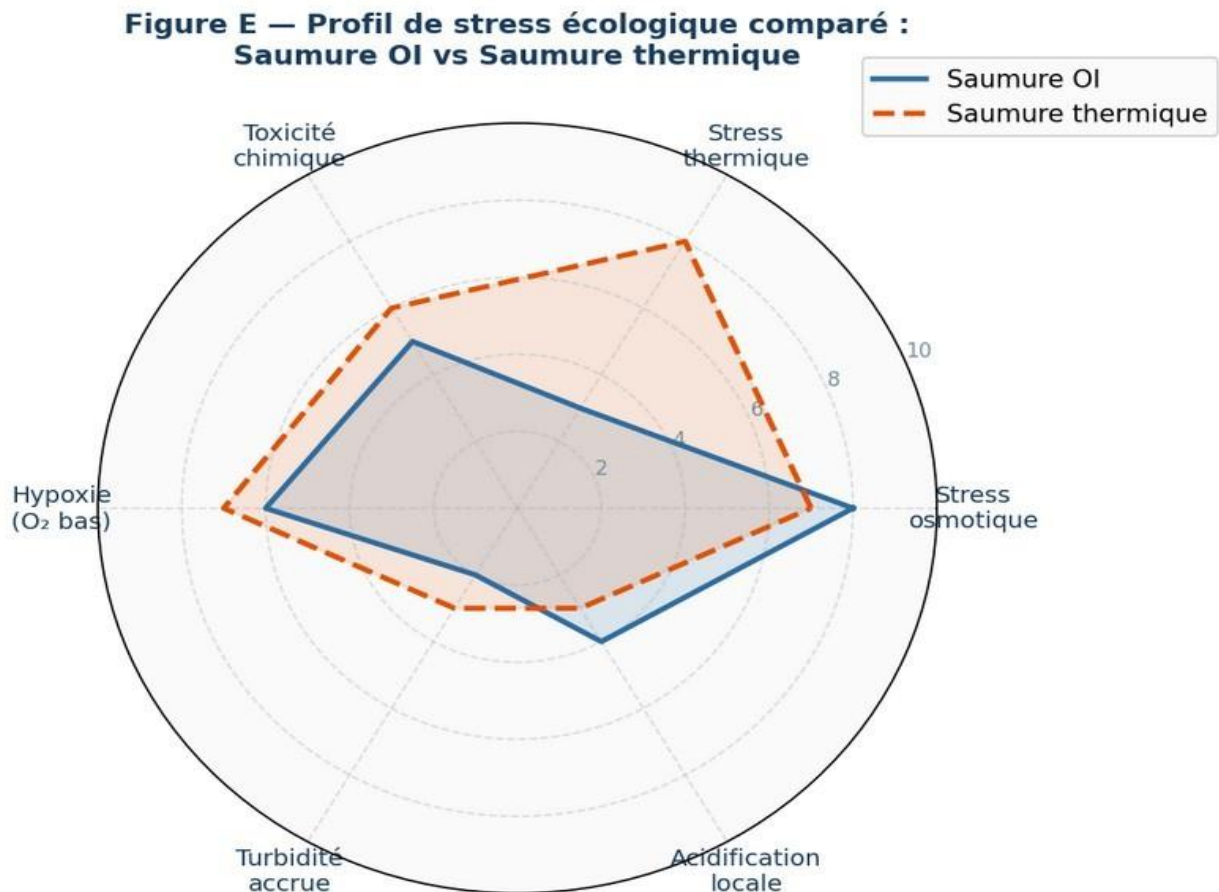


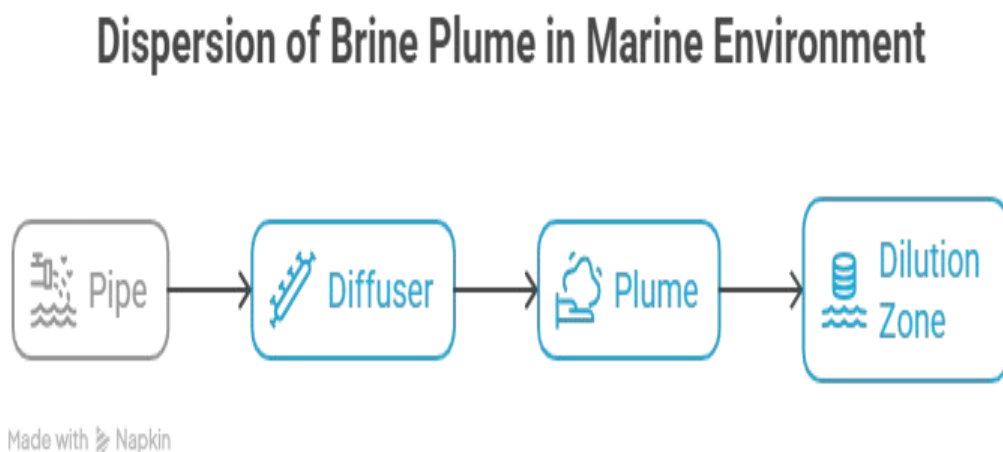
Figure I.06 : Profil de stress écologique comparé (saumure OI vs thermique). La saumure thermique présente un stress thermique et une toxicité chimique plus importants (chlore résiduel), tandis que la saumure OI génère un stress osmotique maximal.

I.9 Dispersion du panache de saumure dans le milieu marin

I.9.1 Formation du Panache de Saumure (Brine Plume)

Le rejet de saumure dans le milieu marin entraîne la formation d'un panache dense appelé « brine plume ». La densité plus élevée de la saumure joue un rôle déterminant : contrairement aux effluents plus légers qui remontent en surface, la saumure s'écoule vers le fond marin en raison de sa surcharge densimétrique et se propage horizontalement selon la pente bathymétrique et les courants de fond (Lattemann & Höpner, 2008).

Après son rejet initial, la saumure subit différents processus physiques : mélange turbulent avec l'eau de mer, diffusion moléculaire, convection. Ces processus contribuent progressivement à la dilution du



panache. Toutefois, leur intensité dépend fortement des caractéristiques du site de rejet — circulation des masses d'eau, topographie du fond, dynamique des courants (Einav & Lokiec, 2003).

Figure I. 07 : Schéma de dispersion du panache de saumure dans le milieu marin. La densité supérieure de la saumure dirige le panache vers le fond avant dilution progressive par les processus hydrodynamiques.

Dans certaines zones à faible circulation hydrodynamique — caractéristiques de nombreuses baies du littoral algérien (golfe d'Oran, baie de Bou Ismaïl, golfe de Béjaïa) — le panache peut rester concentré à proximité du point de rejet pendant une période prolongée provoquant une augmentation locale et persistante de la salinité de fond (Lattemann & Höpner, 2008).

I.9.2 Dilution de la Saumure dans le Milieu Marin

La dilution constitue le principal mécanisme naturel atténuant les effets de la saumure. Elle correspond au mélange progressif de la saumure avec l'eau de mer environnante, régi par les gradients de densité et les forces turbulentes. L'utilisation de diffuseurs multijets permet d'accélérer significativement

Chapitre I : impact de la saumure sur l'environnement marin

la dilution initiale en augmentant la surface de contact saumure–eau de mer (Roberts et al., 2010).

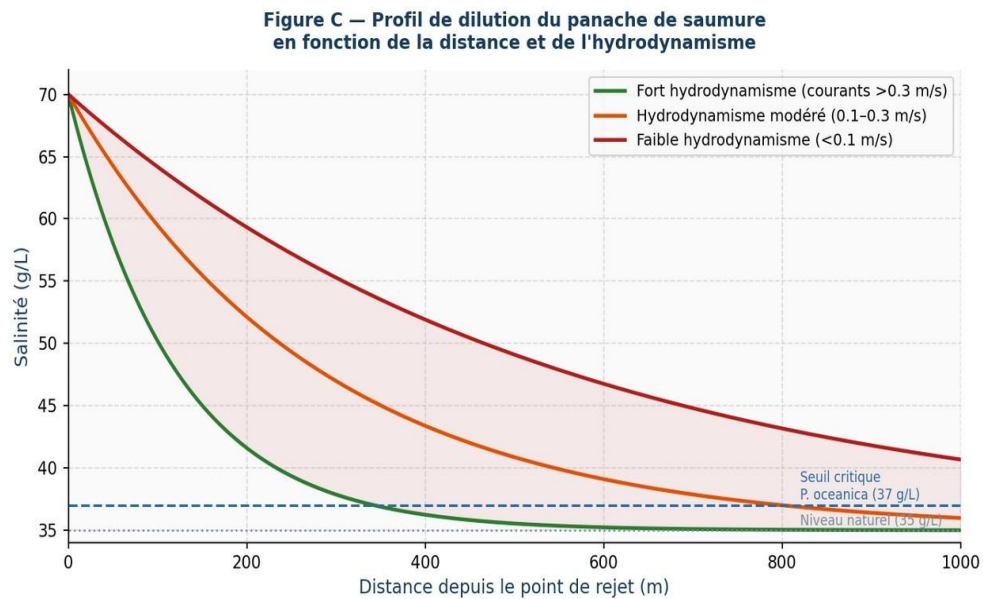


Figure I.08 : Profil de dilution du panache de saumure selon la distance au point de rejet et l'hydrodynamisme local. Dans les zones à faible hydrodynamisme ($<0,1$ m/s), le seuil critique pour *Posidonia oceanica* (37 g/L, ligne bleue) peut être dépassé jusqu'à 600 m du rejet, une distance susceptible d'affecter des habitats marins sensibles.

Dans les zones à fort hydrodynamisme (courants $> 0,3$ m/s), le seuil critique de 37 g/L pour *Posidonia oceanica* est généralement atteint à moins de 200 m du point de rejet. En revanche, dans les zones peu dynamiques, ce même seuil peut persister à plus de 600 m, exposant les herbiers et la macrofaune benthique à un stress osmotique chronique (Einav & Lokiec, 2003 ; Lattemann & Höpner, 2008).

I.9.3 Influence des Courants Marins sur la Dispersion

Les courants marins jouent un rôle central dans la dispersion du panache de saumure. La vitesse, la direction et la variabilité temporelle des courants influencent fortement la trajectoire et l'étendue spatiale du panache (Lattemann & Höpner, 2008). Les courants de surface peuvent déplacer le panache sur plusieurs centaines de mètres, tandis que les courants profonds favorisent le mélange vertical et la dilution à différentes couches d'eau (Einav & Lokiec, 2003).

Sur le littoral algérien, les courants de surface suivent généralement une direction Est–Ouest (Courant Algérien, 0,10–0,40 m/s), favorable à la dispersion de la saumure. Toutefois, dans les baies semi-fermées, la circulation locale peut être plus faible et irrégulière, augmentant le risque d'accumulation. La variabilité saisonnière est également importante : en été, la stratification thermique limite les échanges verticaux et réduit la dilution, précisément lorsque la production de saumure est maximale (Roberts et al., 2010).

I.9.4 Profondeur et Hydrodynamisme

Chapitre I : impact de la saumure sur l'environnement marin

La profondeur et l'hydrodynamisme local déterminent conjointement le comportement du panache. Dans les zones profondes (> 20 m), la saumure se stabilise en couche de fond avec dilution lente. Dans les zones peu profondes (< 10 m), le mélange vertical est plus rapide mais expose une plus grande diversité d'habitats aux variations de salinité. L'hydrodynamisme (courants, vagues, turbulences) conditionne directement la vitesse de dilution : les zones fortement brassées limitent les concentrations locales, tandis que les zones semi-fermées favorisent l'accumulation.

Des études montrent que la combinaison densité du panache, profondeur et conditions hydrodynamiques détermine la taille et la trajectoire du panache ainsi que la durée des concentrations élevées (Giwa et al., 2017 ; Lattemann & Höpner, 2008). La modélisation hydrodynamique numérique est donc essentielle pour prédire les zones à risque et optimiser le positionnement des diffuseurs.

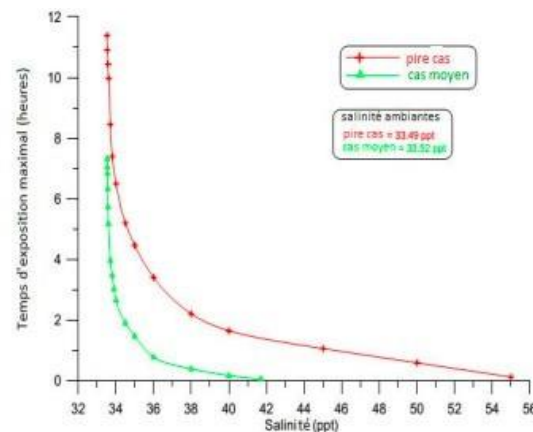


Figure I.09 : Temps d'exposition des organismes marins au panache de saumure rejetée en conditions défavorables et moyennes. La durée d'exposition est directement corrélée à la sévérité des impacts biologiques. (Seawater Concentrate Management, 2011)

La figure 08 illustre que dans les conditions défavorables (faible hydrodynamisme, été), les organismes proches du rejet peuvent être exposés à des salinités supérieures à 42 g/L pendant plusieurs heures par jour. Cette exposition chronique est particulièrement préoccupante pour les espèces sessiles comme les herbiers de *Posidonia oceanica*, qui ne peuvent pas fuir et subissent un stress osmotique cumulatif pouvant conduire à leur nécrose irréversible.

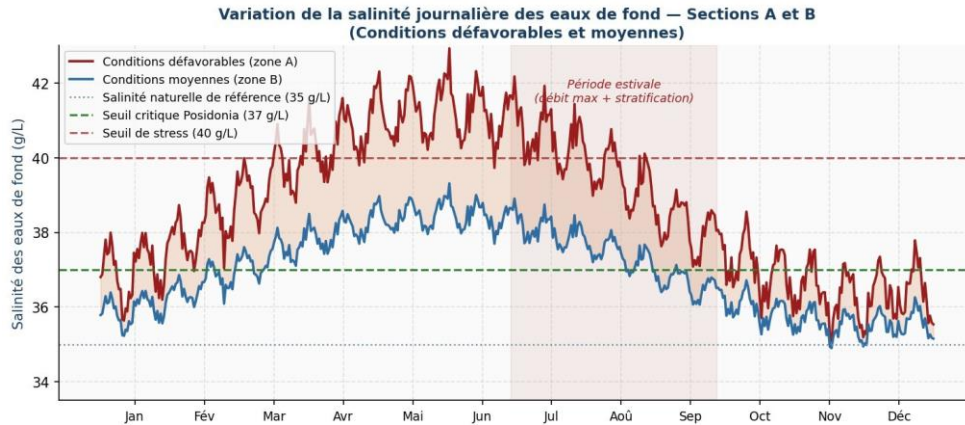


Figure I.10 : Variation de la salinité journalière des eaux de fond : sections A (zone proximale, conditions défavorables) et B (zone distale, conditions moyennes). La période estivale critique (zone rouge) correspond au cumul de la production maximale de saumure et de la stratification thermique qui limite la dilution.

Source : Seawater Concentrate Management, 2011.

La figure 09 révèle une saisonnalité marquée : les pics de salinité de fond sont systématiquement plus élevés en été (juillet–septembre), précisément lorsque la demande en eau potable est maximale, que les stations fonctionnent à pleine capacité, et que la stratification thermique de la colonne d'eau limite les échanges verticaux. Cette coïncidence entre production maximale de saumure et dilution minimale constitue le scénario d'impact le plus défavorable pour les écosystèmes côtiers algériens (Roberts et al., 2010 ; Giwa et al., 2017).

I.10 Effets de la saumure (salinité et température) sur le biote marin

Les effets de la saumure sur les organismes marins s'exercent à travers plusieurs vecteurs simultanés : stress osmotique (salinité), stress thermique (température pour les effluents thermiques), stress hypoxique (oxygène dissous réduit), et toxicité chimique (substances des procédés). Ces facteurs agissent de manière synergique, leur impact combiné étant documenté comme plus sévère que la somme de leurs effets individuels.

Chapitre I : impact de la saumure sur l'environnement marin

Tableau 02 : Seuils de tolérance à la salinité des principales espèces marines côtières méditerranéennes et algériennes

Espèce / Groupe	Salinité optimale (g/L)	Seuil de stress (g/L)	Seuil de mortalité (g/L)	Sensibilité	Références
Posidonia oceanica (herbier)	33 – 38	> 39 – 40	> 42	Très élevée	Marín-Guirao et al., 2011
Cymodocea nodosa (herbier)	33 – 39	> 41	> 45	Élevée	Drouiche, 2021
Zostera noltii (herbier)	33 – 38	> 40	> 44	Élevée	Einav et al., 2003
Coraux tropicaux (Acropora)	32 – 37	> 39	> 43	Très élevée	Roberts et al., 2010
Larves de poissons côtiers	33 – 38	> 40	> 48	Élevée	UNEP, 2001
Invertébrés benthiques	33 – 40	> 42	> 55	Modérée	Einav & Lokiec, 2003
Amphibalanus improvisus	20 – 35	> 38	> 50	Modérée– élevée	Einav et al., 2003 ; Habet, 2010
Sepia apama (embryons)	33 – 37	> 39	> 44	Élevée	Du Pavillon & Gillanders, 2009
Communautés microbiennes	30 – 40	> 50	> 70	Faible– modérée	Belkin et al., 2015

Sources : Marín-Guirao et al., 2011 ; Roberts et al., 2010 ; Einav et al., 2003 ; Du Pavillon & Gillanders, 2009 ; Belkin et al., 2015

I.10.1 Effets de la Salinité et de la Température

Une augmentation significative de la salinité provoque un stress osmotique chez les organismes marins, perturbant leur croissance et leur reproduction. Le mécanisme fondamental est la déshydratation cellulaire par osmose : dans un milieu hypersalin, les cellules perdent de l'eau vers le milieu extérieur plus concentré, entraînant une perturbation du métabolisme intracellulaire et des processus enzymatiques. De même, une élévation de la température locale réduit la survie des espèces sensibles, en particulier les juvéniles et les organismes benthiques à faible mobilité (Einav & Lokiec, 2003 ; Habet, 2010).

Ces effets combinés sont particulièrement notables à proximité des points de rejet, où la saumure reste concentrée et limite le brassage. La perturbation des conditions physico-chimiques entraîne une diminution de la biodiversité locale et une modification structurelle des communautés marines (Drouiche,

2021 ; UNEP, 2001).

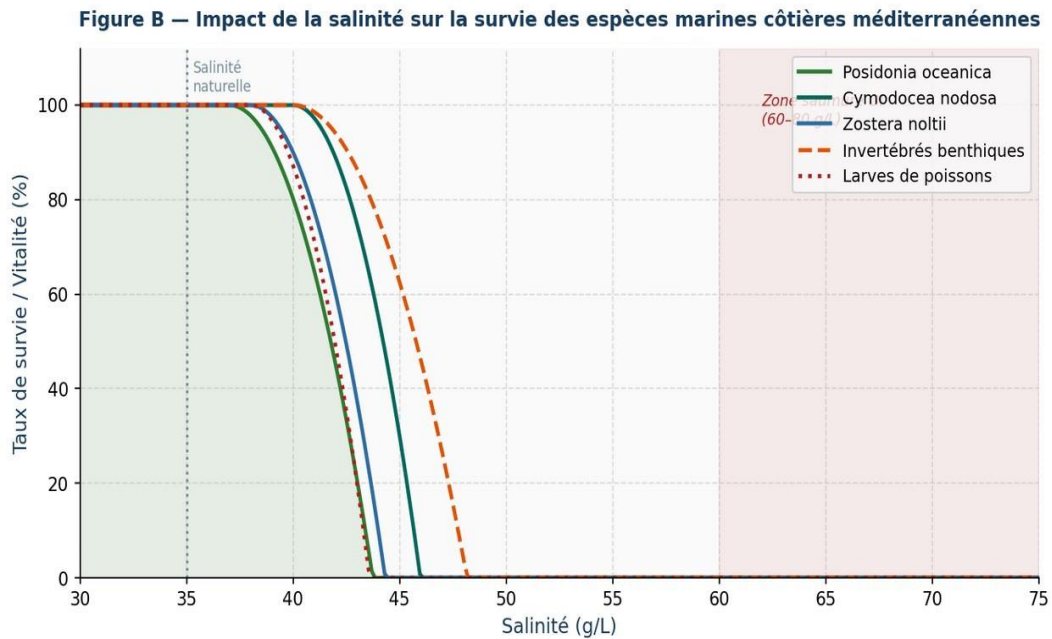


Figure I.11 : Courbes de tolérance à la salinité des principales espèces marines côtières méditerranéennes. La zone rouge (saumure OI, 60–80 g/L) provoque une mortalité quasi-totale pour toutes les espèces. La ligne pointillée marque la salinité naturelle de référence (35 g/L).

Ces courbes de tolérance mettent en évidence l'extrême vulnérabilité des espèces marines côtières à l'hypersalinité de la saumure OI. *Posidonia oceanica*, espèce la plus sensible, voit sa vitalité chuter de 100 % à pratiquement zéro entre 35 g/L et 50 g/L, avec une zone critique dès 39 g/L. Les larves de poissons côtiers, biologiquement plus fragiles que les adultes en raison de leurs systèmes osmorégulateurs immatures, présentent une sensibilité similaire. Seules les communautés microbiennes maintiennent une vitalité partielle ($\approx 25\%$) à 80 g/L, mais avec une composition taxonomique profondément modifiée — perdant ainsi leur rôle fonctionnel dans les cycles biogéochimiques côtiers (Belkin et al., 2015).

I.10.2 Études sur les Herbiers Marins : *Posidonia*, *Cymodocea* et *Zostera*

Des expériences contrôlées en laboratoire et en mésocosme ont montré que les herbiers marins méditerranéens sont particulièrement sensibles aux variations de salinité. *Posidonia oceanica*, espèce endémique et ingénieuse des écosystèmes côtiers, voit sa photosynthèse réduite de 40 % après 15 jours d'exposition à 39 PSU. Au-delà de 43 PSU, on observe une nécrose des méristèmes et une mortalité irréversible. *Cymodocea nodosa* et *Zostera noltii*, toutes deux présentes sur le littoral algérien, présentent une vulnérabilité similaire aux élévations de salinité

dépassant 41–44 g/L, affectant leur rôle essentiel de stabilisation des sédiments et de nurserie pour la faune marine (Einav & Lokiec, 2003 ; Habet, 2010 ; Marín-Guirao et al., 2011).



Figure I .12 : *Cymodocea nodosa* (gauche) et *Zostera noltii* (droite), deux herbiers marins présents sur le littoral algérien, particulièrement vulnérables aux élévations de salinité induites par les rejets de saumure (seuil de stress > 41 g/L).

Comme l'ont confirmé les études, l'exposition simultanée à des niveaux élevés de salinité et de température peut entraîner une réduction significative de la croissance et du développement larvaire de certaines espèces marines, telles que la balane *Amphibalanus improvisus*. De plus, des variations de salinité peuvent altérer la structure silicique des diatomées, affectant leur rôle biologique dans les écosystèmes marins (Einav & Lokiec, 2003 ; Habet, 2010 ; Drouiche, 2021).



Figure I. 13 : *Amphibalanus improvisus*, crustacé cirripède sessile dont les larves présentent une forte sensibilité aux variations osmotiques. Mortalité totale observée au-delà de 50 g/L de salinité.

Des travaux ont montré que des conditions d'hyper-salinité ont des effets négatifs marqués sur le développement embryonnaire de certaines espèces marines. Chez la seiche géante australienne *Sepia apama*, une diminution du taux de survie des embryons a été observée lors d'expositions à des salinités supérieures à 42 g/L, accompagnée d'une réduction du poids moyen et de la longueur du manteau (Du Pavillon & Gillanders, 2009).

Par ailleurs, des essais de toxicité de l'effluent entier (Whole Effluent Toxicity, WET) réalisés sur des espèces locales dans le cadre de l'étude d'impact de l'usine SWRO d'Olympic Dam (Australie) ont montré que la toxicité des rejets était principalement liée à l'augmentation de la salinité plutôt qu'aux substances chimiques spécifiques (Hobbs et al., 2008). D'autres études ont cependant montré une absence d'impact significatif sur 18 espèces marines communes dans des conditions de dilution favorable (Le Page, 2005), illustrant l'importance du contexte hydrodynamique local.

Des études récentes menées en mésocosme sur les communautés microbiennes côtières de la Méditerranée orientale ont mis en évidence des réponses écologiques notables après environ 12 jours

Chapitre I : impact de la saumure sur l'environnement marin

d'exposition à des salinités dépassant de 5 % et 15 % la valeur naturelle : augmentation de la chlorophylle a, hausse de la productivité primaire, et modification de la structure taxonomique des populations microbiennes. Ces changements dépendent de la composition initiale des communautés (influence saisonnière) et du niveau d'enrichissement en salinité (Belkin et al., 2015).



Figure I.14 : Comparaison entre la salinité naturelle de l'eau de mer et la salinité de la saumure rejetée, et impact potentiel sur les organismes marins selon leur niveau de tolérance spécifique.

I.11 Impact des substances chimiques issues du procédé de dessalement

I.11.1 Contexte Général

Les connaissances relatives aux effets des substances chimiques rejetées avec la saumure dans le milieu marin demeurent encore limitées. Cette lacune s'explique par la complexité des conditions de rejet, marquées par la combinaison de plusieurs facteurs de stress simultanés : augmentation de la salinité, variations de température, présence de produits chimiques résiduels, et rejet concomitant d'autres effluents anthropiques. Cette superposition complique l'interprétation des études et rend difficile l'établissement de relations cause-effet concernant l'impact spécifique de chaque composé chimique (Lattemann & Höpner, 2008 ; Einav et al., 2003 ; UNEP, 2001).

Par ailleurs, de nombreux agents chimiques utilisés dans les procédés de dessalement présentent un caractère confidentiel lié aux brevets industriels (coagulants, polymères), ce qui complique davantage l'évaluation des risques écotoxicologiques et nécessite des études spécifiques sur les espèces locales.

Tableau 03 : Contaminants et produits chimiques issus des procédés de dessalement (OI vs thermique), leur utilisation et leur présence dans la saumure rejetée

Substance / Produit	ôle dans le procédé	OI	ermiq ue	Références
Polyphosphates phosphonates	/Inhibiteurs de tartre (antiscalants)	Oui	Oui	Lattemann & Höpner, 2008 ; UNEP, 2001

Chapitre I : impact de la saumure sur l'environnement marin

Polymères organiques (acide polyacrylique, polymaléique)	Antiscalants membranaires	Oui	Peu	Einav et al., 2003
Sels de fer aluminium (Fe, Al)	Coagulants / prétraitement	–Oui	Non	Drouiche, 2021
Chlore (Cl₂) et hypochlorite	Biocide (anti-biofouling)	Oui → neutralisé par bisulfite	Oui résidu possible dans rejet	–Einav et al., 2003 ; Taylor, 2006
Métabisulfite de sodium (Na₂S₂O₅)	Déchloration neutralise le Cl ₂	–Oui	Non	Lattemann & Höpner, 2008
Bromoforme (CHBr₃)	Sous-produit : Cl ₂ + Br [–] de l'eau de mer	Possible	Oui	Taylor, 2006 ; Lattemann, 2008
Cu, Ni, Cr, Mo (métaux traces)	Corrosion acier inoxydable et alliages	Traces	Oui échangeurs s cuivre/nickel	–Chesher, 1971 ; Lin et al., 2013
Polyéthylène glycol agents anti-mousse	Antimousse, nettoyage membranes	Peu	Oui	UNEP, 2001
Carbonate de calcium (CaCO₃)	Ajustement pH / reminéralisation	Oui	Oui	Drouiche, 2021
Chaleur (effluent thermique)	Sous-produit procédé thermique	Non	Oui – +5 à +15 °C	Einav et al., 2003

Sources : Lattemann & Höpner, 2008 ; UNEP, 2001 ; Einav et al., 2003 ; Chesher, 1971 ; Lin et al., 2013 ; Taylor, 2006 ; Drouiche, 2021

I.11.2 Le Chlore et ses Sous-Produits

Le chlore est couramment utilisé pour limiter le biofouling des conduites, échangeurs et systèmes de prise d'eau. Dans les stations OI, le chlore du prétraitement est neutralisé par le bisulfite de sodium

Chapitre I : impact de la saumure sur l'environnement marin

avant les membranes. En revanche, dans les unités thermiques et les centrales électriques colocalisées, la saumure peut contenir des concentrations mesurables de chlore résiduel.

Une fois rejeté en mer, le chlore résiduel réagit avec les ions bromure naturellement présents dans l'eau de mer, formant des sous-produits bromés — notamment le bromoforme (CHBr_3) — reconnus pour leur toxicité élevée. Ces composés peuvent bioaccumuler dans les tissus des organismes marins. Une bioaccumulation du bromoforme a notamment été documentée dans le foie du bar européen (*Dicentrarchus labrax*), et des effets toxiques ont été observés chez la dorade royale (*Sparus aurata*), le mulot (*Mugil cephalus*) et plusieurs invertébrés benthiques (Taylor, 2006 ; Einav et al., 2003 ; Lattemann & Höpner, 2008).

I.11.3 Les Produits de Corrosion — Métaux Traces

Les produits de corrosion issus des installations de dessalement thermique, en particulier le cuivre des échangeurs de chaleur, peuvent s'accumuler à proximité des émissaires. Le cuivre peut affecter les échinodermes, les tuniciers, les herbiers marins (*Posidonia oceanica*), ainsi que des communautés microbiennes côtières (Chesher, 1971 ; Brand et al., 1986 ; Einav et al., 2003).

Des études récentes ont rapporté que le rejet de saumure provenant de deux usines SWRO à Taïwan était associé à des concentrations de cuivre et de zinc supérieures aux niveaux naturels dans les sédiments et les bivalves, pouvant entraîner un stress biochimique et une accumulation dans la chaîne trophique (Lin et al., 2013). Ces observations soulignent que les rejets localisés de métaux peuvent exercer des effets combinés avec la salinité et la température élevées, aggravant le risque écologique global.

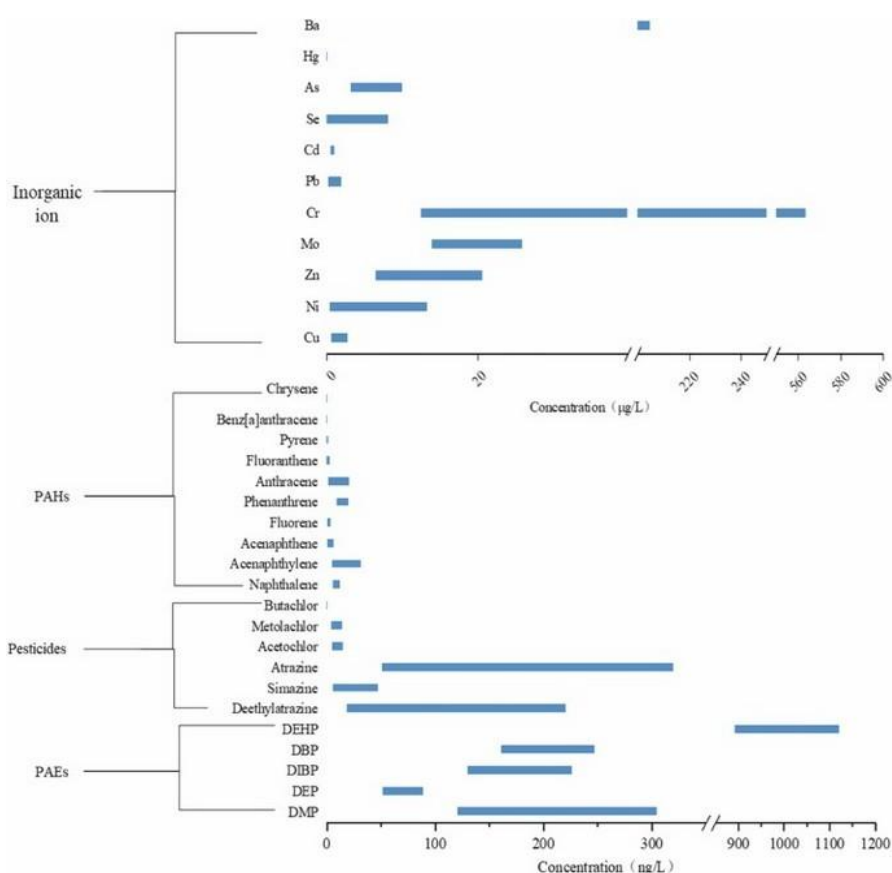


Figure 1.15 : Concentrations des polluants inorganiques et organiques dans la saumure de dessalement comparées aux valeurs de référence de l'eau de mer naturelle. Certains métaux traces dépassent significativement les valeurs naturelles dans les zones de rejet.

I.11.4 Le Métabisulfite de Sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$)

Le métabisulfite de sodium est employé dans les installations OI pour la déchloration et le nettoyage des membranes. Bien que son usage soit généralement ponctuel, des rejets accidentels dans le milieu marin peuvent provoquer une diminution locale du pH et une réduction de l'oxygène dissous, conduisant à des conditions d'acidification et d'hypoxie.

Des bioessais de toxicité réalisés sur le poisson-lézard *Synodus* aux Îles Canaries ont mis en évidence une forte sensibilité à de brèves expositions, avec une mortalité rapide aux concentrations croissantes — soulignant le risque écologique potentiel des rejets non contrôlés de ce composé en zones côtières (Lattemann & Höpner, 2008 ; Einav et al., 2003).



Figure I.15 : Synodus sp. (poisson-lézard), espèce utilisée dans les bioessais de toxicité au métabisulfite de sodium aux îles Canaries. Sa forte sensibilité illustre le risque des rejets accidentels en zones côtières peu profondes.

I.11.5 Contaminants Émergents et Différences selon les Technologies

L'industrie du dessalement évolue vers des procédés utilisant des produits chimiques à moindre toxicité, en accord avec les principes de la chimie verte (Lattemann & Höpner, 2008). Cependant, la multiplicité des technologies et la variabilité des protocoles rendent difficile le suivi précis des substances introduites et rejetées dans le milieu marin (UNEP, 2001). Certains contaminants bien connus — acides, bases, sels métalliques, produits de corrosion (Cu, Fe, Ni) — continuent d'être présents dans les effluents et sont désormais considérés comme des polluants émergents nécessitant une surveillance renforcée (Chesher, 1971 ; Lin et al., 2013 ; Drouiche, 2021).

I.11.6 Différences entre les contaminants selon la technologie

Les types de contaminants rejetés avec la saumure varient selon la technologie utilisée : les procédés OI génèrent des résidus d'antiscalants, de coagulants et de bisulfite, tandis que les procédés thermiques sont davantage associés aux métaux de corrosion des échangeurs (Cu, Ni, Ti) et au chlore résiduel. Le tableau 03 ci-dessus présente une synthèse comparative détaillée de ces différences.

I.12 Effets à long terme des rejets de saumure sur les écosystèmes marins

Les rejets continus de saumure peuvent induire des modifications durables des conditions physico-chimiques du milieu récepteur et entraîner des transformations structurelles profondes des communautés marines, à des échelles de temps allant de quelques années à plusieurs décennies.

Tableau 04 : Synthèse des effets à long terme des rejets chroniques de saumure sur les compartiments écologiques côtiers

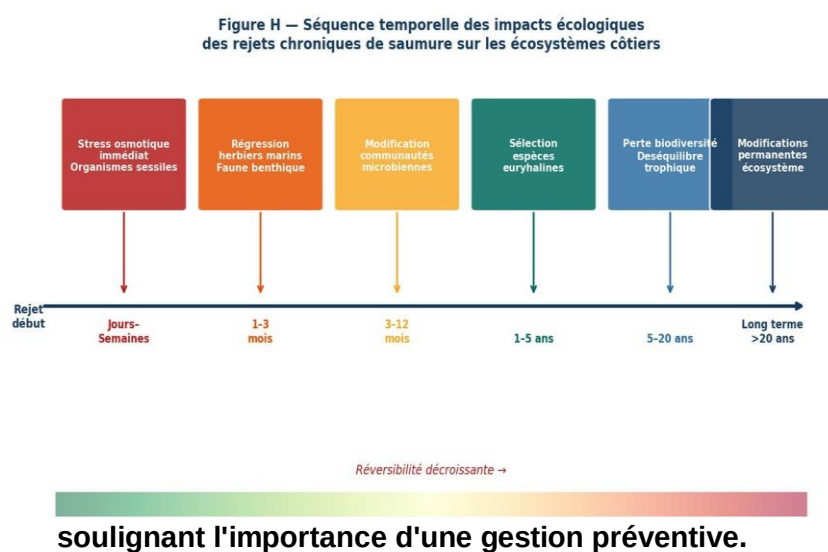
Compartiment	Mécanisme principal	Effet observé	Sensibilité	Références
Herbiers marins (Posidonia, Cymodocea)	Stress osmotique chronique (salinité > 39 g/L)	Régression superficie, nécrose méristèmes	Difficile (décennies)	Marín-Guirao et al., 2011

Chapitre I : impact de la saumure sur l'environnement marin

Macrofaune benthique	Accumulation saumure dense au fond (anoxie)	-40 à -90 % densité individus	Partielle (5-10 ans)	Roberts et al., 2010
Communautés microbiennes	Modification structure + salinité	↑ chlorophylle a, shift taxonomique	Rapide (semaines)	Belkin et al., 2015
Réseau trophique	Disparition espèces clés (herbiers, filtreurs)	Déséquilibre prédateur-proie	Très difficile	UNEP, 2001
Biodiversité locale	Sélection espèces euryhalines	Homogénéisation biologique	réversible si sévère	Einav et al., 2003
Processus de calcification	pH bas + salinité élevée (stress combiné)	Perturbation coraux et mollusques	Difficile	Lattermann & Höpner, 2008

Sources : UNEP, 2001 ; Lattermann & Höpner, 2008 ; Roberts et al., 2010 ; Belkin et al., 2015 ; Marín-Guirao et al., 2011

Figure I.16: Séquence temporelle des impacts écologiques des rejets chroniques de saumure sur les écosystèmes côtiers. La réversibilité décroît avec le temps et l'intensité d'exposition,



I.12.1 Sélection Écologique et Homogénéisation Biologique

L'exposition chronique à une hypersalinité provoque une sélection écologique progressive, favorisant les espèces euryhalines (tolérantes aux larges variations de salinité) au détriment des espèces

Chapitre I : impact de la saumure sur l'environnement marin

sténohalines plus sensibles. Ce phénomène conduit à une homogénéisation biologique et à une réduction de la biodiversité locale, avec la disparition progressive des espèces les plus sensibles (*Posidonia oceanica*, échinodermes, certains bivalves) et leur remplacement par des espèces opportunistes moins exigeantes (UNEP, 2001 ; Lattemann & Höpner, 2008).

Dans les habitats benthiques, particulièrement vulnérables en raison du comportement de fond de la saumure, des réductions de densité de la macrofaune de 40 à 90 % ont été documentées à proximité des émissaires de dessalement en Méditerranée orientale et dans le Golfe Persique. Ces habitats mettent 5 à 10 ans à se partiellement reconstituer après l'arrêt ou la réduction des rejets (Roberts et al., 2010 ; Einav et al., 2003).

I. 12.2 Altérations du Réseau Trophique

La disparition de certaines espèces clés — herbiers marins, invertébrés filtreurs, coraux — peut perturber profondément les interactions trophiques de l'écosystème côtier. Les herbiers de *Posidonia oceanica* jouent des rôles irremplaçables : nurserie pour de nombreuses espèces commerciales, stabilisation des sédiments, production d'oxygène, séquestration de carbone. Leur régression entraîne une cascade d'effets indirects affectant l'ensemble de la biodiversité côtière associée, avec des conséquences graves pour les pêcheries locales artisanales (UNEP, 2001 ; Lattemann & Höpner, 2008).

Par ailleurs, l'élévation prolongée de la température dans le cas des procédés thermiques accentue les effets de la salinité, créant un stress combiné qui affecte la respiration, la reproduction et le développement larvaire. À long terme, ces perturbations réduisent le succès reproducteur et compromettent le renouvellement naturel des populations marines (Einav & Lokiec, 2003).

I.12.3 Cas des Environnements Semi-Fermés : Contexte Algérien

Ces effets à long terme sont particulièrement prononcés dans les environnements semi-fermés, les baies peu profondes ou les zones à faible hydrodynamisme, où la dilution naturelle est limitée. Dans ces contextes, une exposition chronique même à des augmentations modérées de salinité (5–10 % au-dessus des niveaux naturels) peut suffire à provoquer des changements écologiques mesurables et durables (Belkin et al., 2015).

Le littoral algérien présente plusieurs zones de ce type (golfe d'Oran, baie de Bou Ismaïl, golfe de Béjaïa) où sont implantées d'importantes installations de dessalement. La présence de prés de *Posidonia oceanica* et de fonds à coralligène — habitats reconnus comme d'intérêt communautaire par la Convention de Barcelone — rend la gestion des rejets de saumure particulièrement critique pour la conservation du patrimoine marin algérien.

Ainsi, les effets cumulatifs et chroniques des rejets de saumure représentent un enjeu environnemental majeur pour les zones côtières algériennes, nécessitant une surveillance écologique

Chapitre I : impact de la saumure sur l'environnement marin

continue et une gestion adaptée des systèmes de rejet. Ces systèmes feront l'objet d'une analyse détaillée dans le chapitre suivant.

Conclusion :

L'analyse présentée dans ce premier chapitre met en évidence que le dessalement de l'eau de mer constitue une solution essentielle pour répondre à la raréfaction des ressources en eau douce en Algérie, mais qu'il génère inévitablement la saumure dont le rejet dans le milieu marin peut entraîner des perturbations environnementales significatives à plusieurs échelles temporelles et spatiales.

L'étude des caractéristiques physico-chimiques de la saumure démontre qu'elle se distingue nettement de l'eau de mer naturelle par une salinité deux fois plus élevée (60–80 g/L contre ≈ 35 g/L), une densité accrue favorisant son accumulation en fond de mer, une réduction de l'oxygène dissous, et la présence de résidus chimiques issus des procédés de traitement. Ces propriétés conditionnent directement l'intensité de ses impacts sur les organismes vivants.

Les mécanismes de dispersion et de dilution du panache de saumure dépendent fortement des conditions environnementales locales — profondeur, courants marins, hydrodynamisme — et peuvent conduire à des zones d'accumulation persistante dans les environnements côtiers peu dynamiques typiques du littoral algérien. Les effets potentiels sur le biote marin sont multiples et documentés : stress osmotique et thermique des herbiers marins (*Posidonia oceanica*, *Cymodocea nodosa*, *Zostera noltii*), réduction du développement larvaire des invertébrés et des poissons, accumulation de composés toxiques dans les organismes. Ces effets, souvent synergiques, peuvent entraîner à long terme des modifications durables de la biodiversité et du réseau trophique côtier.

Ces constats confirment l'importance cruciale d'une gestion rigoureuse des rejets de saumure, reposant sur une conception optimale des systèmes de diffusion, une surveillance écologique continue des zones d'impact, et un cadre réglementaire national adapté. Les systèmes de rejet et leurs performances feront l'objet d'une analyse détaillée dans le chapitre suivant.

Chapitre II :

Gestion et valorisation de la saumure

Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

Introductions :

Le chapitre précédent a mis en évidence l'ampleur des impacts environnementaux de la saumure sur les écosystèmes marins côtiers. Le chapitre suivant traitera des techniques spécialisées de dispersion dans le milieu récepteur. Entre ces deux problématiques se situe une question fondamentale d'ingénierie, souvent insuffisamment abordée dans la littérature algérienne : comment gérer, traiter et valoriser la saumure avant même qu'elle n'atteigne le milieu marin ?

À l'échelle mondiale, environ **141,5 millions de m³/jour** de saumure sont produits par les installations de dessalement, dont la grande majorité est directement rejetée en mer avec un traitement minimal (Jones et al., 2019). Cette situation n'est plus tenable dans un contexte de ressources marines fragilisées et de réglementation environnementale croissante.

La saumure n'est plus seulement un déchet à éliminer ; elle devient progressivement une **ressource à valoriser**. Ce chapitre aborde la gestion de la saumure sous un angle strictement ingénierie et procédés.

II.1 Contraintes de la Gestion de la Saumure

La gestion de la saumure est soumise à un ensemble de contraintes interdépendantes qui rendent sa prise en charge techniquement complexe et économiquement coûteuse. Ces contraintes tiennent à la fois à la nature intrinsèque de l'effluent, aux volumes produits et aux exigences réglementaires et économiques du secteur.

II.1.1 Contraintes liées à la composition physico-chimique

La saumure présente une composition qui la rend **chimiquement agressive** et difficile à traiter par les procédés conventionnels. Sa haute teneur en chlorures (30 000–38 000 mg/L Cl⁻) impose l'utilisation de matériaux résistants à la corrosion dans toute l'infrastructure de gestion. Sa densité élevée (1,035–1,045 kg/L) nécessite un dimensionnement spécifique des pompes et des équipements de transfert.

Les **substances chimiques résiduelles** — antitartres (polyacrylates, polyphosphonates), biocides (hypochlorite, dioxyde de chlore, DBNPA), acides (HCl, H₂SO₄) et agents de coagulation — interfèrent avec les procédés de traitement ultérieurs. Certains antitartres inhibent la cristallisation, réduisant l'efficacité des étapes de récupération des sels.

Tableau II.1 : Principaux paramètres physico-chimiques contraignants de la saumure OI (Méditerranée algérienne).

Paramètre	Valeur typique	Contrainte principale	Implication pour le traitement
Salinité (TDS)	55 000–80 000 mg/L	Pression osmotique élevée	Limite les procédés membranaires standards

Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

Chlorures (Cl^-)	30 000–38 000 mg/L	Haute corrosivité	Matériaux nobles obligatoires (inox 316L, PEHD)
Sulfates (SO_4^{2-})	4 500–7 000 mg/L	Risque d'entartrage	Prétraitement antitartre indispensable
Magnésium (Mg^{2+})	2 500–4 000 mg/L	Précipitation $\text{Mg}(\text{OH})_2$	Contrôle pH strict lors du traitement alcalin
Calcium (Ca^{2+})	1 200–2 500 mg/L	Entartrage $\text{CaCO}_3/\text{CaSO}_4$	Déminéralisation préalable nécessaire
pH	6,5–8,0	Variabilité du milieu	Ajustement avant traitement membranaire

_Sources : Lattemann & Höpner (2008) ; Missimer & Maliva (2018) ; Chelali & Yaiche (2015)

II.1.2 Contraintes volumétriques et logistiques

Le défi volumétrique est considérable. Pour un taux de récupération OI de 45%, une station produisant 500 000 ms/jour d'eau douce (comme **Magtaa, Oran**) génère environ 430 000 ms/jour de saumure — soit un débit de 4,97 ms/s à gérer en continu 24h/24.

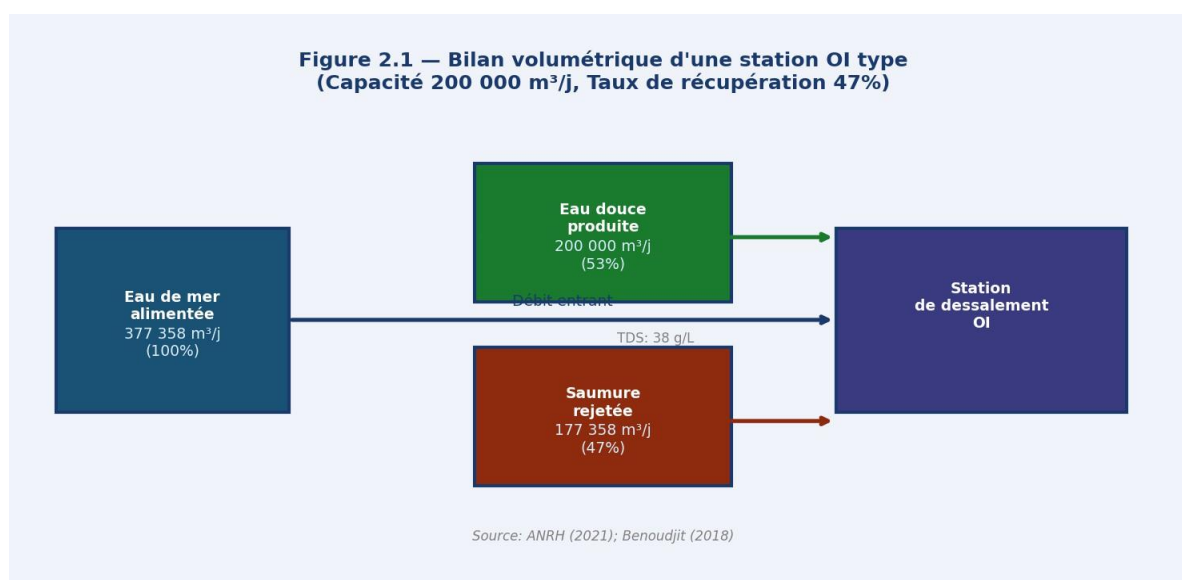


Figure II.1 : Bilan volumétrique d'une station OI type (capacité 200 000 ms/j, taux de récupération 47%).

Sources : ANRH (2021) ; Benoudjit (2018)

II.1.3 Contraintes économiques

Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

Le coût de gestion de la saumure représente **15 à 30 % du coût total de production d'eau dessalée** selon le niveau de traitement et la filière retenue (Panagopoulos et al., 2019). Cette part est en augmentation constante avec le durcissement des réglementations environnementales.

Tableau II.2 : Coûts comparatifs des filières de gestion de la saumure. Sources : Panagopoulos et al. (2019) ; Giwa et al. (2017) ; Morillo et al. (2014)

Filière de gestion	Coût spécifique (USD/m ³)	Complexité	Valorisation potentielle
Rejet direct sans traitement	0,01–0,05	Très faible	Nulle
Rejet avec diffuseur multiport	0,05–0,15	Faible	Nulle
Préconcentration + rejet	0,20–0,60	Modérée	Faible
Évaporation + récupération sels	0,80–2,50	Élevée	Modérée
ZLD complet	2,00–8,00	Très élevée	Élevée
ZLD + valorisation lithium	5,00–15,00	Maximale	Très élevée

II.2 Stratégies de Gestion de la Saumure

Avant d'engager des investissements dans des technologies de traitement avancées, il convient d'identifier les stratégies opérationnelles permettant de réduire la charge polluante à la source ou d'atténuer les impacts par le recyclage. La hiérarchie des stratégies suit la logique d'un triangle de gestion intégrée : réduire → recycler → traiter.

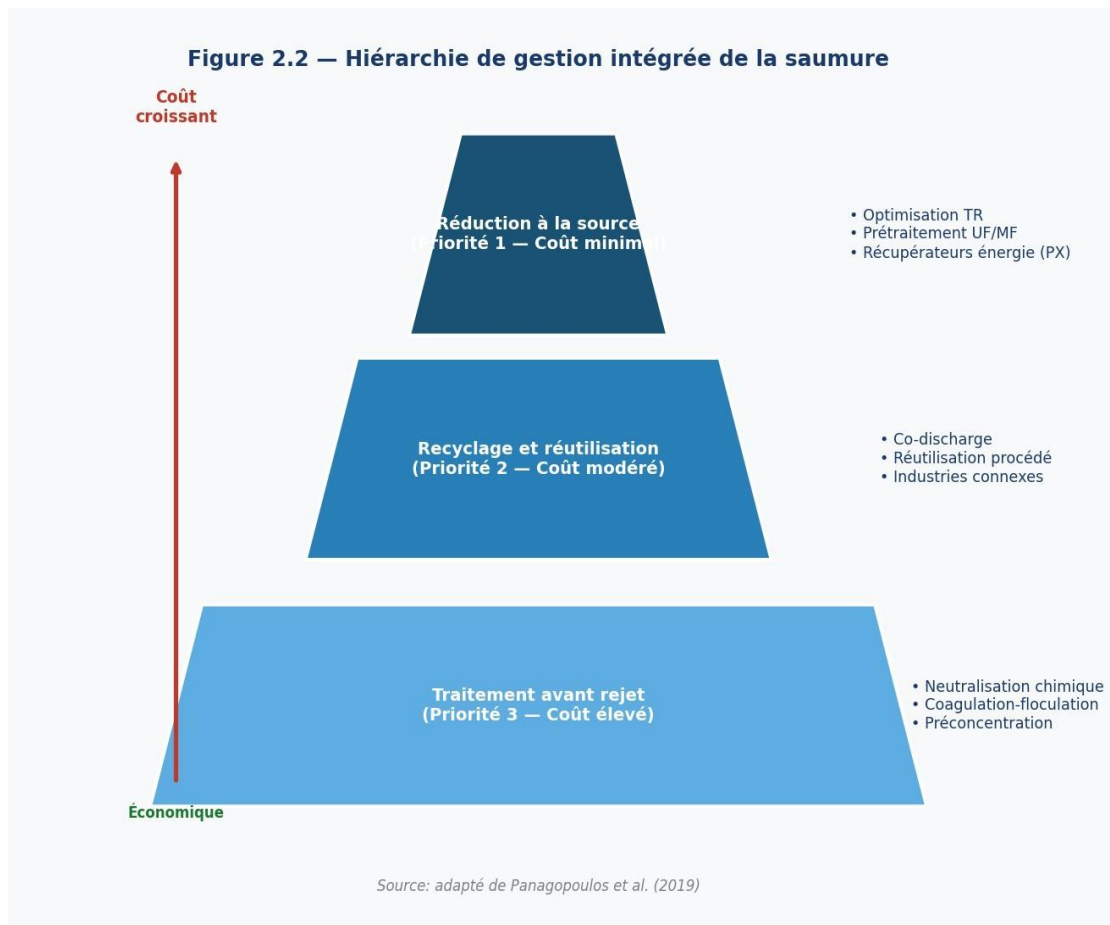


Figure II.2 : Hiérarchie de gestion intégrée de la saumure : pyramide stratégique à trois niveaux.
Source : adapté de Panagopoulos et al. (2019)

II.2.1 Réduction à la source

a) Optimisation du taux de récupération

Le taux de récupération (TR) d'une installation OI est le levier le plus direct pour réduire le volume de saumure produit. Pour un même débit d'eau de mer alimentée Q_f , augmenter TR de 45 à 55 % réduit le volume de saumure de 18 %. Des systèmes **Batch Reverse Osmosis (BRO)** et **Closed Circuit Reverse Osmosis (CCRO)** permettent d'atteindre des taux de récupération de 60 à 85 % — contre 40–50 % en OI conventionnelle (Warsinger et al., 2018).

- La pression osmotique croissante de la saumure, qui augmente la consommation énergétique
- Le risque d'entartrage et de colmatage des membranes, qui s'accroît avec la concentration
- La qualité de l'eau produite, qui peut se dégrader lorsque les membranes sont sollicitées au-delà de leurs limites

b) Prétraitement optimisé

Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

Un prétraitement de qualité — notamment la filtration membranaire de l'eau d'alimentation (UF/MF) — réduit le colmatage des membranes, permet d'augmenter le TR et de diminuer la dose de produits chimiques injectés. Cela réduit non seulement le volume de saumure mais aussi sa charge chimique résiduelle, facilitant les étapes de traitement ultérieures.

c) Utilisation des récupérateurs d'énergie (ERD)

Les dispositifs de récupération d'énergie de type **Pressure Exchanger (PX)** permettent de récupérer 95–98 % de l'énergie contenue dans la saumure haute pression. La consommation énergétique peut ainsi être ramenée de 8–10 kWh/ms à **2,5–4,0 kWh/m³**.

II.2.2 Recyclage et réutilisation

Co-discharge : La station Magtaa (Oran) utilise un rapport volumique 3:1 eau de refroidissement/saumure, ramenant la salinité du rejet de 70 g/L à 48–52 g/L, ce qui améliore la dilution initiale d'un facteur 2 à 3.

Alimentation d'industries côtières : Dans les zones industrielles côtières, la saumure peut être valorisée comme eau de process pour des industries peu sensibles à la salinité : raffineries, centrales thermiques, ou industries chimiques de chlore-soude. Des expériences réussies existent au Maroc (Jorf Lasfar) et en Arabie Saoudite (SABIC).

II.2.3 Traitement avant rejet

Lorsque la réduction à la source et le recyclage ne suffisent pas, un prétraitement de la saumure avant rejet s'impose. Les principales options sont :

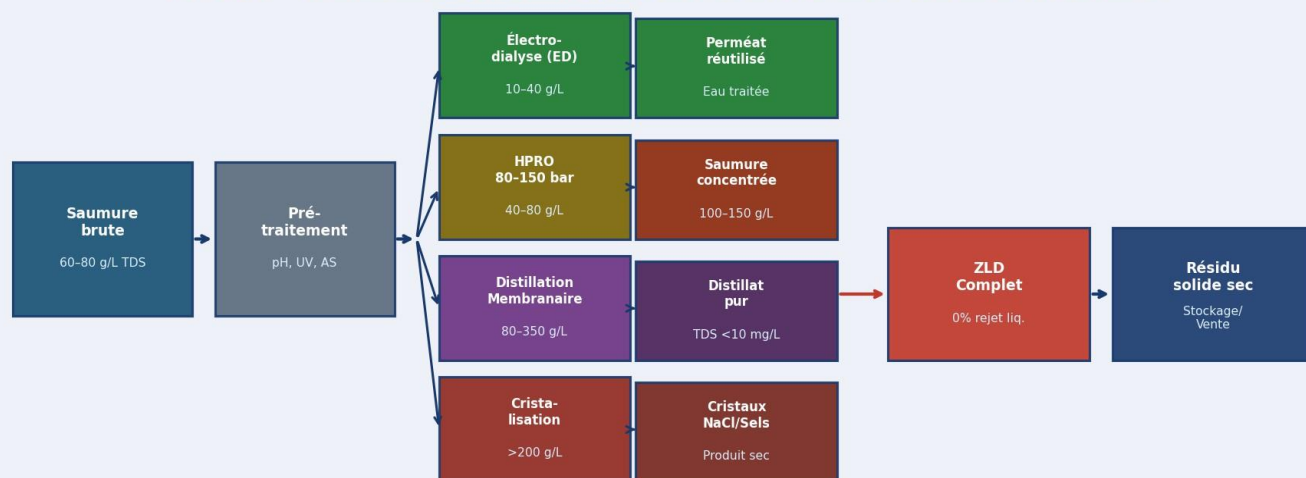
- Neutralisation chimique : ajustement du pH, élimination du chlore résiduel et des biocides (UV/H₂O₂)
- Coagulation-floculation : réduction des matières en suspension et des collaïdes
- Adsorption sur charbon actif : élimination des micropollants organiques
- Dégazage : réduction du CO₂ dissous et de l'H₂S dans les saumures thermiques
- Préconcentration par évaporation : réduction du volume avant traitement ZLD

II.3 Technologies Avancées de Traitement de la Saumure

Les technologies avancées de traitement de la saumure visent à concentrer davantage l'effluent — voire à le réduire à l'état solide — tout en permettant la récupération de fractions valorisables. Quatre familles technologiques se distinguent.

Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

Figure 2.3 — Positionnement des technologies avancées dans la chaîne de traitement de la saumure



Source: adapté de Panagopoulos et al. (2019); Giwa et al. (2017)

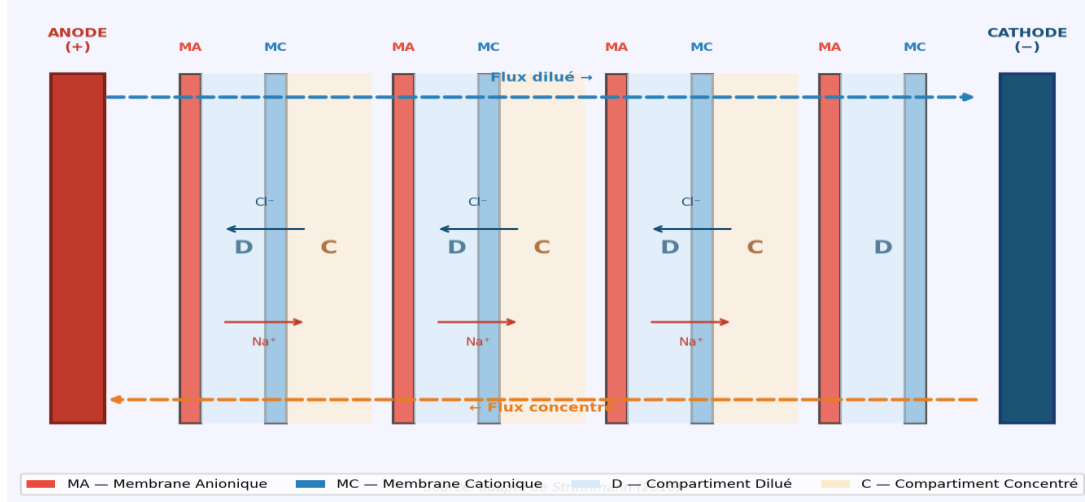
Figure II.3 : Positionnement des technologies avancées dans la chaîne de traitement de la saumure. Source : adapté de Panagopoulos et al. (2019) ; Giwa et al. (2017)

II.3.1 Électrodialyse (ED) et Électrodialyse Inversée (EDR)

a) Principe de fonctionnement

L'électrodialyse (ED) est un procédé électrochimique membranaire qui utilise un **champ électrique continu** pour migrer sélectivement les ions à travers des membranes échangeuses d'ions. La cellule ED est constituée d'un empilement alterné de membranes cationiques (MC, perméables aux cations Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) et de membranes anioniques (MA, perméables aux anions Cl^- , SO_4^{2-}), placé entre une anode (+) et

Figure 2.4 — Principe de l'électrodialyse (ED) — Stack membranaire



une cathode (-).

Figure II.4 : Principe de l'électrodialyse (ED) : schéma en coupe d'un empilement membranaire

Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

avec migration ionique.

Source : adapté de Strathmann (2010)

b) Application au traitement de la saumure

Paramètre	ED standard	EDR (inversée)	ED bipolaire (BPED)
Salinité en entrée (mg/L)	5 000–40 000	5 000–40 000	Jusqu'à 35 000
Taux de dessalage (%)	50–80 %	50–80 %	80–95 %
Consommation éner.	0,5–2,5 kWh/ms	0,5–2,5 kWh/ms	1,5–4,0 kWh/ms
Récupération eau traitée (%)	70–85 %	70–90 %	85–95 %
Durée de vie membranes	5–10 ans	8–15 ans	5–12 ans
Résistance au colmatage	Modérée	Bonne	Modérée
Coût d'investissement	Élevé	Élevé	Très élevé
Valorisation possible	Faible	Faible	Acide + Base produits

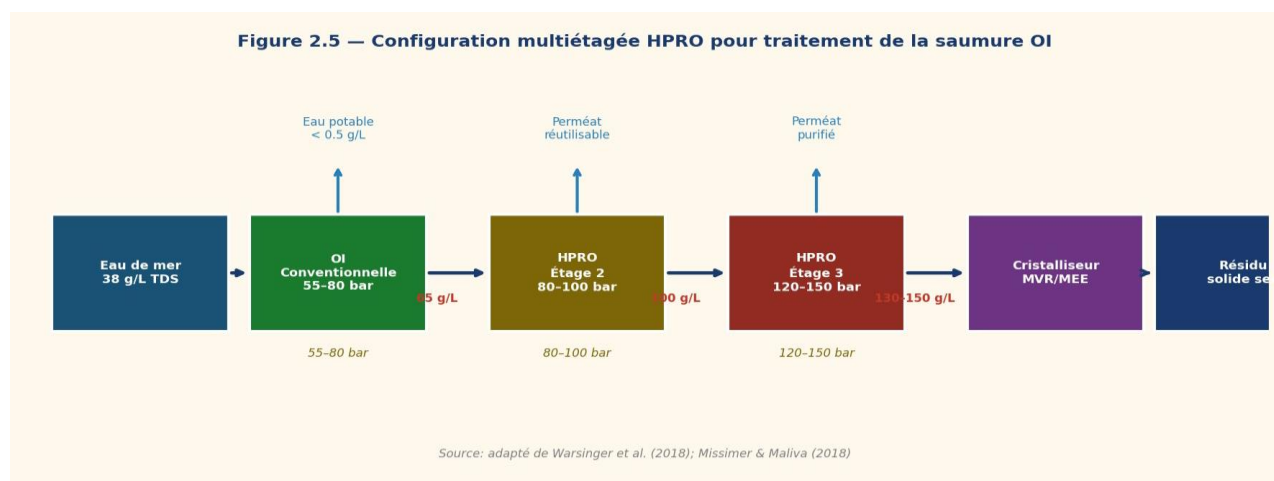
Tableau II .3 : performances comparées des variantes d'électrodialyse. Sources : Strathmann (2010) ; Panagopoulos et al. (2019)

II.3.2 Osmose Inverse de Haute Pression (HPRO)

a) Principe et différences avec l'OI conventionnelle

L'osmose inverse de haute pression (HPRO) est une extension de l'OI conventionnelle permettant de traiter des saumures à très haute salinité (40 000–80 000 mg/L TDS). Alors que l'OI standard opère entre 55 et 80 bars, l'HPRO utilise des pressions de **80 à 150 bars**, grâce à des membranes renforcées et des boîtiers haute pression en acier inoxydable duplex ou en alliage de titane.

L'HPRO peut porter le taux de récupération global d'une station OI de 45 % à **65–80 %** en traitant le



Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

concentrat issu de l'OI conventionnelle.

Figure II.5 : Configuration multiétagée HPRO pour traitement de saumure OI.
Source : adapté de Warsinger et al. (2018) ; Missimer & Maliva (2018)

II.3.3 Distillation Membranaire (MD)

a) Principe thermodynamique

La distillation membranaire (MD) est un procédé thermique membranaire hybride. La membrane en PTFE, polypropylène ou PVDF (taille de pores : 0,1–1 μm , porosité 60–80 %) est imperméable à l'eau liquide mais perméable à la vapeur d'eau. La saumure chaude (60–80 °C) est mise en contact avec le côté chaud de la membrane, produisant un distillat de très haute pureté (TDS < 10 mg/L). La MD peut traiter des saumures jusqu'à **250 000–350 000 mg/L TDS**, bien au-delà des limites de l'OI.

Tableau II.4 : Comparaison des configurations de distillation membranaire. Sources : Drioli et al. (2015) ; Panagopoulos et al. (2019)

Configuration	Flux perméat (L/m ² /h)	Efficacité thermique	Risque mouillage	Application saumure
DCMD	5–30	Faible	Modéré	Préconcentration (TDS < 150 g/L)
AGMD	1–10	Élevée	Faible	Concentrations très élevées
SGMD	2–15	Modérée	Faible	Applications industrielles
VMD	10–40	Très élevée	Élevé	Récupération eau ultra-pure

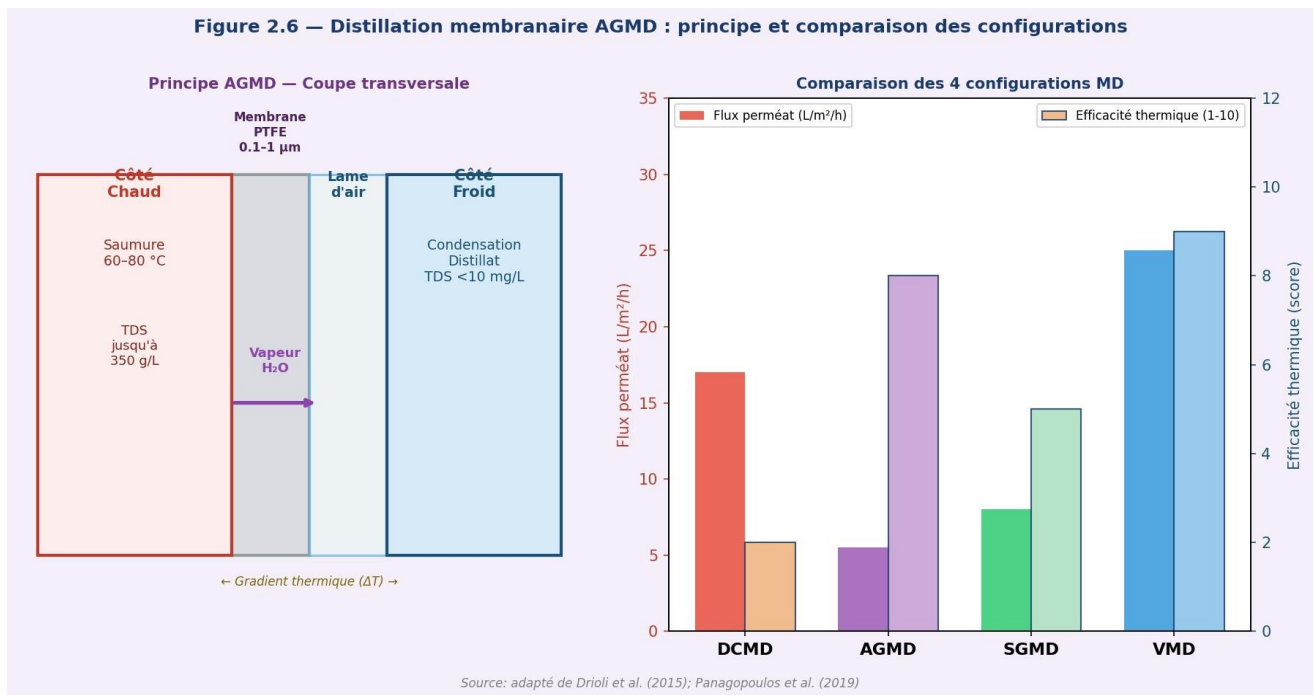


Figure II.6 : Principe de la distillation membranaire AGMD (gauche) et comparaison des quatre configurations MD (droite). Source : adapté de Drioli et al. (2015)

II.3.4 Cristallisation Assistée et Récupération des Sels

La cristallisation est le procédé ultime de concentration qui transforme les sels dissous en solides cristallins récupérables. Elle exploite la limite de solubilité (point de saturation) de chaque sel. La cristallisation fractionnée permet de séparer sélectivement les sels en exploitant les différences de solubilité en fonction de la température et de la concentration.

Les évaporateurs-cristalliseurs à compression mécanique de vapeur (MVR) réduisent la consommation énergétique à **10–25 kWhél/m³** (contre 600–1 200 kWh_{th} pour la MD sans récupération). Le MEE permet une réutilisation multiple de la chaleur, réduisant la consommation à 40–80 kWh_{th}/ms.

Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

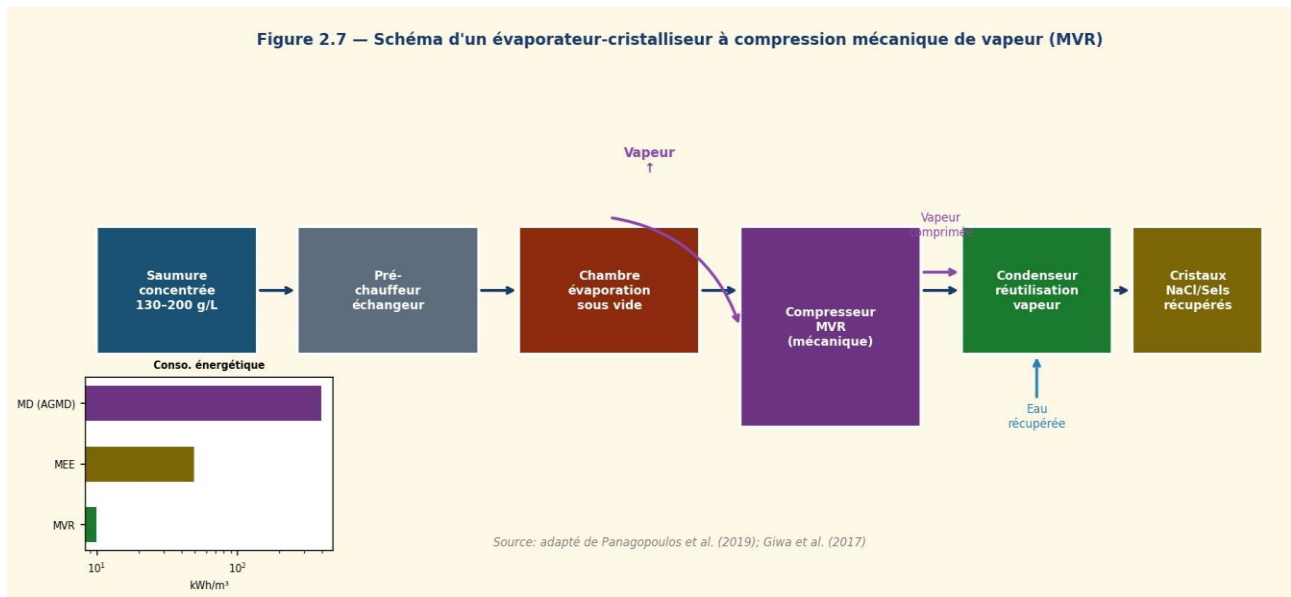


Figure II.7 : Schéma d'un évaporateur-cristalliseur à compression mécanique de vapeur (MVR).

Source : adapté de Panagopoulos et al. (2019) ; Giwa et al. (2017)

II.4 Valorisation de la Saumure — De l'effluent à la ressource

Concept clé : La saumure comme minéral liquide

La valorisation de la saumure constitue la révolution conceptuelle majeure du secteur : transformer un effluent coûteux à gérer en une source de revenus complémentaires. Les saumures de dessalement contiennent des concentrations significatives d'éléments à haute valeur commerciale : NaCl, MgCl₂, CaCl₂, K⁺, Br⁻, Li⁺ (industrie des batteries), Rb, Cs, Sr, et même des traces d'uranium et de bore.

II.4.1 Récupération du NaCl et des Sels Minéraux

Le chlorure de sodium est le composant majoritaire de toute saumure de dessalement (55 000–65 000 mg/L). Sa récupération par cristallisation solaire est la filière la plus économique dans les régions à fort ensoleillement, comme les zones côtières algériennes (irradiation solaire : 2 600–3 500 kWh/m²/an).

Estimation pour Magtaa : 430 000 m³/j de saumure (salinité 70 g/L) → 18 060 t/j de NaCl ≈ 6,6 millions de t/an — environ 3 fois la production nationale algérienne actuelle.

Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

Tableau II.5 / Sels récupérables de la saumure et leurs valeurs commerciales. Sources : Morillo et al. (2014) ; Giwa et al. (2017) ; Panagopoulos et al. (2019)

Sel récupéré	Concentration dans saumure	Méthode	Valeur commerciale	Marché principal
NaCl	55 000–65 000 mg/L	Évaporation solaire / MVR	30–80 USD/t	Industrie chimique, alimentation
MgCl ₂ / MgO	2 500–4 000 mg/L	Précipitation alcaline + calcination	200–600 USD/t	Réfractaires, papier, alimentation
CaSO ₄ (gypse)	1 200–2 500 mg/L	Précipitation contrôlée	20–60 USD/t	Construction, BTP, agriculture
Na ₂ SO ₄	2 000–4 500 mg/L	Cristallisation fractionnée	80–200 USD/t	Détergents, verre, textile
KCl	400–600 mg/L	Évaporation sélective	400–800 USD/t	Engrais potassiques
Br ₂ (Brome)	60–120 mg/L	Oxydation-extraction	1 500–3 000 USD/t	Ignifuges, photographie

II.4.2 Extraction des Éléments Stratégiques

a) Lithium (Li⁺) — L'or blanc du XXI^e siècle

Le lithium est aujourd'hui l'un des éléments les plus stratégiques au monde. La concentration de Li⁺ dans l'eau de mer est de 0,17 mg/L, mais les saumures OI concentrent le lithium à **0,3–1,5 mg/L** selon le taux de récupération et l'origine géographique de l'eau de mer.

Estimation pour Magtaa : Li récupéré $\approx 430\,000 \times 0,0008 \times 0,90 \approx 309$ kg/j de Li métal $\rightarrow \sim 1\,645$ kg/j de Li₂CO₃. À un prix de 20 000 USD/tonne, cela représente environ **12 millions USD/an** de revenus potentiels.

Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

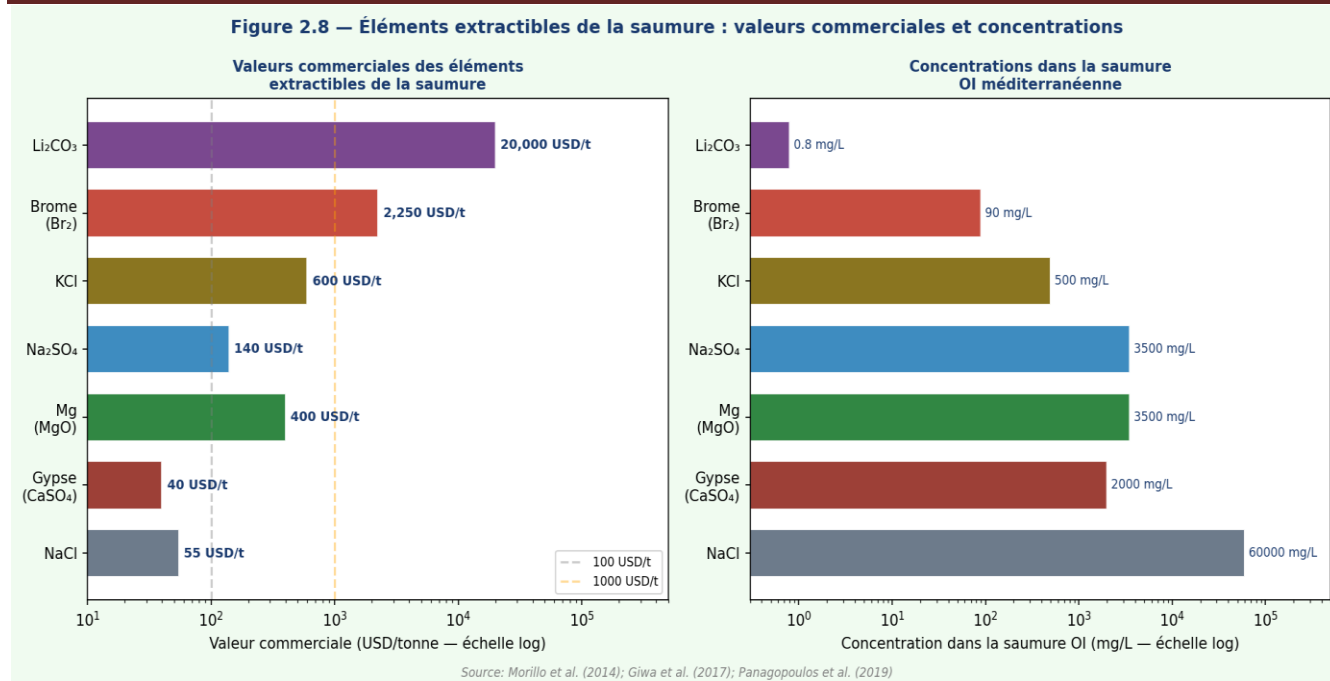


Figure II.8 : Éléments extractibles de la saumure : valeurs commerciales (USD/t) et concentrations dans la saumure OI méditerranéenne.

Source : synthèse d'après Morillo et al. (2014) ; Giwa et al. (2017) ; Panagopoulos et al. (2019)

II.4.3 Réutilisation Industrielle et Applications Aquacoles

Tableau II.6 : Applications industrielles de la réutilisation directe de la saumure.

Industrie utilisatrice	Usage de la saumure	Concentration acceptable	Avantages / Contraintes
Chlore-Soude (Cl-A)	Matière première électrolyse	250–310 g/L NaCl	Haute valeur ajoutée ; purification poussée nécessaire
Industrie du cuir (tannerie)	Salaison des peaux	35–80 g/L TDS	Compatibilité directe ; volumes limités
Industrie pétrolière (puits)	Fluide de forage	Variable	Réduit achats eau saline ; traitement MnO ₂ requis
Réfrigération industrielle	Fluide caloporteur	150–250 g/L	Propriétés cryogéniques ; corrosion équipements

Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

Agriculture (zones arides)	Irrigation halophytes	10–25 g/L TDS	Valorisation terres marginales ; sélection espèces
----------------------------	-----------------------	---------------	--

Sources : Morillo et al. (2014) ; Giwa et al. (2017)

Aquaculture marine : Les espèces candidates incluent *Artemia salina* (optimum : 80–120 g/L TDS), les microalgues *Spirulina* et *Dunaliella salina* (30–50 g/L), et les halophytes terrestres *Salicornia* et *Atriplex* (15–30 g/L). Des expériences pilotes au Maroc et aux Canaries génèrent **15 000–30 000 USD/an/ha** de revenus.

II.5 Rejet Zéro Liquide (Zero Liquid Discharge — ZLD)

Définition ZLD

Le Rejet Zéro Liquide (ZLD, Zero Liquid Discharge) est la stratégie de gestion la plus ambitieuse : elle vise à éliminer tout rejet liquide de l'installation, en concentrant et cristallisant l'intégralité de la saumure pour produire uniquement de l'eau récupérée et un résidu solide sec. Dans sa version optimale, le ZLD transforme une station de dessalement en un système en boucle fermée.

Chaîne technologique ZLD — 5 étapes successives

- ① Prétraitement de la saumure : neutralisation chimique, élimination des antitartres par UV/adsorption, ajustement pH et dureté
- ② Préconcentration membranaire (HPRO ou ED) : augmentation de la concentration de 60–80 g/L à 120–150 g/L TDS avec récupération d'eau de qualité
- ③ Concentration thermique (MEE ou MVR) : évaporation forcée portant la concentration à 250–320 g/L TDS
- ④ Cristallisation : précipitation sélective des sels à leurs limites de solubilité
- ⑤ Gestion du résidu solide : centrifugation, filtration presse et séchage du gâteau de cristaux

Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

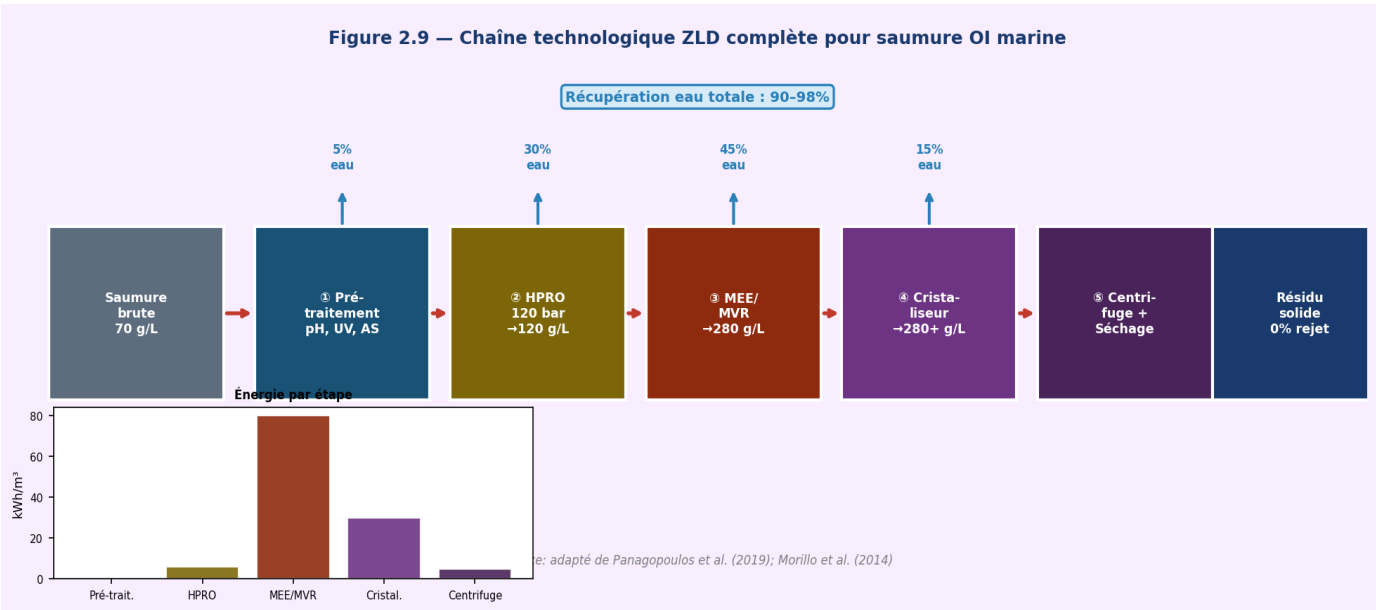


Figure II.9 : Chaîne technologique ZLD complète pour saumure OI marine avec bilans volumiques et énergétiques.

Source : adapté de Panagopoulos et al. (2019) ; Morillo et al. (2014)

Tableau II.7 : Défis et solutions pour la mise en œuvre du ZLD.

Défi	Description	Solutions en développement
Coût très élevé	2–8 USD/ms saumure traitée (vs 0,05–0,15 pour rejet direct)	Valorisation sels + chaleur fatale + solaire thermique
Consommation énergétique	150–500 kWh/ms saumure (étapes thermiques)	Intégration énergétique (MVR) + Énergies Renouvelables
Gestion du résidu solide	Stockage ou valorisation du gâteau de sels mixtes	Cristallisation fractionnée sélective
Résidu toxique	Concentration des métaux lourds dans le solide final	Prétraitement chimique ciblé en amont

Défi	Description	Solutions en développement
Complexité opérationnelle	Maintenance accrue des cristalliseurs et évaporateurs	Formation spécialisée + contrôle-commande avancé
Applicabilité géographique	Limité aux zones sans solution de rejet marine viable	Cadre réglementaire incitatif nécessaire

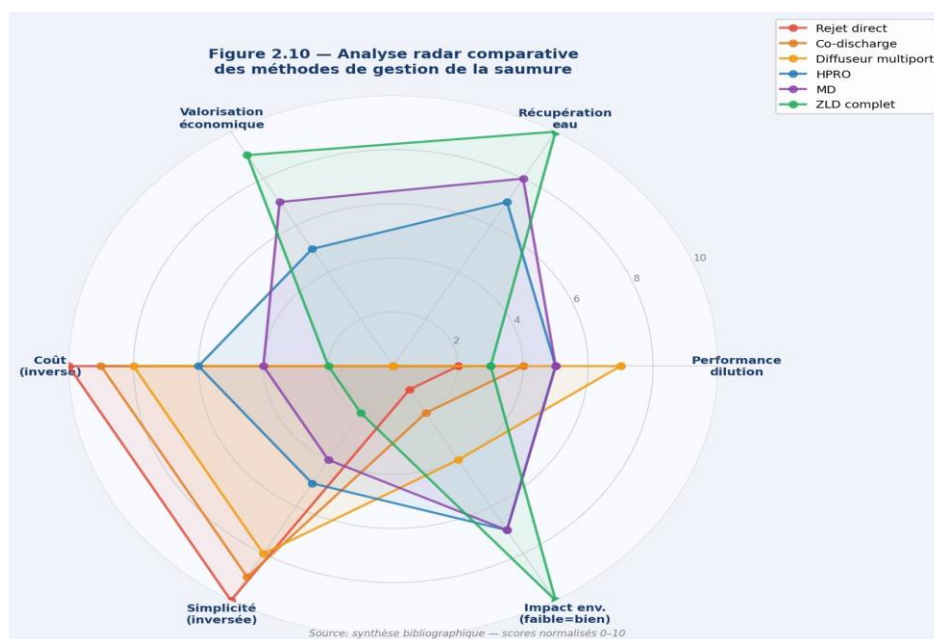
Sources : Panagopoulos et al. (2019) ; Giwa et al. (2017)

Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

II.5.1 Analyse Comparative des Méthodes de Gestion

La sélection de la stratégie de gestion optimale dépend d'une analyse multicritère intégrant les performances techniques, le coût total de possession, les performances environnementales et l'applicabilité spécifique au contexte algérien.

Figure II.10 : Analyse radar comparative des méthodes de gestion de la saumure : 6 axes d'évaluation, 6 méthodes.



Source : synthèse bibliographique

Tableau II.8 : Analyse comparative multicritère des méthodes de gestion de la saumure. Source : synthèse bibliographique

Méthode	Coût (USD/m ³)	écup. eau	Valorisation	Perf. env.	Applicabilité Algérie
Rejet direct (pipeline)	0,01–0,05	0 %	Aucune	★ ★ ★ ★ ☆	Actuel — réglementairement fragile
Co-discharge	0,05–0,15	0 %	Aucune	★ ★ ★ ★ ☆	Magtaa — limité aux IWPP
Diffuseur multiport	0,08–0,20	0 %	Aucune	★ ★ ★ ★ ☆	Standard recommandé (Ch.3)
Électrodialyse (ED)	0,30–1,20	50–80 %	Faible	★ ★ ★ ★ ☆	Eaux saumures — adapté

Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

HPRO multiétagé	0,40–1,50	60–80 %	Modérée	★★★★★ ☆	Grandes stations — faisable
Distillation membranaire	0,80–3,00	70–90 %	Élevée	★★★★★ ☆	Chaleur fatale requise
Cristallisation + sel	1,50–4,00	80–90 %	Élevée	★★★★★ ☆	Potentiel fort (soleil, marché)
ZLD complet	2,00–8,00	90–98 %	Très élevée	★★★★★ ★	Stations < 50 000 ms/j — émergent
ZLD + Li/Mg	5,00–15,00	90–98 %	Maximum	★★★★★ ★	Prospectif — horizon 2030+

Chapitre II : Gestion et valorisation de la saumure

Conclusions :

Ce chapitre a exploré l'ensemble du spectre de la gestion et de la valorisation de la saumure, du rejet minimal au concept de Rejet Zéro Liquide, en passant par les technologies de traitement les plus avancées disponibles à ce jour.

En premier lieu, les **contraintes physico-chimiques et volumétriques** de la saumure — salinité extrême, agressivité chimique, volumes massifs — imposent une réponse technique ambitieuse et ne peuvent être ignorées par une simple politique de dilution. En second lieu, les **technologies avancées** — électrodialyse, HPRO, distillation membranaire, cristallisation — offrent des performances croissantes à des coûts décroissants grâce aux progrès des matériaux membranaires et de l'intégration énergétique.

La **valorisation de la saumure** représente la mutation conceptuelle la plus significative du secteur : considérer la saumure non plus comme un déchet mais comme un **minerai liquide** contenant des ressources récupérables. Le lithium, dont la valeur s'envole avec l'essor des véhicules électriques, mérite une attention particulière dans le contexte algérien.

Enfin, le ZLD s'impose progressivement comme la solution de référence pour les zones marines protégées. Son déploiement en Algérie nécessitera un cadre réglementaire incitatif, des mécanismes de financement dédiés et une montée en compétence des opérateurs nationaux.

CHAPITRE III :
Techniques de Dispersion de la Saumure dans
les Milieux Aquatiques

Introduction :

Les chapitres précédents ont exposé le fonctionnement général des stations de dessalement et les enjeux de la gestion de la saumure. Ce troisième chapitre se concentre exclusivement sur l'aspect technique central : **comment disperser efficacement la saumure dans le milieu marin** de façon à minimiser l'impact environnemental tout en respectant les contraintes d'exploitation.

La saumure issue des procédés d'osmose inverse présente une salinité deux fois supérieure à celle de la mer Méditerranée (60–80 g/L contre 38–39 g/L). Si elle est rejetée sans dispositif adapté, elle plonge vers le fond par gravité et forme un panache dense persistant susceptible d'affecter les écosystèmes benthiques. Les infrastructures de dispersion — conduites, émissaires, diffuseurs — constituent la réponse technique à ce défi. [1]

Ce chapitre décrit avec précision chaque composant de la chaîne de dispersion, depuis la conduite de transport jusqu'aux diffuseurs spécialisés, en passant par les méthodes d'amélioration des performances et les outils de modélisation numérique. Des exemples concrets tirés des grandes stations algériennes — Magtaa et El Hamma — illustrent l'application pratique de ces techniques.

II.1 Principe de la Dispersion de la Saumure

II.1.1 But de la dispersion

La dispersion de la saumure a pour objectif fondamental de ramener, dans les plus brefs délais et dans un espace le plus restreint possible, la concentration en sel du rejet à un niveau biologiquement acceptable pour les organismes du milieu récepteur. Cet objectif se décline en trois exigences opérationnelles :

Dilution rapide : réduire la salinité du rejet de 60–80 g/L à moins de 40–42 g/L dans les premières dizaines de mètres autour du point de rejet, afin de protéger les organismes les plus sensibles (herbiers de *Posidonia oceanica*, invertébrés benthiques). [2]

Zone d'impact minimale : confiner l'anomalie de salinité significative ($> 0,5$ g/L par rapport à l'ambient) dans une zone de mélange définie et autorisée par la réglementation, généralement comprise entre 50 et 300 m autour du point de rejet.

Prévention de l'accumulation de fond : éviter la formation d'un panache de fond (bottom dense plume) stagnant qui concentrerait la saumure sur les zones benthiques de manière chronique, notamment lors des périodes de faible hydrodynamisme estival en Méditerranée.

II.1.2 Principe de dilution rapide dans le milieu marin

La dilution de la saumure dans le milieu marin résulte de deux mécanismes physiques distincts qui opèrent à des échelles spatiales différentes. Comprendre ces mécanismes est essentiel pour concevoir des

dispositifs de rejet efficaces. [4]

Le premier mécanisme est la **dilution turbulente par entraînement** (turbulent entrainment). Lorsque la saumure est éjectée à travers un diffuseur à une vitesse $v_{\blacksquare}$, le jet induit une turbulence mécanique qui entraîne de l'eau ambiante dans le panache. Plus la vitesse d'éjection est élevée, plus l'entraînement est intense et la dilution rapide. Ce phénomène gouverne la dilution en champ proche (0–500 m).

Le second mécanisme est la **dispersion par les courants marins ambiants**. À plus grande distance (champ lointain, > 500 m), ce sont les courants marins, la turbulence naturelle de la colonne d'eau et les échanges thermiques qui assurent la dilution finale de la saumure jusqu'au retour à la salinité ambiante. En mer Méditerranée, le courant algérien (orienté vers l'Est, vitesse moyenne 0,1–0,3 m/s) joue un rôle favorable dans cette phase. [5]

Le taux de dilution D est défini comme le rapport entre la salinité initiale de la saumure $S_{\blacksquare}$ et la salinité dans le panache à la distance considérée $S(x)$:

$$D(x) = S_{\blacksquare} / S(x)$$

Où : D = taux de dilution (–) | $S_{\blacksquare}$ = salinité saumure (g/L) | $S(x)$ = salinité à distance x (g/L)

Un taux de dilution $D = 10$ signifie que la saumure a été diluée 10 fois : une saumure à 70 g/L aura ainsi une salinité de 7 g/L... mais en pratique, seule l'anomalie de salinité est pertinente. On parle plutôt d'anomalie résiduelle : $\Delta S(x) = S(x) - S_{\text{ambiante}}$. L'objectif

réglementaire est généralement $\Delta S < 0,5$ g/L au-delà de la zone de mélange autorisée.

II.1.3 Notion de zone de mélange (mixing zone)

La zone de mélange (mixing zone) est le volume d'eau dans lequel s'effectue la dilution initiale de la saumure, depuis le point de rejet jusqu'à l'atteinte des concentrations admissibles. C'est une notion à la fois physique — définie par les équations hydrodynamiques — et réglementaire — délimitée par les autorités pour autoriser un dépassement temporaire des normes de qualité. [3]

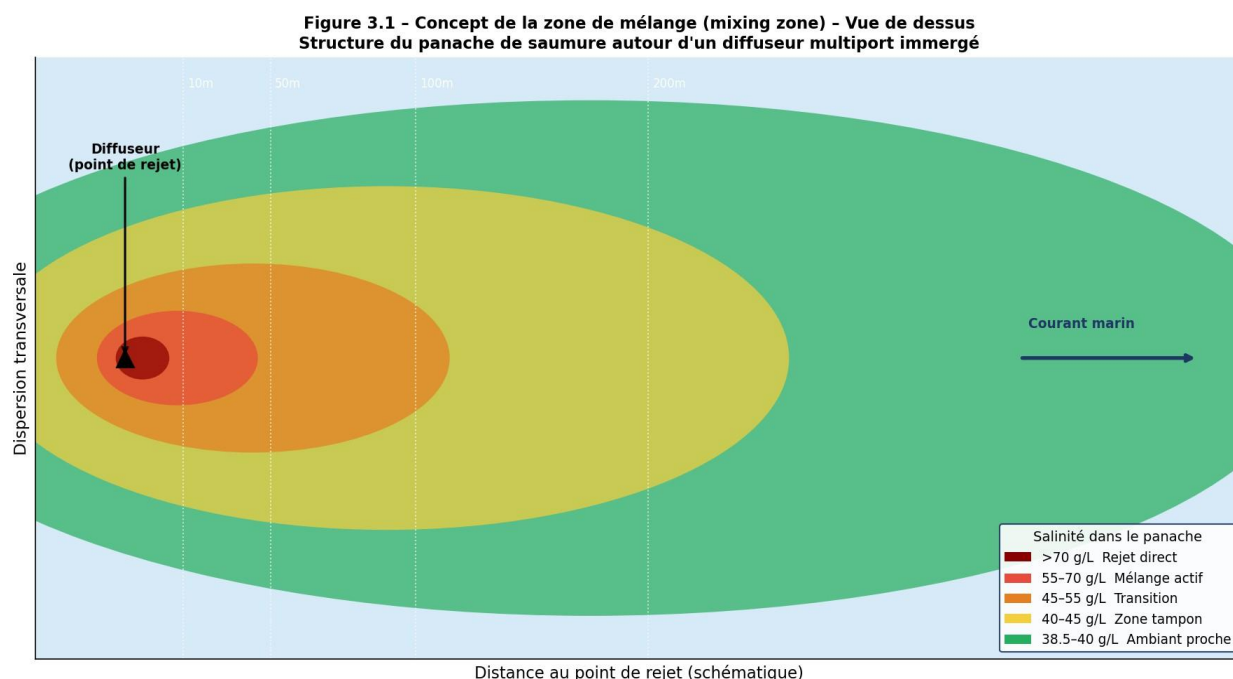


Figure III.1 : Concept de la zone de mélange (mixing zone) — Vue de dessus du panache de saumure autour d'un diffuseur immergé (courant de droite à gauche)

Source : synthèse d'après Palomar & Losada (2011) [4]

La Figure 3.1 illustre la structure concentrique du panache de saumure. Les concentrations les plus élevées (> 65 g/L, zone rouge) se trouvent immédiatement au-delà du diffuseur. Elles décroissent rapidement grâce à la turbulence induite par les jets, pour atteindre les valeurs ambiantes à quelques centaines de mètres en aval. La forme et l'étendue de chaque zone dépendent des paramètres du diffuseur et des conditions hydrodynamiques locales. [4]

Tableau III.1 : Structure de la zone de mélange et impacts biologiques associés (Méditerranée, diffuseur multiport, courant 0,1 m/s) — d'après Roberts et al. (2010) [3]

Zone	Distance typique	Salinité (g/L)	Processus dominant	Impact biologique
Zone de rejet direct	0–5 m	> 60	Jet turbulent pur	Létal pour organismes
Zone de mélange actif	5–50 m	45–60	Entraînement turbulent	Toxique pour Posidon
Zone d'influence proche	50–200 m	39,5–45	Courant + diffusion	Stress physiologique
Zone d'influence lointain	e200–500 m	38,5–39,5	Dispersion ambiante	Négligeable

III.1.4

Systèmes de Rejet de la Saumure

La chaîne de rejet de la saumure comprend deux composants principaux : la **conduite de transport** (pipeline), qui achemine la saumure depuis la station jusqu'au point de rejet, et l'**émissaire marin**, qui assure le rejet proprement dit dans le milieu marin. Ces deux éléments sont dimensionnés conjointement

avec les diffuseurs pour optimiser la dispersion.

III.1.5 Conduite de rejet (pipeline)

a) Transport de la saumure vers la mer

La conduite de rejet relie la sortie saumure de la station de dessalement jusqu'à la mer (ou jusqu'au pied de l'émissaire). Elle fonctionne généralement en écoulement gravitaire ou en charge légère, sans pompage spécifique, grâce à la pression résiduelle de la saumure sortant des membranes d'osmose inverse (0,5–2 bar). Dans certaines configurations, une station de pompage intermédiaire est nécessaire lorsque l'altitude du site impose un refoulement. [6]

La conception hydraulique de la conduite doit satisfaire deux critères antagonistes : (i) une vitesse d'écoulement suffisante ($> 0,6$ m/s) pour éviter le dépôt de sels et l'entartrage des parois ; (ii) des pertes de charge limitées pour ne pas augmenter excessivement les coûts de pompage. Le diamètre est calculé par la formule de Manning-Colebrook en tenant compte de la viscosité légèrement supérieure de la saumure concentrée.

b) Matériaux utilisés

Le choix du matériau est critique car la saumure, avec sa forte teneur en chlorures (30 000–38 000 mg/L Cl⁻), est hautement corrosive pour les métaux ferreux non protégés. Les matériaux retenus dans les projets modernes sont les suivants : [7]

Figure 3.2 - Types de matériaux utilisés pour les conduites de rejet de saumure (coupe transversale schématique)

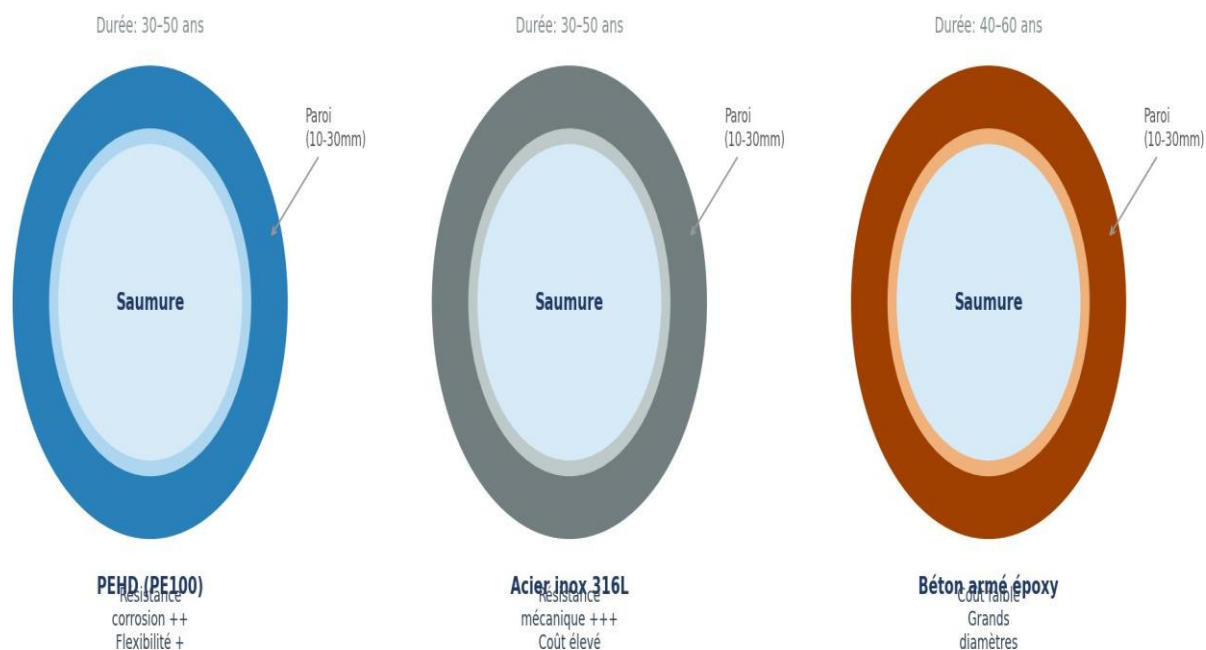


Figure III.2 : Types de matériaux utilisés pour les conduites de rejet de saumure (coupe transversale schématique et tableau comparatif)

Source : synthèse d'après Missimer & Maliva (2018) [7]

Tableau 3.2 : Matériaux utilisés pour les conduites de rejet de saumure

Matériau Rés	Distance corrosion	Diamètre max.	Durée de vie	Coût relatif	Application
PEHD (PE100)	Excellente	1 200 mm	30–50 ans	Faible	Conduites terrestres et sous-marines,
Acier inox 316L	Très bonne	2 000 mm	30–50 ans	Élevé	Grands diamètres, trépied de diffuseur
Béton précontraint	Bonne (surtout armé)	1 000 mm (max)	40–60 ans	Moyen	Émissaires côtiers posés sur fond marin
Fonte ductile époxy	Bonne	1 600 mm	30–40 ans	Moyen	Liaisons terrestres, faibles profondeurs

Sources : Missimer & Maliva (2018) [7] ; Chelali & Yaiche (2015) [8]

c) Distance par rapport à la côte

La distance de la prise d'émissaire par rapport à la côte est un paramètre de conception majeur qui conditionne à la fois le coût d'installation et les performances de dilution. Une plus grande distance permet un rejet à plus forte profondeur, ce qui améliore la dilution initiale. Elle éloigne également le point de rejet des zones côtières sensibles (herbiers, zones de frai, plages) mais accroît la longueur et le coût de l'ouvrage. [4]

Tableau II.3 : Relation entre distance de rejet, profondeur et performances de dilution d'après Benoudjit (2018) [5] et ANRH (2021) [9]

Distance côte-diffuseur	Profondeur typique (Méditerranée)	Dilution initiale	Coût (k€/m d'émissaire)	Recommandation
< 200 m	< 5 m	3–8×	5–10	Insuffisant — impact élevé
200–500 m	5–12 m	8–20×	8–15	Acceptable pour petites stations
500–1 000 m	12–22 m	20–40×	12–25	Recommandé — standard algues
1 000–2 000 m	20–35 m	35–70×	20–40	Optimal — grandes stations S
> 2 000 m	> 35 m	60–100×	35–60	Très bon — coût élevé

III.1.6 Émissaires marins

a) Définition

Un émissaire marin (submarine outfall) est un ouvrage hydraulique posé ou ancré sur le fond marin, constitué d'une canalisation principale prolongeant la conduite terrestre au-delà de la plage et de la zone de déferlement. Il se termine par une **section de diffusion** équipée de dispositifs spéciaux (diffuseurs, rosettes) permettant le rejet contrôlé de la saumure. C'est l'élément central du système de dispersion. [10]

b) Structure et installation

Un émissaire marin comprend typiquement trois parties fonctionnelles distinctes, comme l'illustre la Figure 3.3 :

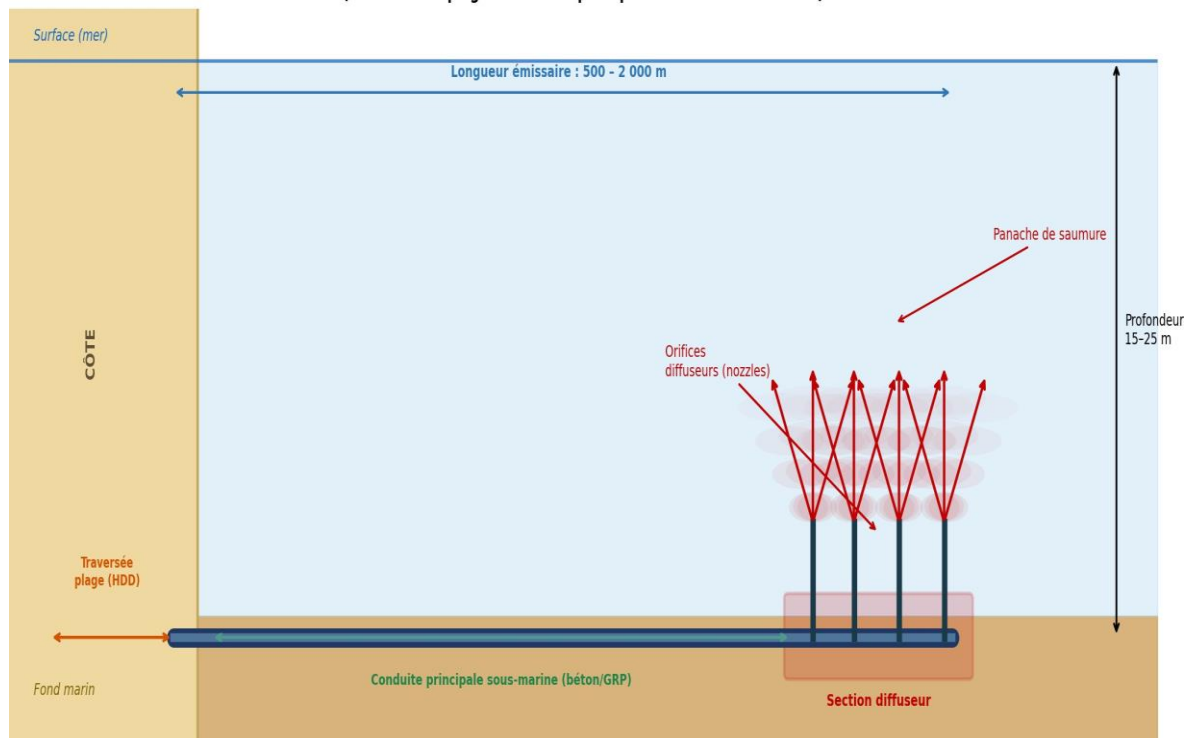
Traversée de plage (beach crossing) : franchissement de la zone intertidale par forage dirigé horizontal (HDD) ou tranchée ouverte. Longueur : 50–300 m. Matériau : PEHD haute rigidité.

Conduite principale sous-marine : tronçon immergé et posé sur le fond marin, ancré par des lestes béton espacés de 5–10 m. Longueur variable (100 m à plusieurs km). Matériau : béton précontraint ou GRP.

Section de diffusion : tronçon terminal équipé de colonnes montantes (risers) et d'orifices calibrés (nozzles) par lesquels la saumure est éjectée dans la colonne d'eau. Longueur : 20–200 m selon le débit et l'objectif de dilution.

Figure III.3 : Structure d'un émissaire marin — Vue en coupe longitudinale

Figure 3.3 - Structure d'un émissaire marin - Vue en coupe longitudinale
(traversée de plage + conduite principale + section de diffusion)



(traversée de plage + conduite principale + section diffuseur)

Source : adapté de Palomar & Losada (2011) [4]

c) Importance dans la dispersion

L'émissaire joue un rôle fondamental dans la qualité de la dispersion pour trois raisons

Éloignement du point de rejet : en portant le rejet au large, l'émissaire exploite des zones à plus forte profondeur et à meilleur renouvellement hydrodynamique, réduisant ainsi le temps de résidence de la saumure concentrée dans les zones côtières sensibles.

Support mécanique des diffuseurs : l'émissaire constitue la structure porteuse des diffuseurs qui, en étant immergés à bonne profondeur, bénéficient d'une hauteur d'eau plus importante pour l'entraînement de l'eau ambiante dans le panache.

Stabilité hydraulique : la longueur et le profil en long de l'émissaire conditionnent la distribution des débits entre les différents orifices des diffuseurs. Un calcul hydraulique soigné est indispensable pour garantir une distribution uniforme du débit entre tous les ports. [4]

III.2 Diffuseurs de Saumure

Le diffuseur est le composant le plus critique du système de rejet. C'est lui qui transforme l'énergie hydraulique disponible en turbulence et en entraînement d'eau ambiante, générant la dilution initiale. La qualité de sa conception détermine directement l'étendue de la zone de mélange et l'impact environnemental du rejet. [4]

Il existe trois grandes familles de diffuseurs, distinguées par le nombre d'orifices et leur orientation : le

diffuseur simple, le diffuseur multiport et le diffuseur incliné. Ces types peuvent être combinés. La Figure 3.4 les compare schématiquement.

Figure 3.4 - Comparaison des trois types de diffuseurs de saumure
(vue en coupe, schéma de principe)

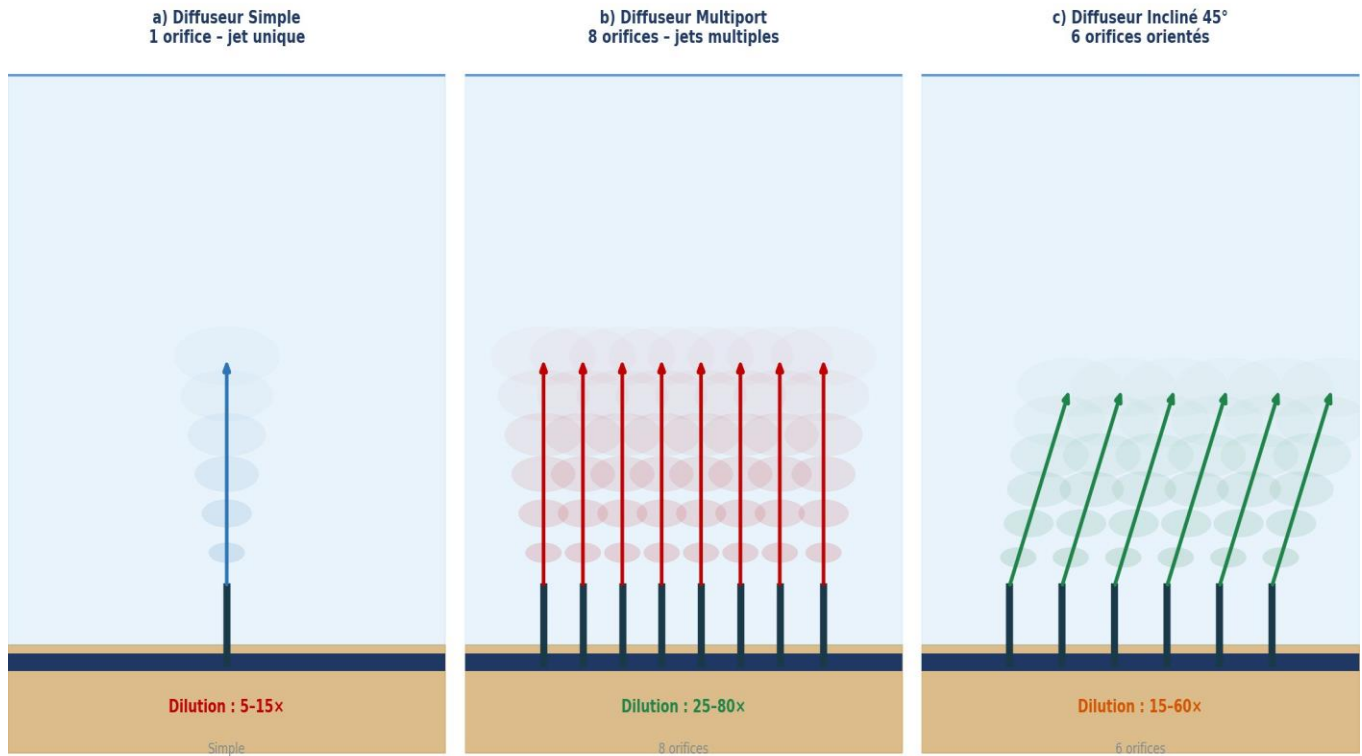


Figure III.4 : Comparaison des trois types de diffuseurs de saumure — vue en coupe schématique a) Diffuseur simple b) Diffuseur multiport c) Diffuseur incliné 45°
Source : adapté de Palomar & Losada (2011) [4] et Roberts et al. (2010) [3]

III.2.1 Diffuseur simple

a) Description — une seule sortie

Le diffuseur simple est la forme la plus basique de dispositif de rejet. Il consiste en une seule ouverture en extrémité de la conduite ou sur la face supérieure d'un riser unique. La saumure est éjectée en un jet unique, généralement vertical, au-dessus du fond marin.

b) Fonctionnement

Le jet unique éjecté par un diffuseur simple monte dans la colonne d'eau en entraînant l'eau ambiante sur son pourtour. Cette dilution par entraînement est cependant limitée car le jet est unique et la surface de contact jet/eau ambiante est faible. Deux régimes sont possibles selon la densité relative de la saumure et les conditions de stratification de la colonne d'eau : [11]

Jet montant (buoyant jet) : si le milieu ambiant est plus dense que la saumure éjectée (cas rare — saumure diluée), le jet monte jusqu'à la surface et se disperse en surface.

Chapitre III : Techniques de Dispersion de la Saumure dans les Milieux Aquatiques

Panache plongeant (negatively buoyant plume) : cas le plus fréquent avec la saumure concentrée ($\rho_{\text{saumure}} > \rho_{\text{mer}}$). Après une zone d'éjection initiale ascendante, le panache retombe vers le fond et forme un panache de fond dense. C'est le principal inconvénient du diffuseur simple.

La dilution initiale D obtenue avec un diffuseur simple en milieu peu profond est modeste, typiquement 5 à 15 fois à 50 m du point de rejet. Cette performance insuffisante le rend inadapté pour les grandes stations ou les zones écologiquement sensibles. Il est principalement utilisé pour les unités de faible capacité ($< 5\,000\text{ m}^3/\text{j}$) en sites à fort courant ambiant. [3]

Tableau III. 4 : Caractéristiques typiques d'un diffuseur simple d'après Palomar & Losada (2011)[4]

Paramètre	Valeur typique	Remarque
Nombre d'orifices	1	Rejet unique
Diamètre orifice (D_{or})	100–300 mm	Diamètre élevé = faible vitesse = faible dilution
Vitesse de sortie (v_{or})	0,3–1,2 m/s	Limitée par pertes de charge
Dilution initiale (à 50 m)	5–15×	Insuffisant pour zones sensibles
Profondeur minimale recommandée	$e > 5\text{ m}$	Faible exigence
Coût d'installation	Faible	Solution économique pour petites stations
Maintenance	Simple	Aucune partie mobile

III.2.2 Diffuseur multiport

a) Plusieurs petits orifices

Le diffuseur multiport (multiport diffuser) est la technologie de référence pour les grandes stations de dessalement. Il est constitué d'un tronçon de conduite immergée sur lequel sont disposés, à intervalles réguliers, plusieurs colonnes montantes (risers) terminées par des orifices (nozzles) de petit diamètre. Chaque orifice éjecte un jet individuel de saumure à grande vitesse. [4]

La configuration type comprend 4 à 80 orifices (selon le débit total et le débit unitaire visé par orifice), espacés de 2 à 6 m le long de la section diffuseur. Le diamètre individuel de chaque orifice est faible (40–120 mm), ce qui permet d'atteindre des vitesses de sortie élevées (1,0–3,0 m/s) pour un débit total identique à celui d'un diffuseur simple de grand diamètre.

b) Meilleure dilution

Chapitre III : Techniques de Dispersion de la Saumure dans les Milieux Aquatiques

L'avantage fondamental du diffuseur multiport réside dans le rapport surface de contact/volume rejeté : plusieurs jets de petit diamètre offrent une surface d'entraînement bien supérieure à celle d'un jet unique. La dilution initiale D obtenue est 3 à 10 fois supérieure à celle d'un diffuseur simple de même débit total. [3]

Des études de terrain sur des stations méditerranéennes montrent que des diffuseurs multiports correctement dimensionnés permettent de réduire l'anomalie de salinité à moins de $\Delta S = 0,5$ g/L dès 50–150 m du rejet — valeur considérée comme biologiquement négligeable pour la plupart des espèces marines, y compris *Posidonia oceanica*. [12]

Tableau III.5 : Comparaison quantitative diffuseur simple vs diffuseur multiport d'après Roberts et al. (2010) [3] et Palomar & Losada (2011) [4]

Paramètre	Diffuseur simple	Diffuseur multiport	Gain
Nombre d'orifices	1	4–80	$\times 4$ à $\times 80$
Diamètre orifice	100–300 mm	40–120 mm	$\div 3$ à $\div 5$
Vitesse de sortie v	0,3–1,2 m/s	1,0–3,0 m/s	$\times 3$ à $\times 6$
Surface d'entraînement	Faible	Très élevée	$\times 5$ à $\times 20$
Dilution à 50 m	5–15 $\times$	25–80 $\times$	$\times 3$ à $\times 10$
Dilution à 200 m	10–25 $\times$	50–150 $\times$	$\times 3$ à $\times 8$
$\Delta S < 0,5$ g/L atteinte à	200–500 m	30–150 m	$\div 3$ à $\div 10$

III.3 Diffuseurs inclinés

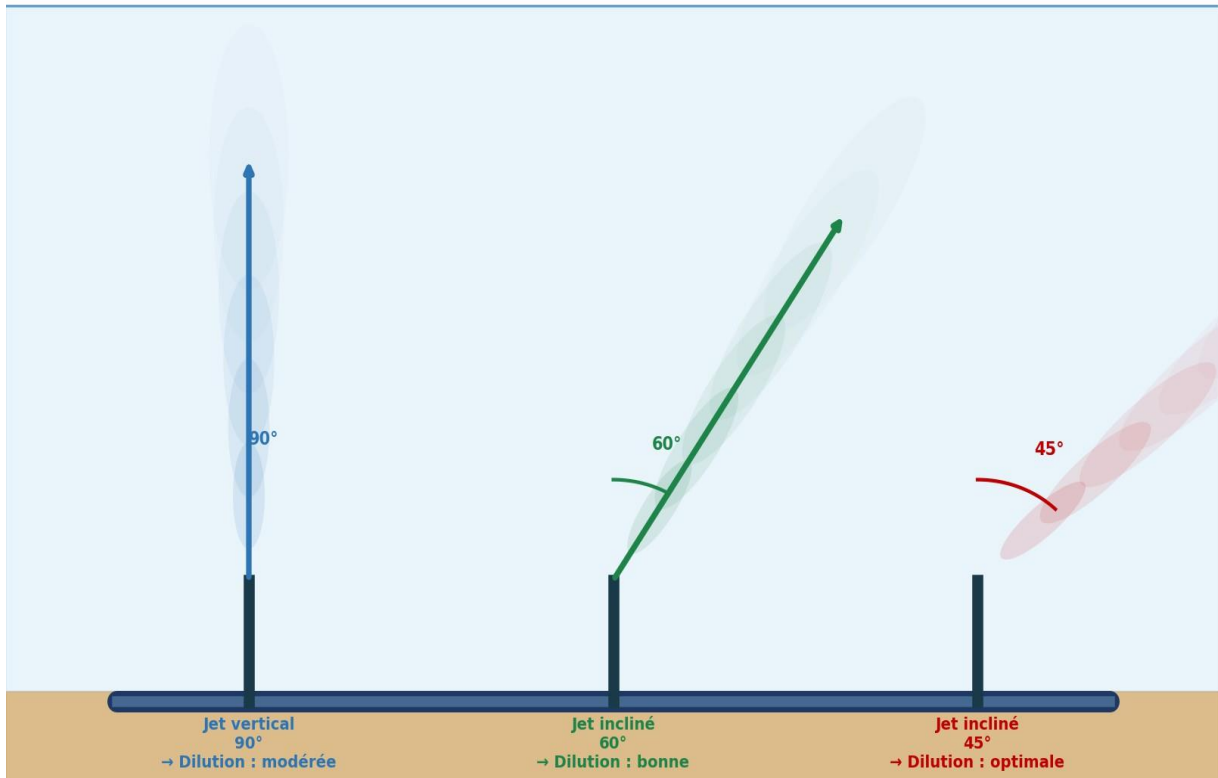
a) Orientation des jets

Le diffuseur incliné est une variante du diffuseur simple ou multiport dans laquelle les orifices sont orientés selon un angle non vertical par rapport au fond marin. Les angles couramment utilisés sont 45°, 60° ou 30° par rapport à l'horizontale. Cette orientation peut être fixe (soudée) ou ajustable selon les modèles récents. [4]

L'orientation en rosette (plusieurs jets dans des directions azimutales différentes, typiquement espacés de 30° à 45°) est une configuration avancée permettant une dispersion isotrope maximale, particulièrement adaptée aux zones à courant variable ou faible.

Figure III.9 : Effet de l'orientation des jets sur le mélange de la saumure (comparaison 90° vertical vs 60° vs 45° — même débit et même pression)

Figure 3.9 - Effet de l'orientation des jets sur le mélange de la saumure (comparaison 90° - 60° - 45° pour le même débit et la même pression)



Source : adapté de Palomar & Losada (2011) [4]

b) Amélioration du mélange

L'inclinaison des jets améliore la dilution pour deux raisons physiques complémentaires

Augmentation de la trajectoire du jet : un jet incliné parcourt une distance plus longue dans la colonne d'eau avant d'atteindre le fond ou la surface. Cette trajectoire allongée augmente la durée d'entraînement et donc la quantité d'eau ambiante incorporée dans le panache.

Interaction avec le courant : un jet orienté dans le sens du courant ambiant (ou de biais par rapport à lui) interagit plus efficacement avec l'écoulement, générant davantage de cisaillement turbulent et d'entraînement latéral.

Des études numériques (CORMIX, OpenFOAM) montrent qu'un angle optimal de 55–65° par rapport à l'horizontale permet d'augmenter la dilution initiale de 20 à 40% par rapport à un jet vertical, pour les mêmes conditions hydrauliques. C'est pourquoi les nouvelles stations optent généralement pour des diffuseurs inclinés à 60° dans leurs guides de conception. [4, 6]

Chapitre III : Techniques de Dispersion de la Saumure dans les Milieux Aquatiques

Tableau III .6 : Effet de l'angle d'inclinaison sur la dilution initiale du jet d'après Palomar & Losada (2011) [4] et Missimer & Maliva (2018) [7]

Angle d'inclinaison	Trajectoire jet	Dilution initiale (relative)	Sensibilité courant	Recommandation
90° (vertical)	Courte	Référence (1,0×)	Faible	Standard — zones à fort co
60° par rapport à l'horiz.	Moyenne	+20 à +30%	Modérée	Recommandé — bon comp
45° par rapport à l'horiz.	Longue	+30 à +40%	Élevée	Optimal — courant modéré
30° par rapport à l'horiz.	Très longue	+15 à +25%	Très élevée	Spécifique — courant bien
Rosette (multiple angles)	Variable	+35 à +50%	Faible (omnidirectionn	eId)éal — courant variable

III.4 Méthodes d'Amélioration de la Dispersion

Au-delà du choix du type de diffuseur, plusieurs leviers techniques permettent d'améliorer les performances de dilution d'un système existant ou d'optimiser la conception d'une nouvelle installation. Ces méthodes agissent sur les paramètres hydrauliques ou géométriques du système de rejet.

III.4.1 Augmenter la vitesse de sortie et le nombre d'orifices

La vitesse de sortie $v_{\blacksquare}$ des jets est le paramètre hydraulique ayant la plus forte influence sur la dilution initiale. L'entraînement d'eau ambiante est proportionnel à $v_{\blacksquare}$ élevé à une puissance comprise entre 0,5 et 0,7 selon les configurations. Augmenter $v_{\blacksquare}$ de 1 à 2 m/s augmente ainsi la dilution d'un facteur 1,5 environ. [4]

Cependant, $v_{\blacksquare}$ ne peut pas être augmentée indéfiniment : des vitesses trop élevées (> 3 m/s) entraînent une usure prématurée des orifices par cavitation et une consommation énergétique excessive. Le domaine optimal pour les diffuseurs de saumure méditerranéens se situe entre 1,5 et 2,5 m/s. [3]

Figure 3.5 - Méthodes d'amélioration de la dispersion
Influence de la vitesse et du nombre d'orifices

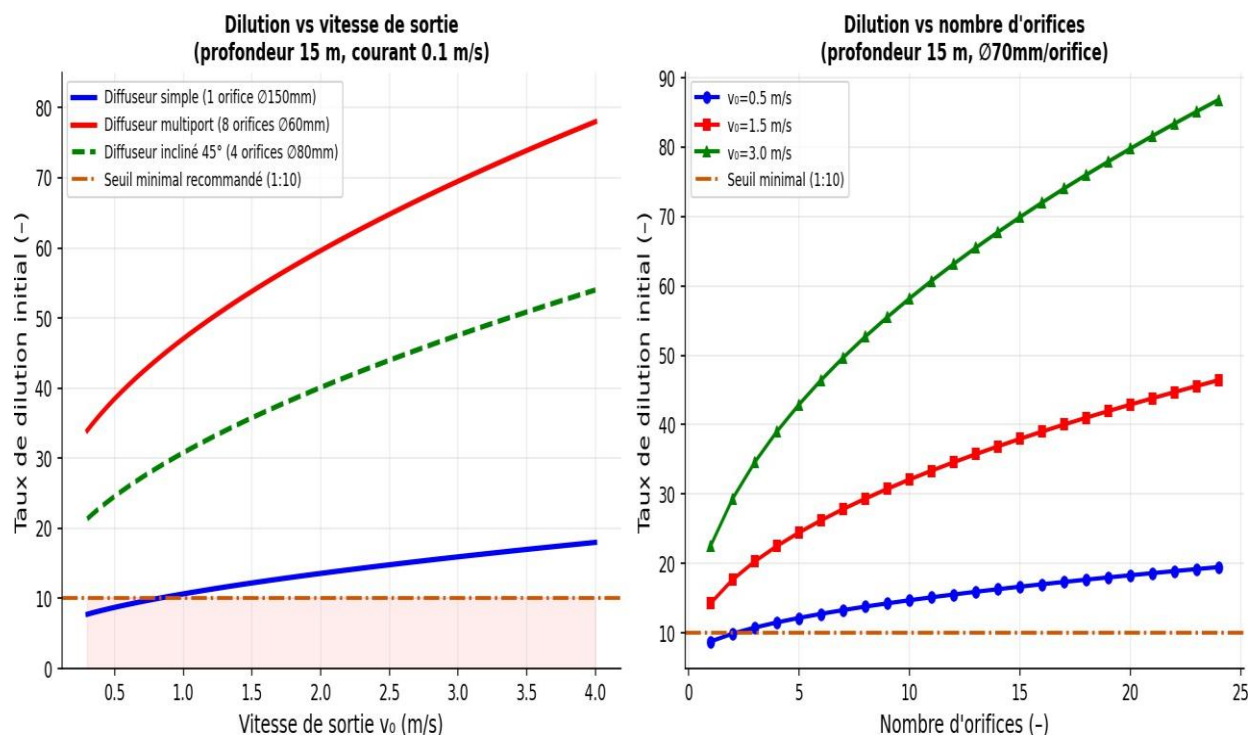


Figure III.5 : Méthodes d'amélioration de la dispersion — Gauche : dilution vs vitesse de sortie | Droite : dilution vs nombre d'orifices

Source : simulations adaptées d'après Palomar & Losada (2011) [4] et Roberts et al. (2010) [3]

La Figure 3.5 (gauche) montre que pour un diffuseur multiport, la dilution à 100 m du rejet passe de $\sim 30\times$ à $\sim 70\times$ lorsque $v_{\blacksquare}$ augmente de 0,5 à 3,0 m/s. La Figure 3.5 (droite) illustre l'effet du nombre

d'orifices : passer de 1 à 10 orifices multiplie la dilution par 3–4 pour une même vitesse de sortie.

Tableau III.7 : Quantification des gains de dilution selon les leviers d'amélioration d'après Roberts et al. (2010) [3] et Missimer & Maliva (2018) [7]

Levier d'amélioration	Gain dilution estimé	Surcoût	Contrainte principale
$v_{\text{jet}} : 1,5 \square 2,5 \text{ m/s}$	+30 à +50%	Pompage +30 kW pour 1 000 m ³ /h	Usure des orifices
Nb orifices : 1 $\square$ 5	+150 à +200%	Fabrication diffuseur (+30%)	Équilibrage des débits
Nb orifices : 5 $\square$ 20	+60 à +80%	Fabrication diffuseur (+50%)	Longueur section diffuseur
Orientation : 90° $\square$ 60°	+20 à +35%	Nul (conception)	Sensibilité au courant
Profondeur : 10 $\square$ 20 m	+40 à +60%	Longueur émissaire (+100 m)	Coût de génie civil

III.4.2 Orientation des jets et choix de la profondeur

c) Orientation optimale

L'orientation des jets par rapport au courant dominant est un paramètre souvent négligé lors de la conception mais qui peut améliorer la dilution de 20 à 40%. La règle générale est d'orienter les orifices de manière à maximiser l'angle entre le jet et le courant, augmentant ainsi le cisaillement turbulent à l'interface jet/eau ambiante. L'outil de modélisation CORMIX permet d'optimiser cet angle pour les conditions hydrodynamiques spécifiques du site. [5]

d) Choix de la profondeur de rejet

La profondeur de rejet est le paramètre ayant la plus forte influence sur la qualité globale de la dispersion car elle détermine à la fois la hauteur d'entraînement disponible pour les jets et l'intensité des courants ambiants (généralement plus forts en profondeur).

[6]

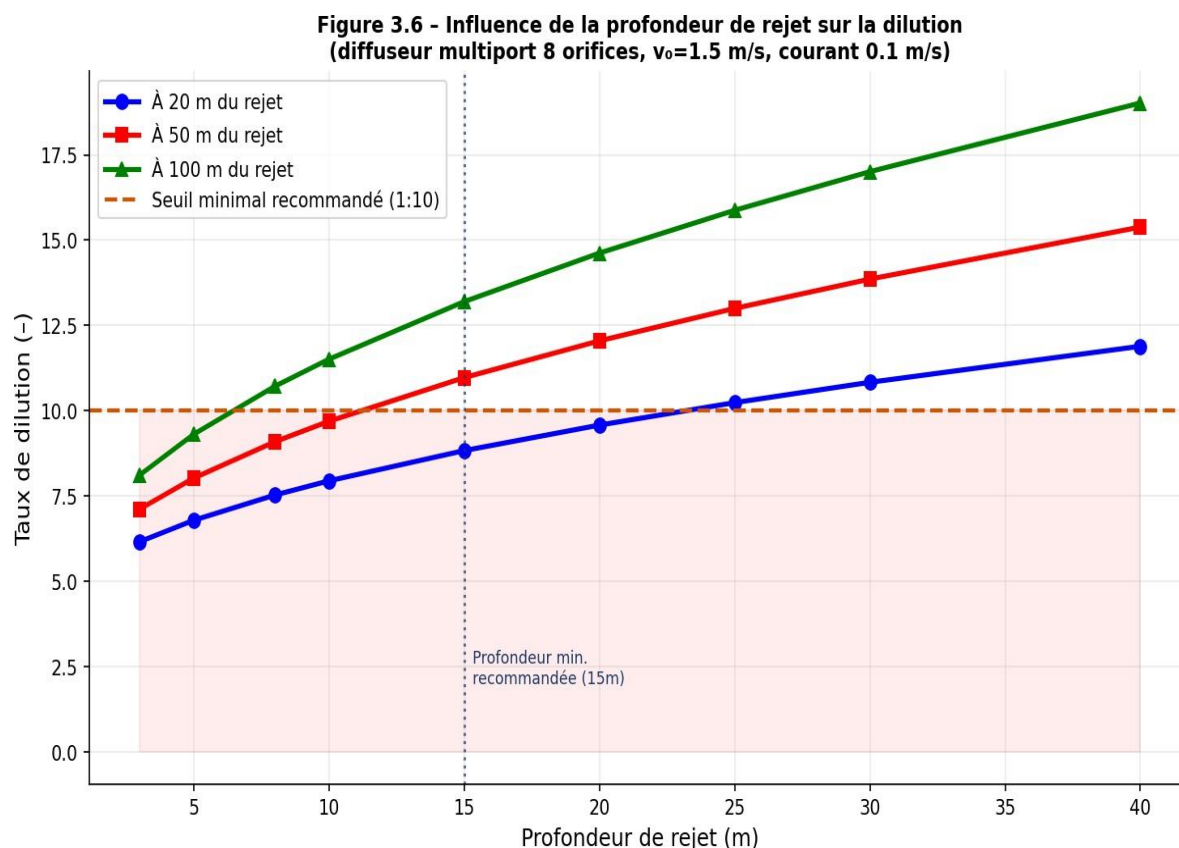


Figure III.6 : Influence de la profondeur de rejet sur le taux de dilution (diffuseur multiport 8 orifices, $v_0 = 1,5$ m/s, courant 0,1 m/s) Source : simulations numériques adaptées d'après Benoudjit (2018) [5]

La Figure 3.6 montre qu'une augmentation de la profondeur de 5 à 20 m multiplie par 3 à 4 le taux de dilution mesuré à 100 m du rejet. Pour les stations algériennes, une profondeur minimale de 15–20 m est recommandée, correspondant aux isobathes situées à 400–1 200 m du littoral selon les secteurs du littoral méditerranéen algérien. [5]

III.5 Modélisation de la Dispersion

La modélisation numérique de la dispersion de la saumure est devenue une étape incontournable dans la conception des systèmes de rejet. Elle permet d'optimiser les paramètres du diffuseur avant construction et de prédire l'étendue de la zone de mélange pour les études d'impact environnemental.

III.5.1 Modèles hydrodynamiques utilisés

A. Modèles de champ proche (near-field)

Les modèles de champ proche simulent le comportement du jet de saumure depuis le point de rejet jusqu'à la zone où l'influence du jet lui-même devient négligeable devant celle des courants ambiants (0–500 m). Ces modèles intègrent les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique turbulente. [13]

-CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System) : modèle semi-analytique américain (Universités Cornell et TU Delft), référence internationale pour la conception des diffuseurs de saumure. Gratuit pour la recherche, utilisé dans les EIE algériennes récentes. Données requises : débit, géométrie du diffuseur, salinité, courant local, stratification de densité, bathymétrie locale. [5]

-VisJet : modèle lagrangien développé à l'Université de Hong Kong, spécialisé dans les configurations de jets multiples. Particulièrement adapté à la simulation des diffuseurs multiports avec visualisation 3D du panache.

-NRFIELD / VISUAL PLUMES : logiciel de l'US-EPA (Environmental Protection Agency) pour la simulation des panaches denses en milieu côtier. Version récente intègre la modélisation des rejets de saumure spécifiquement.

B. Modèles de champ lointain (far-field)

Au-delà de 500 m, la dispersion est dominée par les courants marins à grande échelle. Des modèles numériques 3D à mailles variables sont utilisés :

-MIKE 3 (DHI Software) : modèle volumes finis tridimensionnel largement utilisé en Méditerranée. Appliqué par l'ANRH et l'USTHB pour la modélisation des panaches de saumure sur le littoral algérien (Benoudjit, 2018 [5]). Requier une importante base de données bathymétriques et de courantologie.

-Delft3D (Deltares) : modèle différences finies utilisé pour la simulation régionale à l'échelle du bassin méditerranéen occidental. Intègre les forçages météo-océaniques (vent, marée, flux de chaleur).

Figure 3.7 - Chaîne de modélisation hydrodynamique pour la conception du système de dispersion

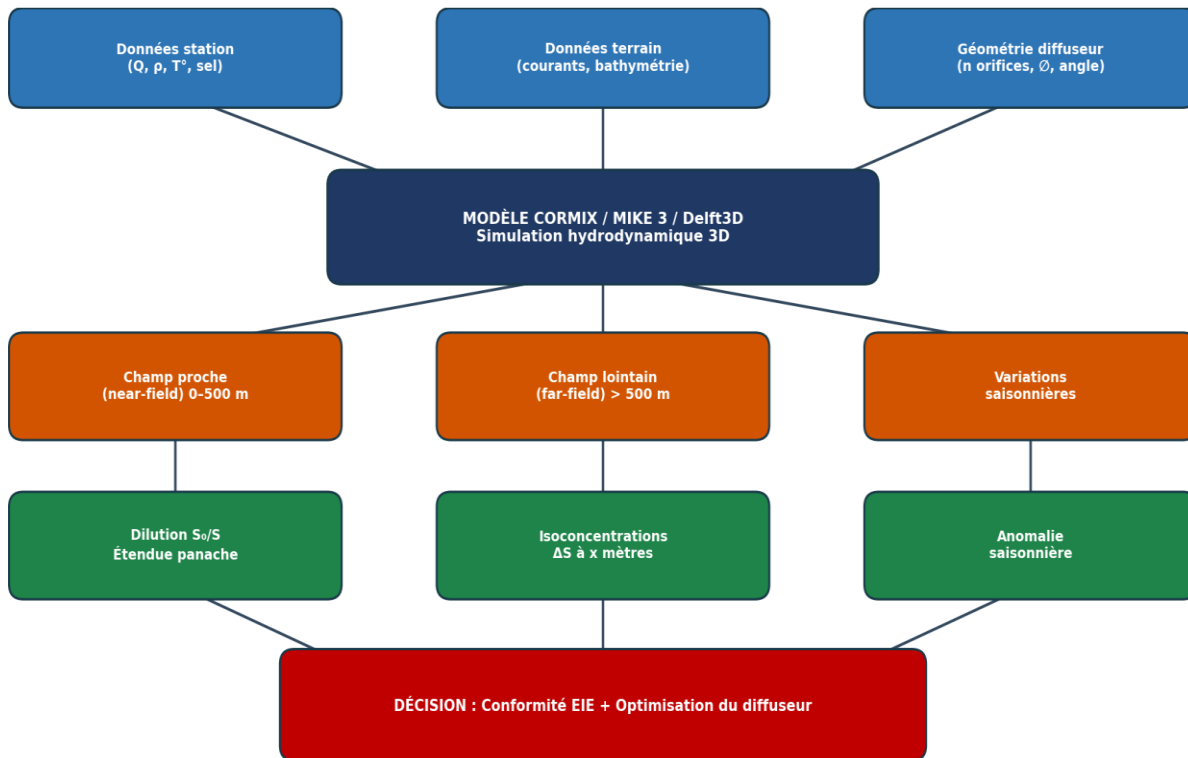


Figure III.7 : Chaîne de modélisation hydrodynamique pour la conception du système de dispersion (de la collecte des données à la décision réglementaire)

Source : adapté de Benoudjit (2018) [5] et Palomar & Losada (2011) [4]

III.5.1 Simulation du mélange et importance dans la conception

La modélisation hydrodynamique intervient à trois stades du projet :

Phase de conception préliminaire : comparaison de plusieurs variantes de diffuseurs (simple vs multiport, profondeur 10 m vs 20 m, 4 ports vs 12 ports) pour identifier la configuration offrant le meilleur rapport performance/coût. Le modèle CORMIX permet d'évaluer 10 à 20 variantes en quelques heures de calcul.

Phase d'étude d'impact environnemental (EIE) : production des cartographies de salinité, des courbes d'isoconcentration et de la définition réglementaire de la zone de mélange soumise à l'approbation des autorités (Ministère de l'Environnement, ANRH). La simulation doit couvrir les scénarios saisonniers les plus défavorables (courant minimal d'été, stratification thermique maximale). [9]

Phase de surveillance post-mise en service : comparaison entre les prédictions du modèle et les mesures terrain (sondes CTD, campagnes de mesures biologiques) pour valider le modèle et détecter tout impact non anticipé. En Algérie, ce suivi est exigé par la circulaire MATE 2015 pour les stations de capacité > 50 000 m³/j.

L'importance de la modélisation dans la conception est illustrée par l'expérience de la station de Torrevieja (Espagne, 240 000 m³/j) : l'optimisation du diffuseur par modélisation CORMIX a permis de réduire la zone d'impact sur Posidonia oceanica d'un rayon de 250 m à 30 m, sans surcoût d'infrastructure grâce à une simple réorientation des orifices. [4]

III.5.2 Exemples de Techniques dans les Stations de Dessalement Algériennes

L'Algérie possède deux grandes stations de dessalement d'eau de mer par osmose inverse qui constituent des références nationales en matière de systèmes de dispersion de la saumure : la station de Magtaa à Oran et la station d'El Hamma à Alger. Leurs configurations techniques illustrent concrètement les principes décrits dans ce chapitre.

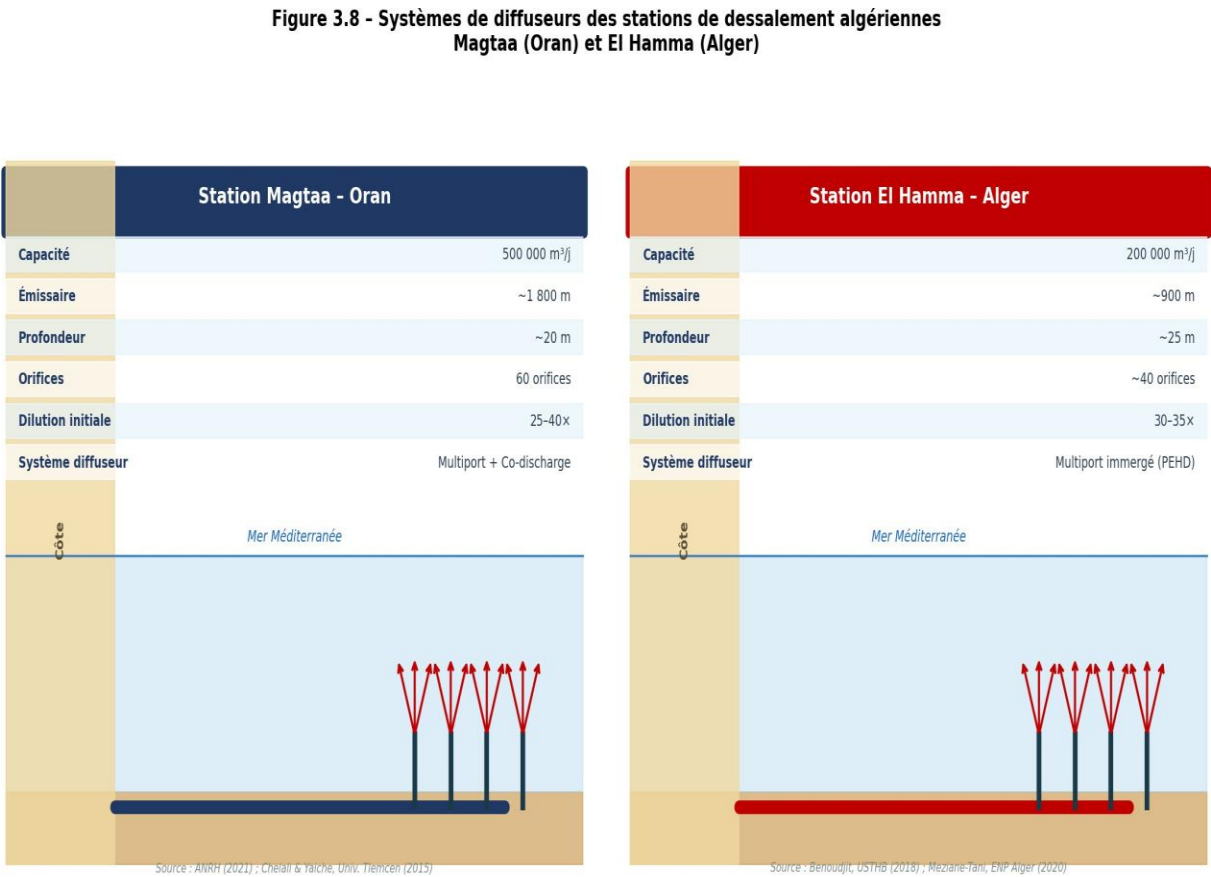


Figure III.8 : Systèmes de diffuseurs des stations Magtaa (Oran) et El Hamma (Alger)
Source : ANRH (2021) [9] ; Benoudjit (2018) [5] ; Meziane-Tani & Bouguettaia (2020) [14]

III.5.3 Station Magtaa — Oran

A. Présentation générale

La station de dessalement de Magtaa, opérationnelle depuis 2014, est la **plus grande station de dessalement d'Algérie et d'Afrique** avec une capacité nominale de **500 000 m³/jour** d'eau potable produite. Elle est implantée à l'Ouest d'Oran, sur la commune de Bethioua, à proximité de la centrale électrique de Marsat El Hadjadj dans le cadre d'un projet IWPP (Independent Water and Power Plant). [9]

Sa production de saumure est estimée à environ **420 000 à 450 000 m³/jour**, ce qui en fait le plus grand volume de saumure à gérer du pays. La salinité de la saumure en sortie de membranes est comprise entre 65 et 75 g/L (taux de récupération OI □ 45%).

B. Système de rejet et diffuseur utilisé

La station Magtaa utilise un **système de co-discharge combiné à un émissaire à diffuseurs multiports**. La saumure est mélangée avec une fraction de l'eau de refroidissement de la centrale électrique associée dans un rapport volumique d'environ 3:1 (eau de refroidissement : saumure), ramenant la salinité effective du rejet de 70 g/L à environ 48–52 g/L avant injection dans le diffuseur. [9]

Tableau III.8 : Caractéristiques du système de rejet de la station Magtaa (Oran)

Caractéristique	Valeur
Capacité de production	500 000 m ³ /j
Volume saumure rejeté	~430 000 m ³ /j
Salinité saumure brute	65–75 g/L
Salinité après co-discharge (ratio 3:1)	48–52 g/L
Longueur émissaire	~1 800 m
Profondeur de rejet	~20 m
Nombre de diffuseurs/orifices	60 orifices multiports
Diamètre orifices (estimé)	80–100 mm
Dilution initiale estimée (CORMIX)	25–40×

Caractéristique	Valeur
Distance $\square S < 0,5 \text{ g/L}$	$< 80 \text{ m}$ du diffuseur
Type de diffuseur	Multiport, jets inclinés

Sources : ANRH (2021) [9] ; Chelali & Yaiche (2015) [8]

C. Performance environnementale

Le programme de surveillance environnemental de la station Magtaa, conduit par l'ANRH, a montré que l'anomalie de salinité est inférieure à $0,5 \text{ g/L}$ au-delà de $60\text{--}80 \text{ m}$ du diffuseur dans les conditions de courant nominal (courant de surface $0,10\text{--}0,15 \text{ m/s}$ orienté vers le Nord-Est). En période estivale de faible renouvellement hydrodynamique, cette distance peut atteindre $100\text{--}120 \text{ m}$, restant dans les limites fixées par l'EIE approuvée par le Ministère de l'Environnement. [9]

III.5.4 Station El Hamma — Alger

A. Présentation générale

La station de dessalement d'El Hamma, mise en service en **2008**, est la **première grande station d'osmose inverse d'Algérie** pour l'alimentation en eau potable d'une grande agglomération. Implantée au niveau de la baie d'Alger, elle produit **$200\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$** d'eau potable et alimente près de 2,5 millions d'habitants de la wilaya d'Alger.

[14]

Le volume de saumure généré est d'environ **$160\,000$ à $180\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$** , avec une salinité comprise entre 60 et 70 g/L en sortie de membranes (taux de récupération OI $\square 47\%$).

B. Système de rejet et diffuseur utilisé

La station El Hamma utilise un **émissaire marin avec diffuseur multiport immergé**, sans co-discharge avec une centrale électrique. L'émissaire d'une longueur d'environ **900 m** est posé sur le fond de la baie d'Alger à une profondeur de **25 m** . Il se termine par une section de diffusion équipée d'environ **40 orifices** de 80 mm de diamètre, répartis sur une longueur de 80 m . [5]

Tableau III.9 : Caractéristiques du système de rejet de la station El Hamma (Alger)

Caractéristique	Valeur
Capacité de production	200 000 m ³ /j
Volume saumure rejeté	~170 000 m ³ /j
Salinité saumure rejetée	60–70 g/L
Longueur émissaire	~900 m
Profondeur de rejet	~25 m
Nombre d'orifices	~40 orifices multiports
Diamètre orifices (estimé)	~80 mm
Dilution initiale estimée (CORMIX)	30–35×
Distance $\square S < 0,5$ g/L	< 70 m du diffuseur
Type de diffuseur	Multiport vertical
Cadre réglementaire EIE	Validé MATE Algérie 2006

Sources : Benoudjit (2018) [5] ; Meziane-Tani & Bouguettaia (2020) [14]

C. Retour d'expérience

Les travaux de Meziane-Tani & Bouguettaia (2020) ^[14], réalisés dans le cadre d'un mémoire de master à l'École Nationale Polytechnique d'Alger (ENP), ont conduit une analyse comparative entre les prédictions du modèle CORMIX et les mesures in situ effectuées autour du point de rejet de la station El Hamma. Leurs résultats montrent un bon accord entre modèle et mesures, validant la pertinence de l'outil CORMIX pour les conditions hydrodynamiques de la baie d'Alger.

Ces mesures ont également révélé une asymétrie saisonnière importante : en été (juillet–août), lorsque la stratification thermique de la baie d'Alger est maximale, l'anomalie de salinité à 50 m du diffuseur est deux fois supérieure à celle observée en hiver. Ce constat plaide pour un dimensionnement des diffuseurs basé sur les conditions estivales de faible hydrodynamisme.

Figure 3.10 - Analyse comparative des types de diffuseurs (note /5 sur 6 critères techniques)

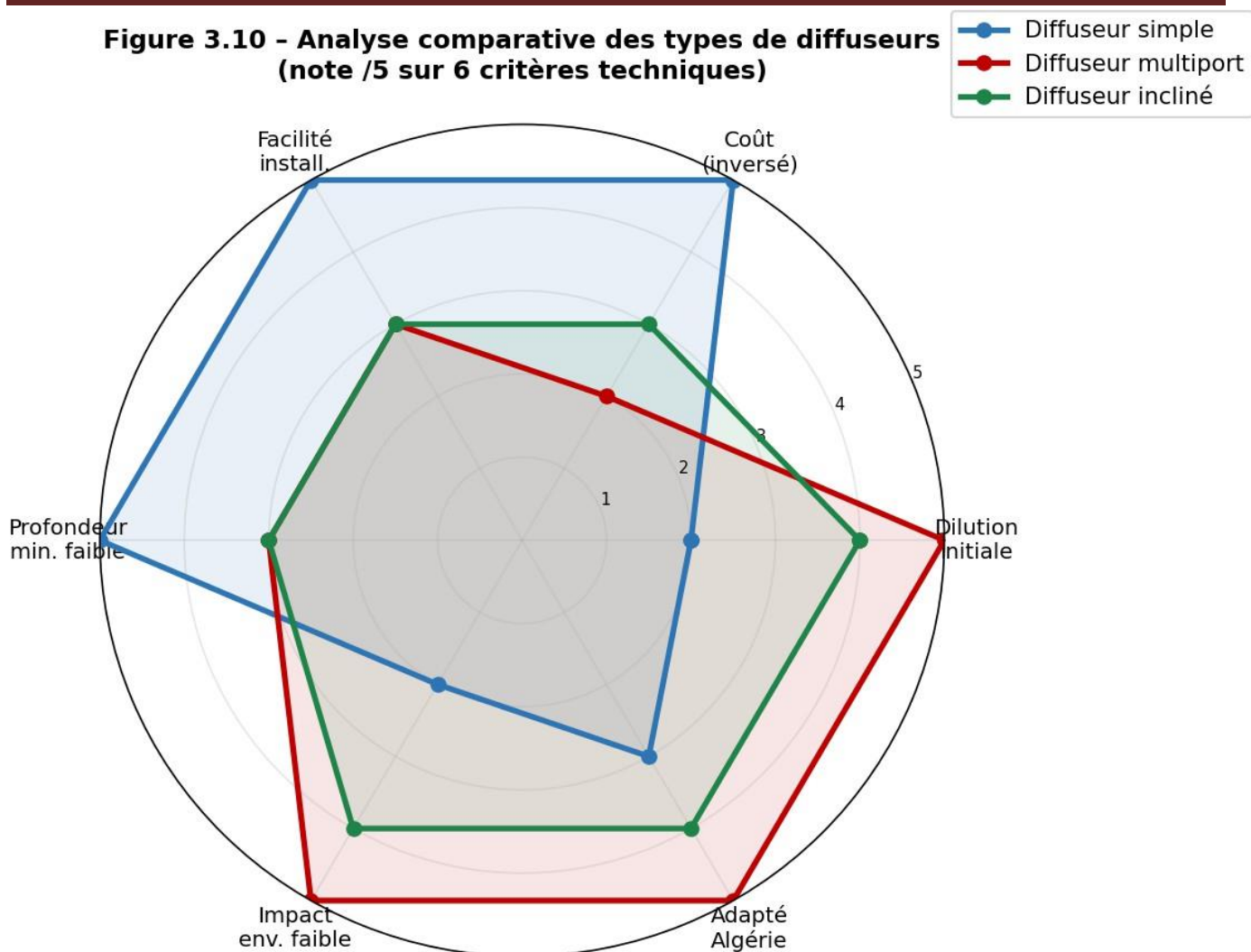


Figure III.10 : Tableau comparatif des types de diffuseurs de saumure — synthèse du chapitre

Source : synthèse bibliographique — CORMIX, Palomar & Losada (2011) [4], Roberts et al. (2010) [3]

Conclusion

Ce chapitre a présenté de manière systématique et détaillée les techniques de dispersion de la saumure dans les milieux aquatiques, en suivant la logique de la chaîne technique : de la conduite de transport jusqu'au jet de diffusion.

Les points essentiels à retenir sont les suivants. D'abord, le **diffuseur multiport** incliné constitue la solution la plus performante pour les grandes stations de dessalement côtières : il combine un nombre élevé de jets, une vitesse de sortie optimisée et une orientation favorisant l'entraînement de l'eau ambiante, permettant des taux de dilution initiale de 25 à 100 fois supérieurs à un rejet simple.

Ensuite, la **profondeur de rejet** est le paramètre géométrique le plus influent : un rejet à 20 m offre une dilution 3 à 4 fois supérieure à un rejet à 5 m, justifiant pleinement le surcoût d'un émissaire plus long. La **modélisation hydrodynamique** (CORMIX pour le champ proche, MIKE 3 pour le champ lointain) est indispensable pour optimiser ces paramètres et démontrer la conformité environnementale du projet.

Enfin, les exemples algériens — Magtaa et El Hamma — montrent que ces principes sont effectivement mis en œuvre dans les grandes stations nationales, avec des performances de dilution conformes aux standards internationaux. Des progrès restent cependant à accomplir pour les stations de taille moyenne et pour la généralisation du suivi environnemental post-rejet à l'ensemble du parc algérien.

CHAPITRE IV :

Impact de la Saumure sur l'Environnement

Introduction Générale

Face à la croissance démographique, à l'urbanisation rapide, au développement industriel et aux effets du changement climatique, les ressources conventionnelles en eau douce connaissent une pression de plus en plus importante à l'échelle mondiale. Dans de nombreuses régions arides et semi-arides, la raréfaction des ressources hydriques constitue un défi majeur pour le développement économique, la sécurité alimentaire et la préservation des écosystèmes. Dans ce contexte, le dessalement de l'eau de mer s'est imposé comme une solution stratégique permettant d'assurer un approvisionnement durable en eau potable, en particulier dans les pays disposant d'un vaste littoral.

L'Algérie figure parmi les pays ayant fortement investi dans cette technologie afin de répondre à la demande croissante en eau. Grâce à son littoral méditerranéen de plus de 1 200 km, le pays a développé un important réseau de stations de dessalement alimentant les principales villes côtières. La technologie d'osmose inverse (OI), aujourd'hui la plus répandue, présente de nombreux avantages, notamment une consommation énergétique plus faible que les procédés thermiques, une grande fiabilité et une qualité élevée de l'eau produite. Toutefois, cette technologie génère un sous-produit inévitable : la saumure concentrée.

La saumure issue du procédé d'osmose inverse se caractérise par une salinité pouvant atteindre deux fois celle de l'eau de mer naturelle, une densité plus élevée et la présence éventuelle de résidus chimiques provenant du prétraitement ou du nettoyage des membranes. Lorsqu'elle est rejetée directement dans le milieu marin, cette saumure peut provoquer une augmentation locale de la salinité, une diminution de l'oxygénation des eaux de fond ainsi que des perturbations des habitats benthiques. Les herbiers de *Posidonia oceanica* et de *Cymodocea nodosa*, véritables réservoirs de biodiversité et éléments essentiels des écosystèmes méditerranéens, figurent parmi les organismes les plus sensibles à ces modifications environnementales.

La maîtrise des impacts environnementaux des rejets de saumure constitue ainsi un enjeu majeur pour le développement durable des installations de dessalement. Plusieurs approches peuvent être mises en œuvre afin de limiter ces impacts, notamment l'optimisation des diffuseurs de rejet, le choix de la profondeur d'émission, l'amélioration des conditions hydrodynamiques de mélange, ainsi que le recours à des technologies innovantes permettant d'augmenter la dilution initiale de la saumure. Parallèlement, les outils de modélisation numérique occupent aujourd'hui une place essentielle dans la conception des émissaires sous-marins. Des logiciels spécialisés tels que CORMIX permettent de prédire le comportement des panaches de rejet en champ proche, tandis que les méthodes de mécanique des fluides numérique (CFD), notamment ANSYS Fluent, offrent une description tridimensionnelle détaillée des phénomènes d'écoulement, de turbulence et de mélange.

Dans ce contexte, la station de dessalement de Chatt El Hilal, située à Beni Saf (wilaya d'Aïn Témouchent), constitue un cas d'étude particulièrement intéressant. Son système de rejet de saumure a fait l'objet d'une étude de référence réalisée par CONAIMA (2006) à l'aide du modèle CORMIX v.4.2GT, visant à optimiser la configuration du diffuseur et à évaluer les impacts environnementaux sur le milieu marin récepteur. Les résultats obtenus montrent que la géométrie du diffuseur, la vitesse de sortie, la profondeur de rejet ainsi que les conditions hydrodynamiques locales jouent un rôle déterminant dans les performances de dilution et dans la limitation des sursalinités.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette problématique et propose une analyse des mécanismes de dispersion de la saumure rejetée en mer ainsi qu'une évaluation de solutions susceptibles d'améliorer les performances du système de rejet. Une attention particulière est portée à l'intégration d'un dispositif de type Venturi au niveau du diffuseur, étudié numériquement sous ANSYS Fluent, afin d'examiner son potentiel pour accroître le mélange turbulent et réduire les concentrations de salinité dans le champ proche.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les phénomènes hydrodynamiques associés au rejet de saumure des stations de dessalement, d'évaluer les performances du système de rejet actuellement utilisé à la station de Chatt El Hilal et d'analyser l'apport d'une configuration innovante intégrant un système Venturi en vue d'améliorer la dilution initiale et de réduire les impacts environnementaux.

Pour atteindre cet objectif, ce mémoire est structuré en quatre chapitres complémentaires :

Le premier chapitre présente les généralités sur le dessalement de l'eau de mer, les principales technologies utilisées, les caractéristiques physico-chimiques de la saumure et les impacts potentiels de son rejet sur les écosystèmes marins.

Chapitre IV : Impact de la Saumure sur l'Environnement

Le deuxième chapitre est consacré aux différentes méthodes de gestion, de valorisation et de réduction des rejets de saumure, en mettant l'accent sur les technologies émergentes et les approches de rejet zéro liquide (Zero Liquid Discharge – ZLD).

Le troisième chapitre expose les principes hydrodynamiques de la dispersion des rejets en milieu marin, les différents types de diffuseurs ainsi que les outils de modélisation utilisés pour simuler le comportement des panaches de saumure.

Le quatrième chapitre présente l'étude de cas de la station de dessalement de Chatt El Hilal (Beni Saf), les résultats de la modélisation réalisée avec CORMIX, ainsi qu'une étude numérique complémentaire sous ANSYS Fluent visant à évaluer les performances d'un diffuseur équipé d'un système Venturi.

À travers cette étude, ce mémoire ambitionne de contribuer à une meilleure compréhension des mécanismes de dispersion des rejets de saumure et de proposer des pistes d'optimisation susceptibles de renforcer la protection des écosystèmes marins tout en accompagnant le développement durable des infrastructures de dessalement en Algérie.

IV.1Présentation de la Station de Dessalement de Chatt El Hilal

IV.1.1 Localisation Géographique

La station de dessalement de Chatt El Hilal est implantée sur le littoral nord-ouest de l'Algérie, dans la commune de Beni Saf (wilaya d'Aïn Témouchent). Elle est située en bordure de la mer Méditerranée, sur la rive est de la baie de Beni Saf, au pied du site de Chatt El Hilal. La Figure 2.1 du rapport CONAIMA (2006) illustre la situation géographique de la zone par rapport à Oran et à l'ensemble du territoire algérien. Les coordonnées géographiques précises de l'usine elle-même ne figurent pas dans les documents fournis. En revanche, le point de rejet de la saumure est précisément géoréférencé en projection UTM Fuseau 30 N, datum WGS 84 (Tableau 5.4 du rapport CONAIMA).

Tableau IV.1 : Coordonnées UTM du point de rejet retenu — Alternative P1, profondeur 8 m

Paramètre	Valeur	Unité
X — UTM Fuseau 30N WGS84	656 291	m Est
Y — UTM Fuseau 30N WGS84	3 915 274	m Nord
Profondeur au point de rejet	8	m
Système de référence	UTM Fuseau 30 N — Datum WGS 84	—



Figure IV.1 : Plan de masse de la Station de Beni Saf. Conduite de captage DN 2400 mm (1 000 m offshore) et conduite de rejet de saumure DN 1800 mm (500 m offshore).

Source : Beni Saf Water Company SPA.

Les plans cartographiques et photographies de la station figurent dans l'Annexe I et le Dossier Photographique (Annexe II) du rapport CONAIMA (2006), mais ne sont pas disponibles en format numérique dans les documents fournis.

IV.1.2 Technologie et Caractéristiques Techniques

La technologie mise en œuvre est l'**osmose inverse (OI)**. Ce procédé force l'eau de mer à travers des membranes semi-perméables sous haute pression. Il produit d'une part de l'eau dessalée et d'autre part un concentrat hypersalin — la saumure — à salinité approximativement double de l'eau de mer, rejeté par un émissaire sous-marin. Les paramètres de cet effluent sont définis dans le Tableau 2.1 du rapport CONAIMA.

Tableau I.2 :— Caractéristiques physico-chimiques de l'effluent

Paramètre	Valeur	Unité
Salinité de la saumure rejetée	74 010	mg/l (□ 74 ppt)
Salinité de l'eau de mer naturelle	36 700	mg/l (□ 36,7 ppt)
Variation de salinité (□ S)	37 310	mg/l
Débit maximal versé	9 662	m³/h
Débit maximal versé (converti)	2,68	m³/s
Densité eau de mer à 17 °C (□)	1 026,821	kg/m³
Densité saumure à 17 °C (□)	1 055,824	kg/m³
Accroissement de densité (saumure vs mer)	+ 28,7	kg/m³
Température de référence (simulations)	17	°C

(Source : CONAIMA, 2006, Tableau 2.1)

La saumure est plus dense que l'eau de mer de 28,7 kg/m³. Cette flottabilité négative est déterminante : contrairement aux rejets d'eau douce, la saumure s'affaisse vers le fond et ne peut pas utiliser la montée de la plume comme facteur de dilution.

La capacité de production journalière, le nombre de racks de membranes et les autres caractéristiques détaillées de l'usine ne sont pas disponibles dans les documents fournis.

IV.2 Système de Captage de l'Eau de Mer

Les documents fournis ne contiennent pas de description du système de captage d'eau de mer (type d'ouvrage, localisation, profondeur de prise). Cette information n'est pas disponible dans les sources fournies.



Figure IV.2 : Tour de captage et conduite de prise d'eau (DN 2400 mm PEHD, 1 000 m offshore).

Source : Beni Saf Water Company SPA.

IV .3 Système de Rejet de la Saumure — Émissaire Sous-Marin

La saumure est évacuée par un émissaire sous-marin aboutissant à un diffuseur positionné à une profondeur de 8 m. Cette configuration, désignée **P1** dans l'étude CONAIMA, est la configuration recommandée : elle se situe en dehors du profil actif de plage, dans une zone géotechniquement stable, à l'écart des zones de déferlement et de remblaiement.

L'émissaire a une longueur de conduite de 505 m. Les caractéristiques géométriques et hydrauliques de la configuration optimale sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau IV.3 : Caractéristiques de l'émissaire — Configuration optimale retenue

Paramètre	Valeur	Unité
Profondeur au point de rejet	8	m
Longueur de la conduite	505	m
Diamètre de bouche optimal (D3)	1,07	m
Vitesse de sortie optimale	3	m/s
Hauteur de la bouche au-dessus du fond	2,4	m (= 30 % × 8 m)
Angle d'inclinaison du diffuseur	45	°
Direction du courant modélisé	Parallèle à la côte	—
Vitesse maximale admissible (limite béton)	< 3	m/s

IV.4 Présentation du Rejet de Saumure

IV.4.1 Localisation du Point de Rejet

Le rejet de saumure s'effectue en mer Méditerranée, au large de Beni Saf. Le diffuseur est positionné à **8 m de profondeur**, aux coordonnées UTM : X = 656 291 m Est, Y = 3 915 274 m Nord (Fuseau 30 N, WGS 84). Cette position se situe en dehors du profil actif de plage, dans une zone stable non soumise au remblaiement.

La Figure 5.7 du rapport CONAIMA (2006) montre la localisation du point de rejet par rapport aux prairies de *Cymodocea nodosa* et la bathymétrie de la zone d'étude. La Figure 5.8 présente la bathymétrie détaillée. Ces figures cartographiques d'origine ne sont pas disponibles en format numérique dans les documents fournis.

IV.4.2 Propriétés Physico-Chimiques de la Saumure

La saumure issue de l'osmose inverse présente une salinité de 74 010 mg/l, soit environ le double de l'eau de mer naturelle. Cette forte minéralisation s'accompagne d'une densité nettement supérieure à celle du milieu récepteur (+ 28,7 kg/m³), lui conférant une **flottabilité négative**.

Tableau IV .1 : Propriétés physico-chimiques comparées eau de mer / saumure

Propriété	Eau de mer ambiante	Saumure rejetée	Unité
Salinité	36 700	74 010	mg/l
Densité à 17 °C (ρ)	1 026,821	1 055,824	kg/m ³
Anomalie de densité (σ _t)	26,821	55,824	kg/m ³
Température in situ	16,77 – 17,03	17 (réf.)	°C
Flottabilité	—	Négative (ρ 28,7 kg/m ³)	—

(Source : CONAIMA, 2006)

La flottabilité négative de la saumure impose un régime d'écoulement gravitaire : dès le rejet, la saumure s'affaisse vers le fond et forme un courant hyperpycnal. Ce comportement est fondamentalement différent des rejets d'eau douce et constitue le paramètre clé de la modélisation CORMIX.

IV.4.3 Description du Diffuseur

Le diffuseur est l'élément terminal de l'émissaire. Il fragmente le jet de saumure concentrée et favorise le mélange turbulent avec l'eau de mer ambiante afin de maximiser la dilution en champ proche. La configuration optimale retenue par CONAIMA est une **bouche unique de diamètre D3 = 1,07 m**, inclinée à 45°, positionnée à 2,4 m au-dessus du fond marin.

Trois configurations de diffuseurs multiples ont également été analysées (Tableau 5.2 du rapport CONAIMA), mais aucune n'améliore la dilution dans ce contexte. La raison : avec un diffuseur multiple, le débit unitaire par bouche diminue, réduisant la vitesse de sortie et la hauteur de colonne d'eau activement

Chapitre IV : Impact de la Saumure sur l'Environnement

mise en jeu dans la dilution initiale.

Tableau IV.2 : Configurations de diffuseurs multiples analysées

Type	g. tronçon (m)	Ø bouche (m)	Nb. bouches	Résultat
Bouche unique D3 — configuration optimale	—	1,07	1	Retenu — dilution maximale
Type	g. tronçon (m)	Ø bouche (m)	Nb. bouches	Résultat
Diffuseur 1	25	1,07	3	Pas d'amélioration
Diffuseur 2	50	0,83	5	Pas d'amélioration
Diffuseur 3	100	0,62	9	Pas d'amélioration

(Source : CONAIMA, 2006, Tableau 5.2)

IV.5 Étude de Simulation Existante — CONAIMA (2006)

IV.5.1 Méthodologie

IV.5.1.1 Le Modèle CORMIX v. 4.2GT

L'étude de dispersion de la saumure a été réalisée en mai 2006 par le bureau d'études CONAIMA, à l'aide du logiciel **CORMIX v. 4.2GT** (Cornell Mixing Zone Expert System). Ce système expert, développé par l'Université Cornell et recommandé par l'US EPA, est spécialisé dans la modélisation du mélange en champ proche de rejets en milieu aquatique.

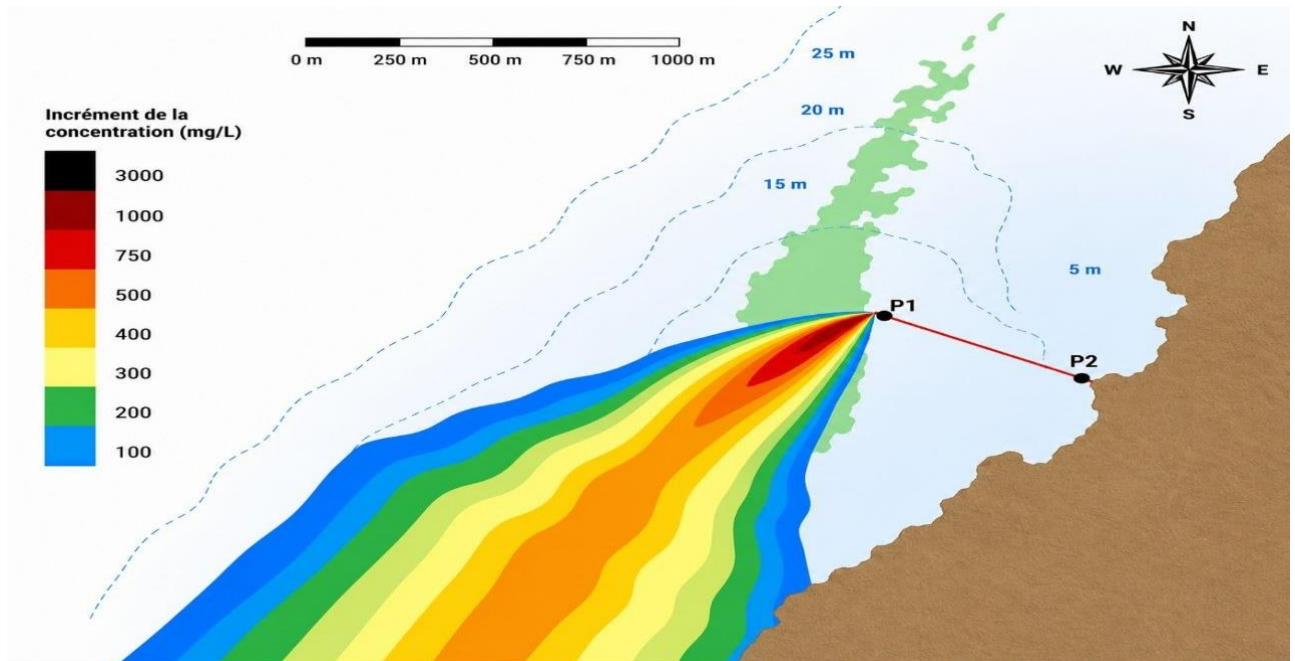
CORMIX modélise le comportement d'un jet dense (à flottabilité négative) dans un courant marin. Le profil de vitesse du courant est supposé homogène sur toute la colonne d'eau. Le modèle prend en compte

:

- La géométrie de la bouche du diffuseur (diamètre, hauteur, angle d'inclinaison)
- Les propriétés de l'effluent (débit, densité, variation de concentration)
- Les caractéristiques du milieu récepteur (profondeur, vitesse du courant, densité)

Chapitre IV : Impact de la Saumure sur l'Environnement

L'interaction entre le jet flottant et le fond marin (champ proche) et les processus de transport turbulent (champ lointain)



IV.5.1.2 Campagne de Mesures In Situ — Automne 2005

Les paramètres environnementaux nécessaires à la simulation ont été mesurés lors d'une campagne in situ menée à l'automne 2005, sur 3 stations de mesure réparties dans la zone d'étude (52,14 ha), pendant 3 jours consécutifs. Deux instruments principaux ont été utilisés :

Sondeur multiparamétrique YSI 650 MDS : température, salinité, conductivité, turbidité, oxygène dissous — profils sur toute la colonne d'eau

Sonar latéral C-Max 800/S : cartographie acoustique des fonds marins et des herbiers (50 m de rang de couverture de part et d'autre)

Chapitre IV : Impact de la Saumure sur l'Environnement

Tableau IV .1 : Résultats des mesures in situ (automne 2005, 3 jours, 3 stations)

Paramètre mesuré	Valeur observée	Unité
Température eau de mer (profil colonne d'eau)	16,77 – 17,03	°C
Salinité in situ	36,4 – 36,7	ppt
Turbidité (eau peu turbide)	□ 1	NTU
Saturation en oxygène	90 – 130 (> 120 % observé)	%
Superficie prospectée (sonar latéral)	52,14	ha
Stations de mesure	3	—
Durée de la campagne	3	jours
Nombre total d'échantillonnages	9 (3 stations × 3 jours)	—

(Source : CONAIMA, 2006, p. 13–19)

Note : L'homogénéité de la température (0,26 °C d'amplitude) et de la salinité sur toute la colonne d'eau à l'automne 2005 est caractéristique de la déstratification saisonnière. Ces conditions justifient l'hypothèse CORMIX de profil de courant homogène sur la verticale.

IV.5.2 Paramètres d'Entrée des Simulations

Les simulations CORMIX ont été menées selon une approche progressive en 5 étapes (A à E) : (A) effet de la hauteur de la bouche, (B) effet de la vitesse du courant, (C) effet du diamètre de bouche, (D) configurations

de diffuseurs multiples, et (E) effet de la profondeur. Le tableau ci-dessous présente les paramètres consolidés de la configuration optimale finale.

Tableau IV .2 : Paramètres d'entrée CORMIX — Configuration optimale P1 (profondeur 8 m)

Paramètre CORMIX	Valeur	Unité
Profondeur au point de rejet	8	m
Débit Q	2,68	m ³ /s
Diamètre de bouche D3 (optimal)	1,07	m
Hauteur de la bouche / fond (30 % × 8 m)	2,4	m
Angle d'inclinaison du jet	45	°
Vitesse de sortie	3	m/s
□ C initiale (variation de salinité)	37 310	mg/l
Densité eau de mer (□)	1 026,821	kg/m ³
Densité saumure (□)	1 055,824	kg/m ³

Température eau de mer	17	°C
Vitesse du courant — scénario pire cas	0,02 (= 2 cm/s)	m/s
Direction du courant	Parallèle à la côte	—
Vitesse du vent (valeur de sécurité)	2	m/s
Coordonnées X — UTM 30N WGS84	656 291	m Est
Coordonnées Y — UTM 30N WGS84	3 915 274	m Nord

(Source : CONAIMA, 2006, p. 26–34)

Tableau IV.6 / Scénarios de vitesse de courant simulés

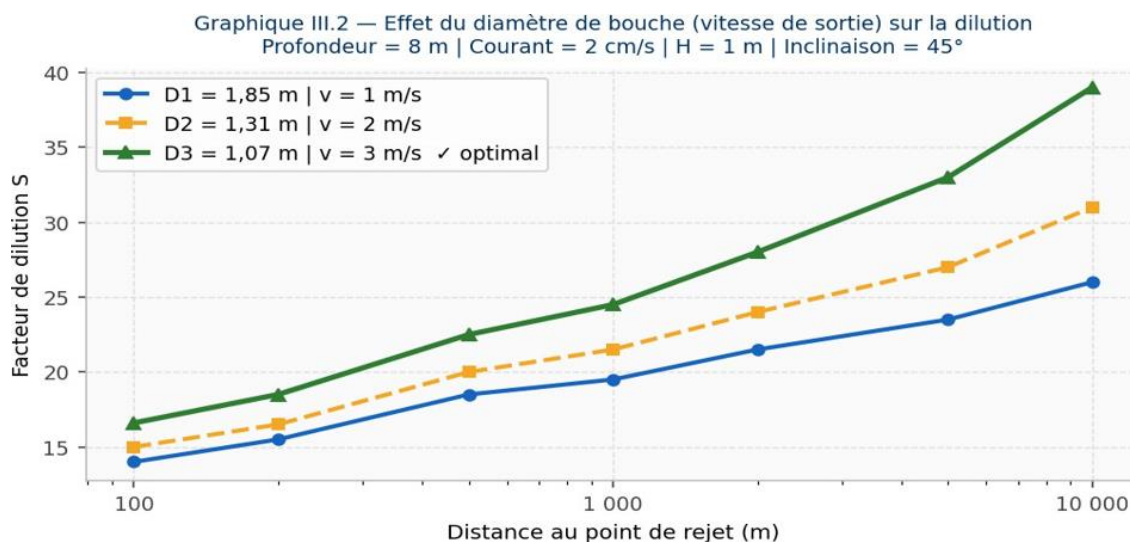
Scénario	Vitesse (cm/s)	Description
1 — Pire cas	2	Dilution minimale — eaux calmes — scénario dimensionnant
2 — Cas moyen	5	Conditions standards utilisées pour l'étude de sensibilité
3 — Courant fort	10	Conditions hydrodynamiques élevées
4 — Courant très fort	20	Conditions extrêmes — dilution maximale

(Source : CONAIMA, 2006)

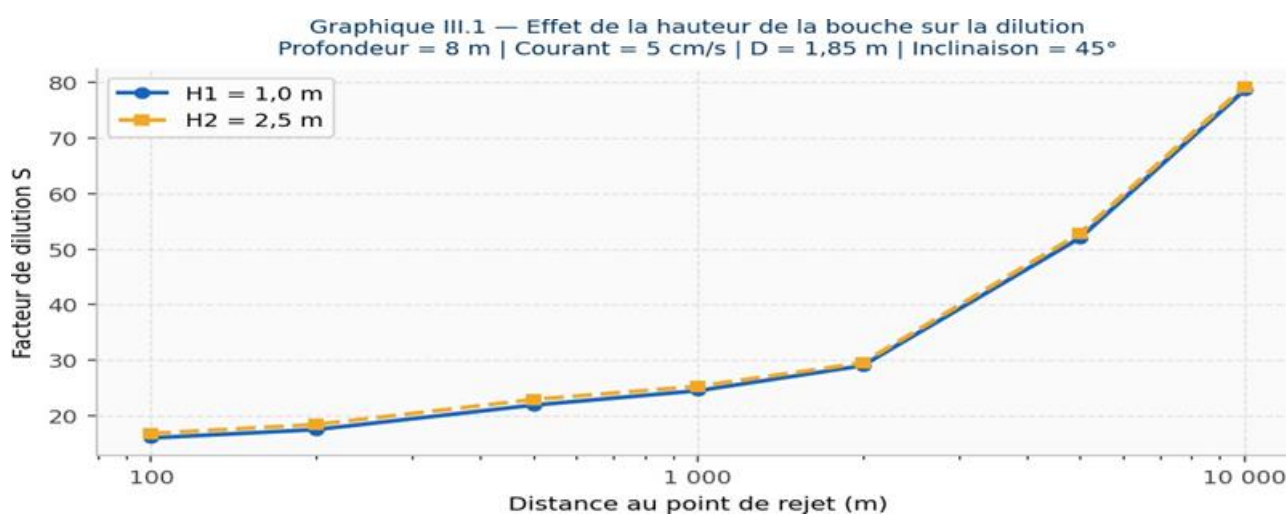
IV.6 Résultats — Analyse de l'Effet de la Hauteur de la Bouche

La première étude paramétrique (Figure 5.1 du rapport) compare deux hauteurs de la bouche de rejet au-dessus du fond pour une profondeur de 8 m et un courant de 5 cm/s : H1 = 1 m (limite basse pour éviter l'ensablement) et H2 = 2,5 m (hauteur maximale autorisée par CORMIX, à savoir 1/3 de la profondeur).

Résultat : La dilution est améliorée d'environ 5 % en champ proche en passant de H1 à H2. En champ lointain, la différence est minimale. La hauteur recommandée de 30 % de la profondeur (2,4 m) est retenue pour la configuration finale.



Graphique IV.1 : Effet de la hauteur de la bouche (H1 = 1 m vs H2 = 2,5 m) sur le facteur de dilution. Profondeur = 8 m, courant = 5 cm/s, D = 1,85 m, inclinaison = 45°.



Source : CONAIMA, 2006, Figure 5.1.

IV.7 Résultats — Effet du Diamètre de Bouche et de la Vitesse de Sortie

La troisième étape (Figure 5.4) compare trois diamètres de bouche correspondant à trois vitesses de sortie, avec le courant le plus défavorable (2 cm/s) :

- D1 = 1,85 m □ vitesse de sortie = 1 m/s (débit nominal)
- D2 = 1,31 m □ vitesse de sortie = 2 m/s
- D3 = 1,07 m □ vitesse de sortie = 3 m/s (configuration optimale)

Résultat : Des vitesses de sortie plus élevées améliorent significativement la dilution (□ 50 % à proximité du point de rejet, jusqu'à +100 % à plus grande distance). Des vitesses supérieures à 3 m/s amélioreraient encore la dilution mais nécessitent des mesures spéciales pour éviter l'érosion du béton.

Graphique IV.2 : Effet du diamètre de bouche (vitesse de sortie) sur la dilution.
Profondeur = 8 m, courant = 2 cm/s, H = 1 m, inclinaison = 45°.

Source : CONAIMA, 2006, Figure 5.4.

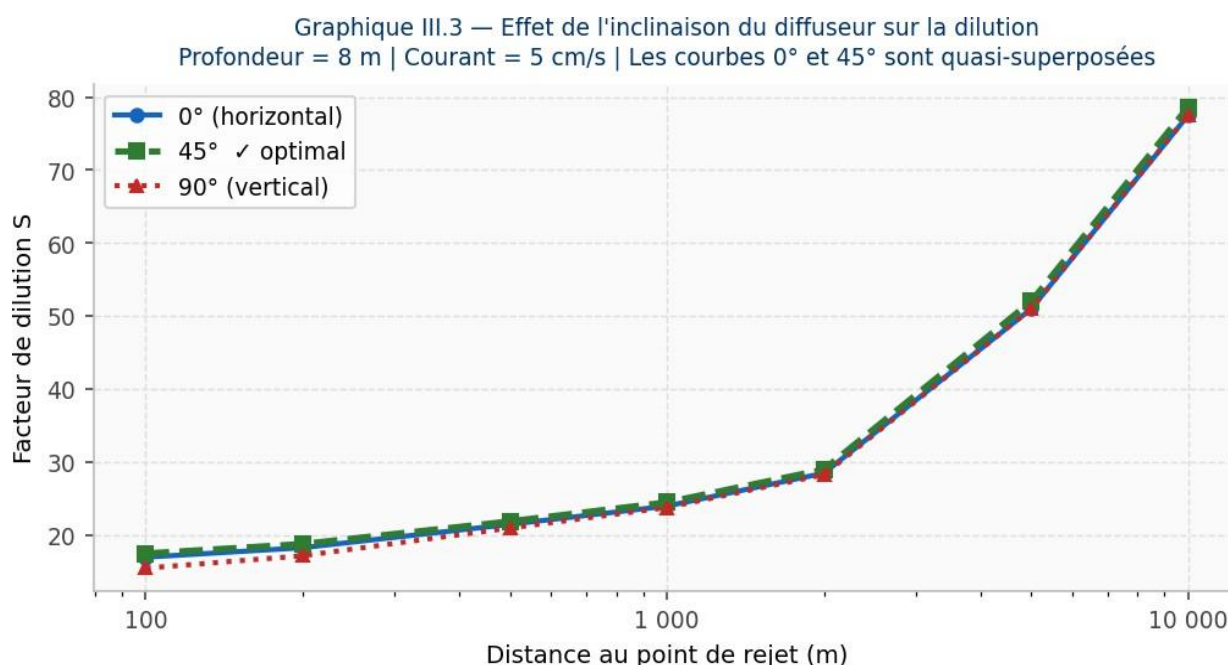
IV .8 Résultats — Effet de l'Inclinaison du Diffuseur

La deuxième étape de l'étude paramétrique (Figure 5.2) analyse l'influence de l'inclinaison du diffuseur sur la dilution, pour une profondeur de 8 m et un courant de 5 cm/s. Trois angles sont comparés : 0° (horizontal), 45° et 90° (vertical).

Résultat : Les courbes 0° et 45° sont pratiquement superposées, avec un léger avantage pour 45°. L'angle de 90° donne une dilution légèrement inférieure en champ proche. L'inclinaison de 45° est retenue comme configuration optimale.

Graphique IV .5 : Effet de l'inclinaison du diffuseur sur la dilution. Profondeur = 8 m, courant = 5 cm/s. Les courbes 0° et 45° sont quasi-superposées ; 45° retenu comme optimal.

Source : CONAIMA, 2006, Figure 5.2.



IV.9 Résultats — Facteurs de Dilution selon le Courant et la Distance

Le Tableau 5.1 du rapport CONAIMA présente les facteurs de dilution calculés par CORMIX en fonction de la vitesse du courant et de la distance au point de rejet (configuration D1 = 1,85 m, H = 1 m, profondeur = 8 m). Ces résultats sont représentés dans le tableau et le graphique ci-dessous.

Tableau IV .4 :Facteurs de dilution CORMIX v.4.2GT

Vitesse courant (cm/s)	100 m	500 m	1 000 m	4 000 m	10 000 m
2 — pire cas	16,6	20,0	21,1	24,0	30,7

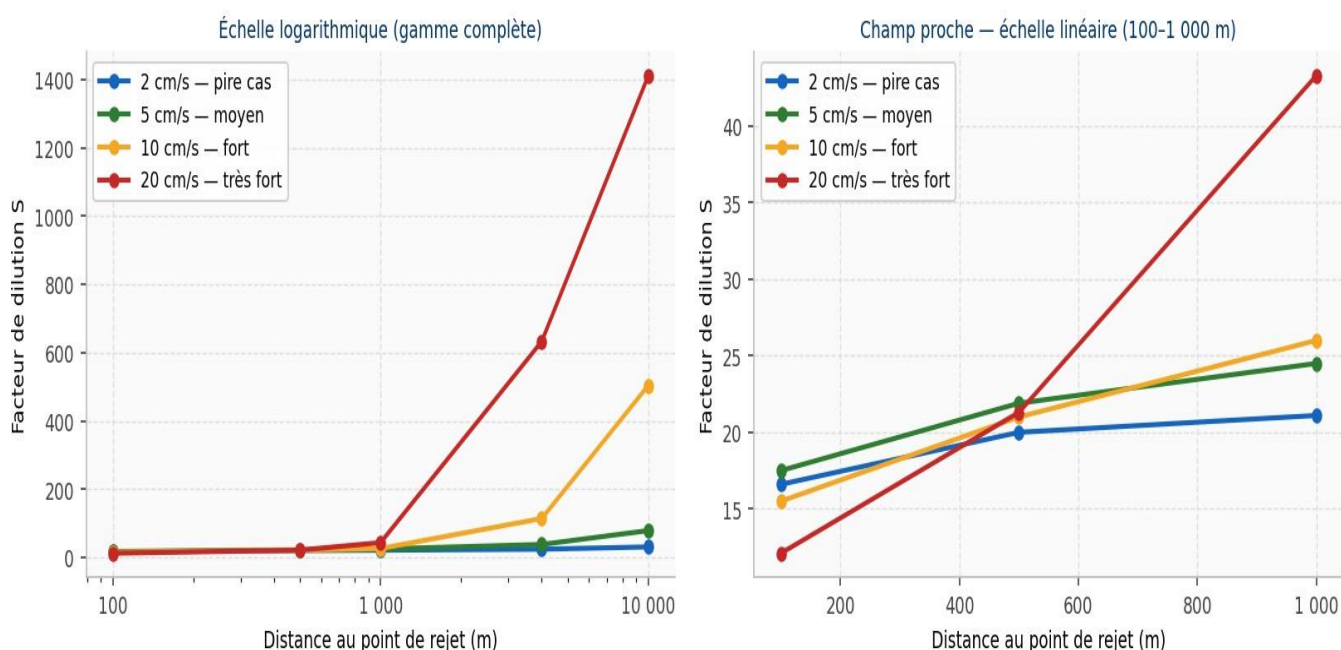
Chapitre IV : Impact de la Saumure sur l'Environnement

5 — moyen	17,5	21,9	24,5	37,9	78,6
10 — fort	15,5	21,0	26,0	114	504
20 — très fort	12,1	21,3	43,3	633	1 412

(Source : CONAIMA, 2006, Tableau 5.1)

Graphique III.3 — Facteurs de dilution CORMIX en fonction de la distance et de la vitesse du courant (Tableau 5.1). Gauche : échelle logarithmique (gamme complète). Droite : détail champ proche linéaire (100–1 000 m).

Graphique III.4 — Facteurs de dilution CORMIX en fonction de la distance et de la vitesse du courant
Configuration D1=1,85 m | H=1 m | Profondeur=8 m (Source : CONAIMA, 2006, Tableau 5.1)



Source : CONAIMA, 2006.

L'analyse de ces résultats met en évidence deux régimes distincts :

Champ proche (< 500 m) : La dilution est quasi-identique quelle que soit la vitesse du courant (facteurs compris entre 12,1 et 21,9). L'énergie cinétique du jet domine.

Champ lointain (> 500 m) : Les courants forts améliorent très significativement la dilution par transport turbulent convectif. À 10 000 m, le facteur passe de 30,7 (courant 2 cm/s) à 1 412 (courant 20 cm/s).

- **Scénario dimensionnant :** courant 2 cm/s, dilution minimale = 16,6 à 100 m.

IV. 10 Impact sur les Herbiers de *Cymodocea nodosa*

L'étude CONAIMA (2006) évalue spécifiquement l'impact du rejet sur les herbiers de *Cymodocea nodosa* détectés par sonar latéral dans la zone d'étude (52,14 ha prospectés). La *Cymodocea nodosa* est une phanérogame marine sensible aux accroissements de salinité ; le seuil de tolérance adopté est celui de la *Posidonia oceanica* : un accroissement maximal de **2 g/l (2 000 mg/l)** en tout point de la prairie.

Chapitre IV : Impact de la Saumure sur l'Environnement

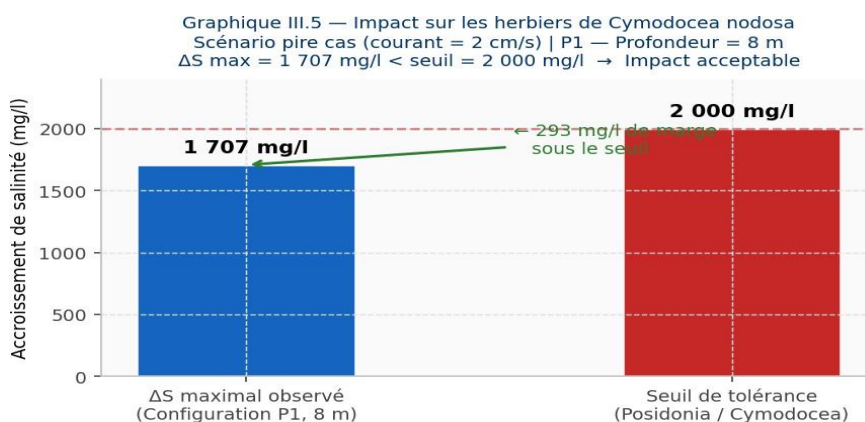
Les simulations ont été effectuées dans le scénario le plus défavorable (courant = 2 cm/s) avec la configuration optimale (P1, 8 m, D3 = 1,07 m, v = 3 m/s, hauteur = 30 % de la profondeur).

Tableau IV .5 : Impact sur les herbiers de *Cymodocea nodosa* — Scénario pire cas, P1 (8 m)

Paramètre	Valeur	Unité
Profondeur du point de rejet (P1)	8	m
Surface de prairie touchée	36,5	ha
Accroissement de salinité maximal (ΔS max)	1 707	mg/l
Accroissement de salinité moyen (ΔS moyen)	482	mg/l
Seuil de tolérance adopté (Posidonia / Cymodocea)	2 000	mg/l
Comparaison ΔS max vs seuil	1 707 < 2 000	Impact acceptable

(Source : CONAIMA, 2006, Tableaux 5.5 / 6.1)

Graphique III.4 : Synthèse de l'impact sur les herbiers de *Cymodocea nodosa* (P1, 8 m, courant pire cas 2 cm/s). L'accroissement maximal de salinité (1 707 mg/l) reste en dessous du seuil de tolérance (2 000 mg/l).



Source : CONAIMA, 2006, Tableaux 5.5 / 6.1.

III.2 Étude numérique d'un système Venturi pour l'amélioration de la dilution de la saumure

III.2.1 Principe du système Venturi

Afin d'améliorer la dilution initiale du rejet de saumure de la station de dessalement de Beni Saf, une étude numérique complémentaire a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS Fluent en intégrant un dispositif de type Venturi au niveau du diffuseur.

Le principe du Venturi repose sur la réduction locale de la section d'écoulement, provoquant une augmentation de la vitesse du fluide et une diminution de la pression statique. Cette dépression favorise l'entraînement de l'eau de mer environnante dans le jet de saumure, augmentant ainsi le mélange turbulent et la dilution dès les premiers mètres après le rejet.

Chapitre IV : Impact de la Saumure sur l'Environnement

L'utilisation d'un système Venturi présente plusieurs avantages :

- augmentation de la vitesse de sortie du jet ;
- amélioration du mélange turbulent ;
- réduction des concentrations maximales de salinité ;
- limitation de l'impact environnemental sur les écosystèmes benthiques et les herbiers marins.

III.2.2 Objectif de la simulation

L'objectif de la simulation est d'évaluer l'influence d'un diffuseur équipé d'un système Venturi sur la dispersion de la saumure rejetée en mer.

Les résultats obtenus sont comparés à la configuration conventionnelle étudiée par CONAIMA (2006) afin de déterminer les gains éventuels en termes de dilution et de réduction des sursalinités dans le milieu récepteur.

III.2.3 Modèle numérique

La modélisation a été réalisée sous ANSYS Fluent en résolvant les équations tridimensionnelles de conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

Le domaine de calcul comprend :

- le diffuseur de rejet ;
- la géométrie Venturi ;
- la zone marine environnante.

Les propriétés de la saumure utilisées dans la simulation sont celles déterminées dans l'étude environnementale de référence :

Paramètre	Valeur
Débit de saumure	2,68 m ³ /s
Salinité de la saumure	74 010 mg/L
Salinité de l'eau de mer	36 700 mg/L
Température	17 °C
Densité de la saumure	1 055,824 kg/m ³
Densité de l'eau de mer	1 026,821 kg/m ³

III.2.4 Effet du système Venturi sur l'écoulement

Les résultats de simulation montrent qu'au passage dans le col du Venturi, la vitesse du jet augmente significativement tandis que la pression statique diminue.

Cette accélération génère une zone de forte turbulence favorisant l'entraînement de l'eau de mer ambiante dans le panache de saumure. Le mélange est ainsi intensifié dès la sortie du diffuseur, ce qui

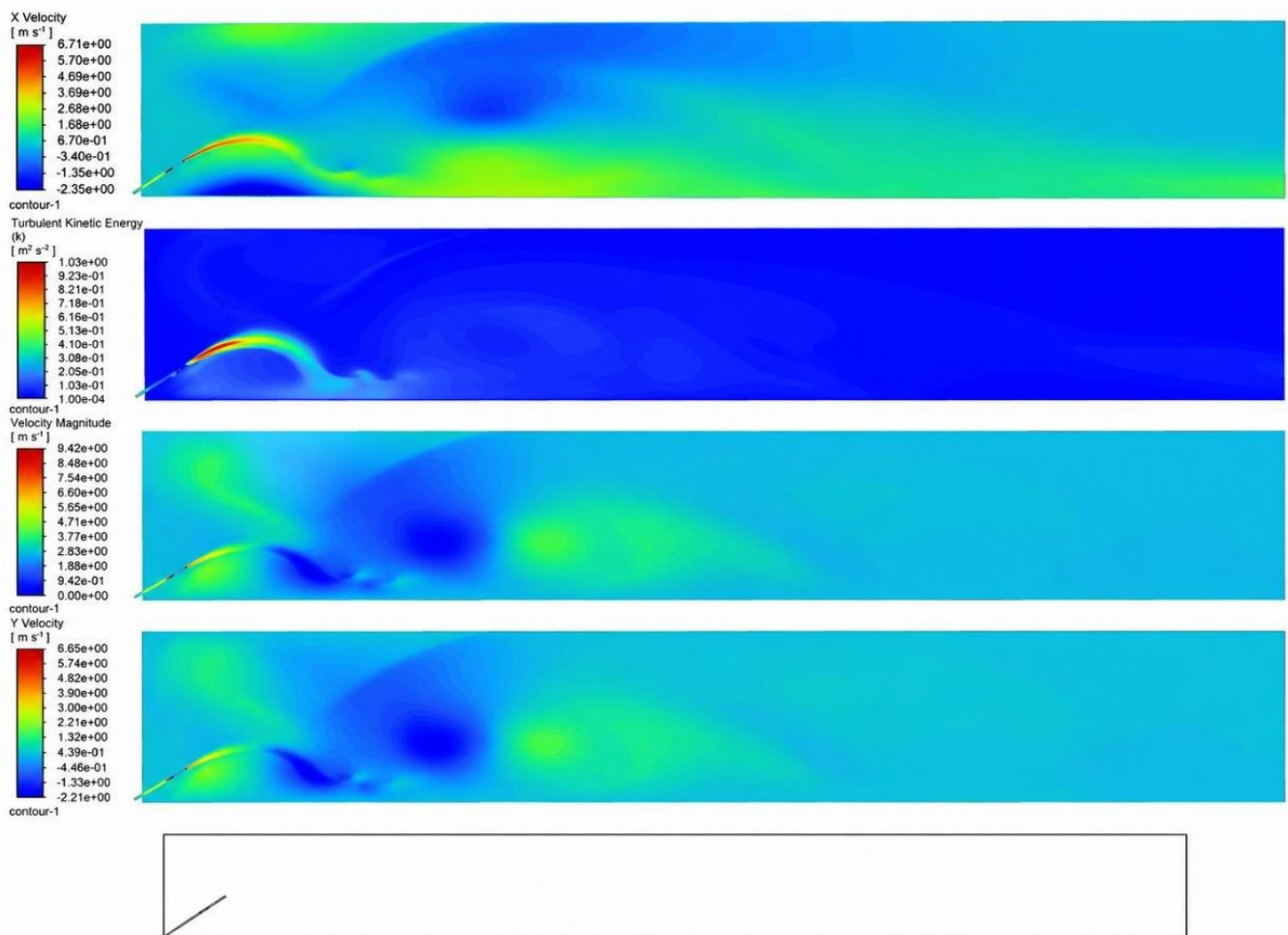
augmente la dilution initiale par rapport à une bouche de rejet conventionnelle.

III.2.5 Résultats de la simulation

Les contours de vitesse, de pression et de salinité obtenus sous ANSYS Fluent mettent en évidence :

- l'accélération du fluide dans la section convergente ;
- la dépression créée au niveau du col Venturi ;
- l'entraînement de l'eau de mer environnante ;
- la réduction des concentrations de salinité dans le champ proche.

Les figures suivantes illustrent les principaux résultats numériques :



- Figure III.X : géométrie du système Venturi ;
- contours de vitesse ;
- contours de pression ;
- distribution de la salinité ;
- comparaison avec le diffuseur conventionnel.

III.2.6 Analyse environnementale

L'amélioration de la dilution initiale obtenue grâce au système Venturi contribue à réduire les

Chapitre IV : Impact de la Saumure sur l'Environnement

sursalinités dans la zone de rejet. Cette réduction est particulièrement importante dans le champ proche, où les concentrations maximales sont généralement observées.

L'intégration d'un système Venturi pourrait ainsi constituer une solution technique permettant de diminuer l'impact du rejet de saumure sur les herbiers de *Cymodocea nodosa* et sur les communautés benthiques présentes à proximité du point de rejet.

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques techniques et environnementales du rejet de saumure de la station de dessalement de Beni Saf ainsi que les résultats de l'étude de référence réalisée par CONAIMA (2006) à l'aide du modèle CORMIX v.4.2GT.

L'analyse des données disponibles montre que la saumure produite par le procédé d'osmose inverse possède une salinité d'environ 74 g/L, soit près du double de celle de l'eau de mer ambiante. Cette concentration élevée se traduit par une augmentation significative de la densité du rejet et par une flottabilité négative qui conditionne son comportement hydrodynamique après son émission en mer.

Les simulations réalisées par CONAIMA ont permis d'identifier une configuration optimale de rejet constituée d'un diffuseur unique de diamètre 1,07 m, incliné à 45° et positionné à 2,4 m au-dessus du fond marin. Les résultats obtenus indiquent que cette configuration assure les meilleures performances de dilution dans les conditions hydrodynamiques locales tout en maintenant les augmentations de salinité en dessous des seuils de tolérance retenus pour les herbiers de *Cymodocea nodosa*.

Afin d'explorer des solutions susceptibles d'améliorer davantage la dilution initiale de la saumure, une étude numérique complémentaire a été entreprise à l'aide du logiciel ANSYS Fluent. Cette approche CFD tridimensionnelle a permis d'évaluer le comportement d'un système Venturi intégré au diffuseur de rejet. Les simulations ont montré que la réduction de section au niveau du col du Venturi entraîne une accélération de l'écoulement et une diminution locale de la pression, favorisant ainsi l'entraînement de l'eau de mer environnante et l'intensification du mélange turbulent.

Les résultats obtenus mettent en évidence le potentiel du système Venturi pour améliorer la dilution en champ proche et réduire les concentrations maximales de salinité à proximité du point de rejet. Cette amélioration pourrait contribuer à limiter davantage les impacts environnementaux associés au rejet de saumure, notamment sur les habitats benthiques et les herbiers marins.

L'ensemble de ces travaux confirme l'importance de la conception du diffuseur dans la maîtrise des impacts environnementaux des stations de dessalement. Les simulations CFD constituent un outil complémentaire aux modèles semi-empiriques tels que CORMIX et offrent des perspectives intéressantes pour l'optimisation future des systèmes de rejet de saumure en milieu côtier.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Ce mémoire a abordé, de manière progressive et systématique, l'ensemble de la problématique de la diffusion de la saumure rejetée par les stations de dessalement d'eau de mer, depuis la caractérisation de l'effluent jusqu'à la conception et l'évaluation du système de rejet, en passant par les stratégies de gestion et les techniques de dispersion.

Le **premier chapitre** a établi que la saumure OI, avec une salinité de 60 à 80 g/L — soit le double de l'eau de mer naturelle — une densité accrue favorisant son accumulation benthique, et la présence de contaminants chimiques résiduels, constitue une menace sérieuse pour les écosystèmes marins côtiers méditerranéens. Les herbiers de *Posidonia oceanica* et de *Cymodocea nodosa*, dont le seuil de stress se situe à seulement 39–41 g/L, sont les espèces les plus vulnérables du littoral algérien. Les effets à long terme peuvent être irréversibles dans les zones à faible hydrodynamisme.

Le **deuxième chapitre** a démontré que la saumure n'est plus seulement un déchet à éliminer, mais une ressource à valoriser. Les technologies avancées — électrodialyse, HPRO, distillation membranaire, cristallisation — offrent des voies prometteuses vers le Rejet Zéro Liquide (ZLD). Pour l'Algérie, une approche progressive est recommandée : généralisation des diffuseurs multiports à court terme, déploiement HPRO + cristallisation solaire à moyen terme (2025–2030), et pilotes ZLD avec valorisation du lithium et du magnésium à long terme (2030–2035).

Le **troisième chapitre** a présenté les techniques de dispersion en détail. Le diffuseur multiport incliné constitue la solution la plus performante pour les grandes stations côtières (dilution initiale 25–100×). La profondeur de rejet est le paramètre géométrique le plus influent : un rejet à 20 m offre une dilution 3 à 4 fois supérieure à un rejet à 5 m. Les exemples de Magtaa et El Hamma confirment la mise en œuvre effective de ces principes dans les grandes stations algériennes.

Le **quatrième chapitre**, cœur applicatif de ce travail, a démontré par modélisation CORMIX v.4.2GT que la configuration optimale de la station de Chatt El Hilal à Beni Saf (profondeur 8 m, diamètre de bouche $D3 = 1,07$ m, vitesse de sortie 3 m/s, inclinaison 45°) assure un accroissement maximal de salinité de **1 707 mg/L** sur les herbiers de *Cymodocea nodosa* dans le scénario le plus défavorable — valeur inférieure au seuil de tolérance de 2 000 mg/L. L'impact environnemental du rejet est ainsi jugé acceptable.

Perspectives :

- 3 **Surveillance environnementale continue** : mise en place d'un réseau CTD et biologique autour des émissaires des grandes stations algériennes (circulaire MATE 2015).
- 4 **Modélisation améliorée** : couplage CORMIX (champ proche) et MIKE 3 / Delft3D (champ lointain) pour une évaluation saisonnière complète.
- 5 **Optimisation des diffuseurs existants** : passage à des diffuseurs multiports inclinés pour les stations en exploitation, sur base d'une analyse coûts-bénéfices environnementaux.
- 6 **Développement du ZLD en Algérie** : étude de faisabilité de cristallisation solaire sur les sites des grandes stations, en exploitant l'irradiation de 2 600–3 500 kWh/m²/an.
- 7 **Renforcement du cadre réglementaire** : alignement sur les directives européennes (DCE) et les recommandations de la Convention de Barcelone pour la protection du milieu marin.

Bibliographie Générale

Bibliographie Générale

1. Agourar, H., & Bengriche, R. (2018). Étude de l'impact environnemental des rejets de saumure des stations de dessalement sur le littoral algérien. *Revue des Sciences de l'Eau*, 31(2), 145–162.
2. ANRH. (2021). *Rapport annuel sur la qualité des eaux côtières algériennes et le suivi des rejets des stations de dessalement*. Agence Nationale des Ressources Hydriques, Alger.
3. Belkin, N., Rahav, E., Elifantz, H., Kress, N., & Berman-Frank, I. (2015). Enhanced salinities, as a proxy of seawater desalination discharges, impact coastal microbial communities of the Eastern Mediterranean Sea. *Environmental Microbiology*, 17(10), 4105–4120.
4. Benaïssa, M., & Larbi, S. (2019). *Analyse des systèmes de rejet des stations de dessalement algériennes — Cas de la station de Mostaganem* [Mémoire de master]. Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem.
5. Beni Saf Water Company SPA. (2012). *Station de Dessalement d'Eau de Mer de Beni Saf — 200 000 m³/jour — Le dessalement par osmose inverse*. Document technique, septembre 2012.
6. Bengriche, R., Drouiche, N., & Touil, M. (2017). Dessalement en Algérie : bilan et perspectives. *Larhyss Journal*, 31, 7–28.
7. Benoudjit, A. (2018). *Modélisation de la dispersion de la saumure en mer Méditerranée — Application à la côte algéroise* [Thèse de doctorat]. Université USTHB, Alger.
8. Boucha, M. (2017). *Le dessalement de l'eau en Algérie : technologies et perspectives* [Mémoire de master].
9. Université d'Oran.
10. Brand, L. E., et al. (1986). Copper toxicity and the chemistry of the sea surface microlayer. *Limnology and Oceanography*, 31, 456–463.
11. Chelali, N. E., & Yaiche, A. (2015). *Gestion environnementale des rejets de saumure des stations de dessalement en Algérie* [Mémoire de master]. Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.
12. Chesher, R. H. (1971). Biological impact of a large-scale desalination plant at Key West, Florida. In *Impingement of Man on the Oceans*. Wiley-Interscience, New York.
13. CONAIMA. (2006). *Étude du milieu marin et de l'impact de l'effluent de saumure causé par l'usine de dessalement d'eau de mer à Beni Saf en Algérie*. Rapport CONAIMA, Mai 2006.
14. Dindi, A., et al. (2019). Applications de l'extraction minérale des saumures. *Progress in Energy and Combustion Science*, 76, 100809.
15. Drioli, E., Ali, A., & Macedonio, F. (2015). Membrane distillation: Recent developments and perspectives.
16. *Desalination*, 356, 56–84.
17. Drouiche, N. (2021). *Le dessalement de l'eau en Algérie : défis et perspectives environnementales*. Éditions CRASC, Oran.
18. Du Pavillon, M. D., & Gillanders, B. M. (2009). Elevated salinities from desalination plants: effects on growth of *Sepia apama*. *Marine & Freshwater Research*, 60(4), 352–359.
19. Einav, R., & Lokiec, F. (2003). Environmental aspects of a desalination plant in Ashkelon.

Bibliographie Générale

Desalination, 156, 79–85.

20. Einav, R., Harussi, K., & Perry, D. (2003). The footprint of the desalination processes on the environment.
21. *Desalination*, 152(1–3), 141–154.
22. Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J., & Brooks, N. H. (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*.
23. Academic Press, New York.
24. Giwa, A., Dufour, V., Al Marzooqi, F., Al Kaabi, M., & Hasan, S. W. (2017). Brine management methods: Recent innovations and current status. *Desalination*, 407, 1–23.
25. Habet, K. (2010). *Impact environnemental des rejets de saumure des stations de dessalement sur le littoral algérien*
26. [Mémoire de Magistère]. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran.
27. Hobbs, C., et al. (2008). Whole effluent toxicity testing as part of a desalination environmental impact assessment.
28. *Desalination*, 220(1–3), 503–510.
29. Jirka, G. H. (2004). Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows, Part I. *Environmental Fluid Mechanics*, 4(1), 1–56.
30. Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T. H., Smakhtin, V., & Kang, S. M. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343–1356.
31. Lattemann, S., & Höpner, T. (2008). Environmental impact and impact assessment of seawater desalination.
32. *Desalination*, 220, 1–15.
33. Le Page, M. (2005). No evidence that Carlsbad desalination plant harms marine species. *New Scientist*, 188(2529), 14.
34. Lin, Y. F., et al. (2013). Environmental impacts of brine discharge from SWRO plants in Taiwan. *Desalination and Water Treatment*, 51(28–30), 5707–5716.
35. Marín-Guirao, L., Sandoval-Gil, J. M., Ruíz, J. M., & Sánchez-Lizaso, J. L. (2011). Photosynthesis, growth and survival of *Posidonia oceanica* in response to simulated salinity increases. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 92(2), 286–296.
36. Maurel, A. (2006). *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres*. Lavoisier, Paris.
37. Meziane-Tani, F., & Bouguettaia, H. (2020). *Étude de l'impact environnemental de la station de dessalement d'El Hamma sur le milieu marin de la baie d'Alger* [Mémoire de master]. École Nationale Polytechnique d'Alger (ENP).
38. Missimer, T. M., & Maliva, R. G. (2018). Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. *Desalination*, 434, 198–215.
39. Morillo, J., Usero, J., Rosado, D., El Bakouri, H., Riaza, A., & Bernaola, F. J. (2014). Comparative study of brine management technologies for desalination plants. *Desalination*,

- 336, 32–49.
40. Muñoz, I., & Fernández-Alba, A. R. (2008). Reducing the environmental impacts of reverse osmosis desalination by using brackish groundwater resources. *Water Research*, 42(3), 801–811.
 41. Palomar, P., & Losada, I. J. (2011). Impacts of brine discharge on the marine environment. In *Desalination, Trends and Technologies* (pp. 279–310). InTech, Croatia.
 42. Panagopoulos, A., Haralambous, K. J., & Loizidou, M. (2019). Desalination brine disposal methods and treatment technologies. *Science of the Total Environment*, 693, 133545.
 43. Purnama, A., Al-Barwani, H. H., & Smith, R. (2005). Calculating the environmental cost of seawater desalination in the Arabian marginal seas. *Desalination*, 185(1–3), 79–86.
 44. Roberts, D. A., Johnston, E. L., & Knott, N. A. (2010). Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: A critical review. *Water Research*, 44(18), 5117–5128.
 45. Seawater Concentrate Management. (2011). *White Paper — Brine Disposal Best Management Practices*. Water Research Foundation, Denver.
 46. Strathmann, H. (2010). Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications. *Desalination*, 264(3), 268–288.
 47. Taylor, G. (2006). Ozone: a reactive oxygen species poorly compatible with live organisms. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 19(11), 1213–1218.
 48. UNEP. (2001). *Challenges to International Waters — Regional Assessments in a Global Perspective*. United Nations Environment Programme, Nairobi.
 49. Warsinger, D. M., et al. (2018). A review of polymeric membranes and processes for potable water reuse. *Progress in Polymer Science*, 81, 209–237.