

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire de Fin d'Études de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Mécanique

Spécialité : Énergétique

Présenté par

M. YOUSFI Amazigh

Mlle. CHEDIK Lynda

Thème

Étude des rejets de saumures des usines de dessalement de l'eau de mer en utilisant l'imagerie satellite

Mémoire soutenu publiquement le 03/07/2024 devant le jury composé de :

Mme. KHEDACHE Souad	MCB	PRESIDENTE
M. AMOUKRANE Mounir	MCA	PROMOTEUR
M. KERKADI Samir	MAB	EXAMINATEUR

PROMOTION 2023/2024

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Ma famille

Pour leur soutien inconditionnel, leur amour et leurs encouragements constants tout au long de cette aventure académique. Votre présence à mes côtés a été une source inestimable de motivation et de réconfort. Que Dieu vous accorde bonheur et prospérité.

Ma mère, Zahoua

Pour son amour indéfectible, son sacrifice et sa détermination à surmonter les épreuves. Tu es un modèle de force et de persévérance. Que ta vie soit remplie de joie et de santé.

Mon père, Kamel

Pour son soutien constant et sa sagesse. Ta présence et tes conseils m'ont été d'une aide précieuse tout au long de ce parcours. Que Dieu te donne longue vie et sérénité.

Mon grand frère, Sadek

Pour sa protection, ses encouragements et son soutien infailible. Merci pour ta présence rassurante. Que ton chemin soit illuminé par la réussite et le bonheur.

Mes petites sœurs jumelles, Kenza et Liza

À Kenza, que les portes du succès s'ouvrent largement devant toi dans tes études.

À Liza, que ta force intérieure continue d'inspirer chacun de nous, et que tu trouves la guérison et la paix.

Toutes les personnes en situation de handicap et leurs familles

Pour leur courage, leur résilience et leur solidarité face aux défis quotidiens. Votre force et votre dévouement sont une source d'inspiration pour nous tous.

Toutes les personnes qui m'ont inspiré(e) et soutenu(e)

De près ou de loin, votre influence positive a contribué à l'achèvement de ce mémoire. Merci pour vos conseils avisés et votre bienveillance.

Amazigh

Dédicace

*Je dédie ce travail à mes chers parents, que Dieu me les garde, pour leur amour inconditionnel et leur soutien indéfectible. À mes adorées sœurs **Hamida**, **Amel** et **Inés**, dont l'affection et l'encouragement m'ont toujours porté. À mes amies proches **Kenza**, **Lina**, **Liza** et **Mélissa**, pour leur précieuse amitié et leurs encouragements constants. À mes cousines **Thiziri** et **Thilelli**, pour leur présence chaleureuse et leur affection sincère. Merci à vous tous d'avoir été des piliers essentiels tout au long de ce parcours.*

Votre soutien et votre amour ont été ma source d'inspiration et de motivation tout au long de ce parcours. Je vous en suis infiniment reconnaissant.

{Lynda}

Remerciements

Nous remercions *Dieu* de nous avoir donné la vie, la santé, la patience et la détermination nécessaires pour accomplir ce travail.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude envers notre encadrant, monsieur *M. AMOKRANE* (Maître de conférences A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou), à l'encadrement de ce travail et à son soutien tout au long de la préparation de ce mémoire. Nous lui sommes reconnaissants pour ses précieux conseils qui ont grandement contribué à l'accomplissement de ce travail.

Nous remercions sincèrement madame *S. KHEDACHE* (Maître de conférences B à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou) d'avoir accepté de faire partie du jury de soutenance.

Nos remerciements s'adressent également à monsieur *S. KERKADI* (Maître assistant à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou) pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de juger ce travail en tant qu'examineur.

On remercie tous nos amis, collègues et professeurs du département de Génie Mécanique.

TABLE DES MATIERES

Dédicaces Amazigh YOUSFI

Dédicaces Lynda CHEDIK

Remerciements.....	i
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	vii
Nomenclature.....	viii
Introduction générale.....	1

Chapitre I

Introduction au dessalement de l'eau de mer et technologie de l'osmose inverse

I.1	Introduction.....	3
I.2	Présentation du procédé purification de l'eau salée.....	3
I.3	Les différentes techniques et méthodes pour le dessalement de l'eau de mer.....	3
I.3.1	Procédés thermiques.....	4
I.3.1.1	Distillation.....	5
I.3.1.2	Congélation.....	8
I.3.2	Procédé chimique.....	8
I.3.2.1	L'échange d'ions.....	8
I.3.2.2	L'extraction par solvant.....	9
I.3.3	Procédés membranaires.....	11
I.3.3.1	L'électrolyse.....	11
I.3.3.2	Osmose inverse.....	12
I.4	Présentation d'une station de dessalement utilisant la technologie d'osmose inverse.....	13
I.4.1	Captage de l'eau de mer.....	14
I.4.2	Prétraitement.....	16
I.4.3	Osmose inverse.....	17
I.4.4	Conception des systèmes de rejet de saumure.....	21
I.4.5	Post-traitement, stockage et distribution.....	22
I.5	Conclusion.....	23

Chapitre II

Utilisation de l'imagerie satellite pour étudier les stations de dessalement de l'eau de mer

II.1	Introduction.....	24
II.2	État actuel du dessalement en Algérie.....	24
II.3	Motivation et objectifs.....	26
II.4	Méthodologie.....	27
II.4.1	Sélection des stations de dessalement.....	27
II.4.2	Utilisation de Google Earth Pro.....	27
II.4.3	Analyse des images satellite.....	28
II.5	Saumure de dessalement.....	28
II.5.1	Méthodes de rejet à la mer du concentrât.....	28
II.5.2	Comportement de la saumure dans les eaux de mer.....	29
II.5.3	Paramètres affectant un rejet de saumure.....	31
II.6	Présentation des stations de dessalement étudiées.....	32
II.6.1	Station de dessalement d'El Hamma.....	32
II.6.2	Station de dessalement de Ténès.....	33
II.6.3	Station de dessalement de Honaine.....	35
II.6.4	Station de dessalement de Beni Saf.....	36
II.6.5	Station de dessalement de Fouka I.....	38
II.6.6	Station de dessalement de Cap Djinet I.....	40
II.7	Analyse comparative des stations de dessalement.....	41
II.8	Conclusion.....	50

Chapitre III

Analyse des rejets de saumures des usines de dessalement en utilisant la méthode à analyse dimensionnelle

III.1	Introduction.....	51
III.2	Motivation et objectifs.....	51
III.3	Méthodologie.....	52
III.3.1	Collecte des données sur les caractéristiques de la saumure rejetée.....	52
III.3.2	Utilisation de l'analyse dimensionnelle.....	52
III.3.3	Paramétrage des caractéristiques environnementales et des spécificités des installations.....	53

III.3.3.1	Caractéristiques environnementales.....	53
III.3.3.2	Spécificités des installations.....	53
III.4	Caractéristiques des jets de saumure en utilisant l'analyse dimensionnelle.....	54
III.5	Résultats et discussion.....	58
III.5.1	Débit individuel de saumure ($Q_{0, ind}$).....	58
III.5.2	Flux de quantité de mouvement (M_0).....	59
III.5.3	Flux de flottabilité (J_0).....	60
III.5.4	Échelles de longueur de décharge (L_Q).....	61
III.5.5	Échelles de longueur d'impulsion (L_M).....	61
III.5.6	La hauteur maximale d'élévation (Z_{max}).....	62
III.5.7	Position horizontale de la crête de la ligne centrale (X_{max}).....	63
III.6	Conclusion.....	64
	Conclusion générale.....	65
	Références.....	67
	Résumé	

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Introduction au dessalement de l'eau de mer et technologie de l'osmose inverse

Figure I.1 : Principe d'un système de dessalement.....	3
Figure I.2 : Les différents procédés utilisés pour le dessalement de l'eau de mer.....	4
Figure I.3 : Procédé de distillation.....	5
Figure I.4 : Principe de distillation à simple effet.....	5
Figure I.5 : Principe de distillation à multiples effets.....	6
Figure I.6 : Principe du procédé à compression mécanique de vapeur.....	7
Figure I.7 : Procédé de distillation à détente étagées.....	7
Figure I.8 : Schéma du procédé de dessalement par congélation sur parois froides.....	8
Figure I.9 : Schéma des étapes de l'échange anionique.....	9
Figure I.10 : Schéma de l'extraction par solvant d'une entité chimique.....	10
Figure I.11 : Principe de l'électrodialyse.....	11
Figure I.12 : Osmose et osmose inverse.....	12
Figure I.13 : Processus de dessalement par osmose inverse.....	14
Figure I.14 : La collecte d'eau de mer.....	14
Figure I.15 : Approches de collecte d'eau de mer pour le dessalement.....	15
Figure I.16 : Pompage de l'eau.....	15
Figure I.17 : Prétraitement de l'eau.....	16
Figure I.18 : Filtres à cartouche.....	16
Figure I.19 : Rack d'osmose inverse.....	18
Figure I.20 : Modules membranaires.....	19
Figure I.21 : Procédé de dessalement.....	20
Figure I.22 : Rejet de la saumure.....	20
Figure I.23 : Diverses catégories de systèmes d'évacuation de saumure.....	21
Figure I.24 : Post-traitement.....	22

Chapitre II

Utilisation de l'imagerie satellite pour étudier les stations de dessalement d'eau de mer

Figure II.1 : Répartition des usines de dessalement d'eau de mer sur le territoire national.....	24
Figure II.2 : Stations de dessalement étudiées.....	27
Figure II.3 : Stratégies de rejet pour les effluents à flottation négative.....	29
Figure II.4 : Régions de champ proche et lointain dans une décharge de jet.....	30
Figure II.5 : L'effet de flottabilité.....	31

Figure II.6 : L'effet du courant.....	32
Figure II.7 : Image satellite de la station de dessalement d'El Hamma le (30/09/2023)	33
Figure II.8 : Image satellite de la station de dessalement de Ténès le (27/10/2022)	34
Figure II.9 : Image satellite de la station de dessalement de Honaine le (14/03/2023)	36
Figure II.10 : Image satellite de la station de dessalement de Beni Saf le (02/07/2023)	38
Figure II.11 : Image satellite de la station de dessalement de Fouka I le (12/03/2024)	39
Figure II.12 : Image satellite de la station de dessalement de Cap Djinet I le (30/09/2023)	41
Figure II.13 : Images satellites des stations de dessalement en cours de construction avec point de rejet de saumure.	42
Figure II.14 : Images satellites des stations de dessalement en opération.....	43
Figure II.15 : Superficie des stations de dessalement.....	44
Figure II.16 : Analyse de la dispersion de la saumure à la station de dessalement de Ténès sous différents régimes de vent et de mer.....	46
Figure II.17 : Évolution temporelle de l'interaction de jet sur la surface de l'eau de la station de dessalement d'El Hamma en 2015.....	47
Figure II.18 : Images en 3D de l'impact de jet sur la surface de l'eau dans le cas d'un déversement dans une eau peu profonde.....	48
Figure II.19 : Vue de profil de l'impact d'un jet incliné en eau peu profonde.....	48
Figure II.19 : Variation saisonnière du périmètre de l'interaction de jet sur la surface de l'eau à la station de dessalement d'El Hamma (2015)	49

Chapitre III

Analyse des rejets de saumures des usines de dessalement en utilisant la méthode à analyse dimensionnelle

Figure III.1 : Vue latérale schématique d'un jet à flottabilité négative se déversant dans un milieu ambiant stagnant avec un fond incliné.....	54
Figure III.2 : Captures d'écran du RO-discharge-calculator.....	57
Figure III.3 : Répartition des débits individuels de saumure.....	59
Figure III.4 : Représentation des valeurs de flux de quantité de mouvement.....	59
Figure III.5 : Représentation des flux de flottabilité.....	60
Figure III.6 : Représentation des échelles de longueur de décharge.....	61
Figure III.7 : Représentation des échelles de longueur d'impulsion.....	62
Figure III.8 : Représentation des limites supérieures du jet.....	62
Figure III.9 : Représentation des positions horizontales de la crête de la ligne centrale.....	63
Figure III.10 : Représentation des jets à flottabilité négative dans un milieu ambiant stagnant avec fond incliné, basée sur les caractéristiques des six stations.....	64

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre II

Utilisation de l'imagerie satellite pour étudier les stations de dessalement d'eau de mer

Tableau II.1 : Usines de dessalement de l'eau de mer en Algérie.....	25
Tableau II.2 : Caractéristiques techniques de la station de dessalement d'El Hamma.....	32
Tableau II.3 : Caractéristiques techniques de la station de dessalement de Ténès.....	34
Tableau II.4 : Caractéristiques techniques de la station de dessalement de Honaine.....	35
Tableau II.5 : Caractéristiques techniques de la station de dessalement de Beni Saf.....	37
Tableau II.6 : Caractéristiques techniques de la station de dessalement de Fouka I.....	39
Tableau II.7 : Caractéristiques techniques de la station de dessalement de Cap Djinet I.....	40

Chapitre III

Analyse des rejets de saumures des usines de dessalement en utilisant la méthode a analyse dimensionnelle

Tableau III.1 : Caractéristiques des stations de dessalement utilisées pour l'analyse.....	58
---	----

NOMENCLATURE

<i>Symboles</i>	<i>Descriptions</i>	<i>Unités</i>
ρ	Densité du fluide	kg/m^3
g	Accélération due à la pesanteur	m/s^2
h	Hauteur du fluide	m
π	Pression osmotique	Pa
i	Nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte	mol/L
C	Concentration en sels	$mol.m^{-3}$
R	Constante des gaz parfaits	$J.mol^{-1}.K^{-1}$
T	Température absolue	K
ρ_a	Densité du courant	Kg/m^3
ρ_i	Densité de saumure	Kg/m^3
U_a	Vitesse du courant	m/s
T_a	Température	$^{\circ}C$
Sal_a	Salinité	g/L
θ_B	L'inclinaison du fond	\cdot
Q_{drink}	Débit de production d'eau potable	m^3/s
r	Taux de récupération	$\%$
D	Diamètre de l'émissaire	m
Q_{desal}	Débit d'effluent rejeté	m^3/s

n	Nombre d'ouvertures (port)	-
$Q_{effl,ex}$	Débit d'effluent externe	m^3/s
$T_{effl,ex}$	Température d'effluent externe	$^{\circ}C$
$Sal_{effl,ex}$	Salinité d'effluent externe	ppt
Z_{max}	Hauteur maximale d'élévation	m
X_{max}	Position horizontale de la crête de la ligne centrale	m
X_i	Position horizontale au point d'impact	m
H_{ao}	Profondeur moyenne au point de rejet	m
ρ_a	Masse volumique ambiante	kg/m^3
ρ_0	Masse volumique de l'effluent	kg/m^3
U_o	Vitesse initiale de décharge du jet	m/s
h_o	Hauteur du port	m
θ_o	Angle de décharge du jet (angle vertical par rapport au fond)	$^{\circ}$
$Q_{0.ind}$	Débit individuel de saumure	m^3/s
M_o	Le flux de quantité de mouvement	m^4/s^2
J_o	Le flux de flottabilité	m^4/s^3
L_Q	L'échelle de longueur de rejet	m
L_M	L'échelle de longueur de quantité de mouvement	m
F_0	Le Nombre de Froude	-

Introduction générale

L'eau a joué un rôle essentiel dans l'apparition et le développement de la vie sur Terre. Elle reste une ressource naturelle d'une importance capitale pour l'humanité. Cependant, les ressources en eau disponibles s'amenuisent partout dans le monde en raison des activités humaines et de facteurs naturels, ce qui est reconnu comme une menace actuelle ou future pour l'activité humaine et, en conséquence, une tendance certaine à développer d'autres ressources en eau telles que le dessalement peut être observée [1]. Parmi les technologies utilisées pour dessaler l'eau de mer, on cite le procédé membranaire l'osmose inverse (OI/RO) et les procédés thermiques, flash multi-étapes (MSF) et la distillation multi-effets (MED) [2]. Les technologies de dessalement jouent un rôle croissant dans la satisfaction des besoins d'approvisionnement en eau des municipalités et de l'industrie. Il est courant que lorsqu'ils se réfèrent au processus de dessalement, les gens pensent qu'il s'agit d'une alternative propre pour l'approvisionnement en eau potable, mais c'est une option qui, comme beaucoup d'autres, peut avoir des impacts environnementaux potentiels similaires à ceux de n'importe quelle autre industrie [3]. Outre la récupération de l'eau douce, un flux de saumure « appelé » rejet est coproduit et peut être dangereux pour l'environnement, car il s'agit d'une solution hyper saline et peut contenir des produits chimiques provenant des différentes opérations de traitement [4]. Malgré ces préoccupations, de nombreux pays, dont l'Algérie, ont pris des mesures proactives afin d'assurer l'approvisionnement en eau potable des populations des villes côtières et de répondre à l'augmentation rapide de la demande d'eau dans les secteurs de l'agriculture et de l'industrie.

Dans un contexte de pénurie d'eau douce et de l'importance croissante du dessalement, notre mémoire de fin de cycle s'articule autour de la problématique des rejets de saumure des usines de dessalement d'eau de mer opérationnelles en Algérie, en utilisant principalement l'imagerie satellite comme outil d'analyse. Notre manuscrit se présente comme suit :

Le chapitre I sera consacré à une présentation générale du dessalement, en abordant les différentes méthodes existantes, telles que la distillation, l'électrodialyse et l'osmose inverse. Nous détaillerons également le fonctionnement d'une usine de dessalement par osmose inverse, en exposant les différentes étapes de presseuse de traitement de l'eau.

Dans le chapitre II, nous étudierons les stations de dessalement en Algérie en utilisant l'imagerie satellite. Grâce aux outils spatiaux et temporels de Google Earth Pro, cette approche nous permettra d'observer les stations à travers le temps, de voir leurs structures, de détecter leurs systèmes de rejets de saumure, et de mesurer la superficie des usines, ainsi que l'interaction du jet sur la surface de l'eau.

Quant au chapitre III, il sera dédié à l'analyse des rejets de saumure des usines de dessalement en utilisant la méthode d'analyse dimensionnelle ; nous examinerons les résultats obtenus pour le cas de ces six stations : El Hamma, Ténès, Beni Saf, Honaine, Fouka I et Cap Djinet I. Nous analyserons ces résultats en les confrontant aux données disponibles sur les stations, afin de déterminer si la conception des rejets est adéquate pour chacune d'entre elles et d'évaluer si elle répond aux exigences écologiques marines.

Enfin, le manuscrit se terminera par une conclusion générale, où seront présentées des recommandations pour éliminer les rejets de saumure. Afin de réduire les conséquences néfastes des usines de dessalement et de répondre aux besoins croissants en eau douce, tout en favorisant des pratiques d'avenir.

Chapitre I

INTRODUCTION AU DESSALEMENT
DE L'EAU DE MER ET TECHNOLOGIE
DE L'OSMOSE INVERSE

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les procédés utilisés pour le dessalement de l'eau de mer. Nous nous concentrerons particulièrement sur le procédé membranaire d'osmose inverse, où nous allons détailler le fonctionnement d'une usine de dessalement par osmose inverse, en mettant en avant les différentes étapes du traitement de l'eau.

I.2 Présentation du procédé purification de l'eau salée

Ce procédé permet de purifier l'eau salée en éliminant les sels dissous et autres contaminants, afin d'obtenir de l'eau douce potable, utilisable pour l'industrie et l'irrigation agricole (Figure I.1). Il s'agit d'une solution technologique à la pénurie d'eau dans les régions où les sources d'eau douce traditionnelles sont rares ou insuffisantes.

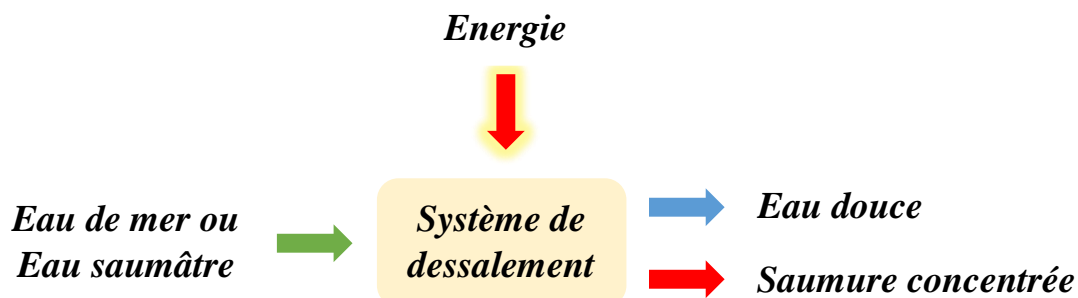


Figure I.1 : Principe d'un système de dessalement (modifié d'après [5]).

I.3 Les différentes techniques et méthodes pour le dessalement de l'eau de mer

Les méthodes actuelles de dessalement des eaux sont classées en trois catégories, selon le principe appliqué, à savoir :

- Les procédés thermiques ;
- Les procédés membranaires ;
- Les procédés chimiques.

Les détails sont à trouver sur le schéma suivant :

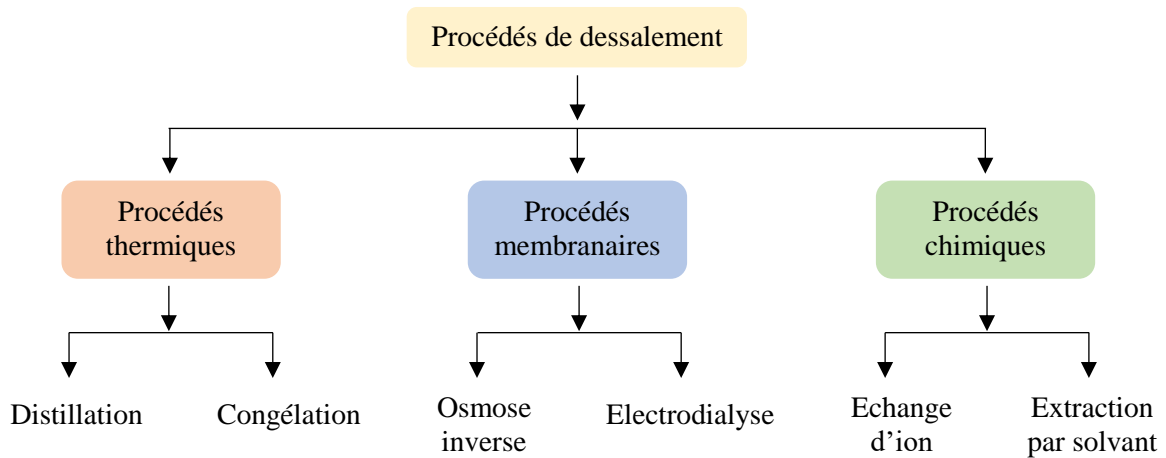


Figure I.2 : Les différents procédés utilisés pour le dessalement de l'eau de mer.

I.3.1 Procédés thermiques

Le procédé thermique de dessalement de l'eau de mer, également connu sous le nom de dessalement par évaporation, est une méthode de traitement de l'eau qui utilise la chaleur pour évaporer l'eau de mer, laissant derrière elle le sel et les autres minéraux. L'eau vaporisée est ensuite condensée pour produire de l'eau douce.

I.3.1.1 Distillation

Les procédés de distillation sont des techniques utilisées pour séparer les composants d'un mélange liquide en les chauffant pour les vaporiser, puis en les condensant pour les récupérer sous forme liquide (Figure I.3) [6].

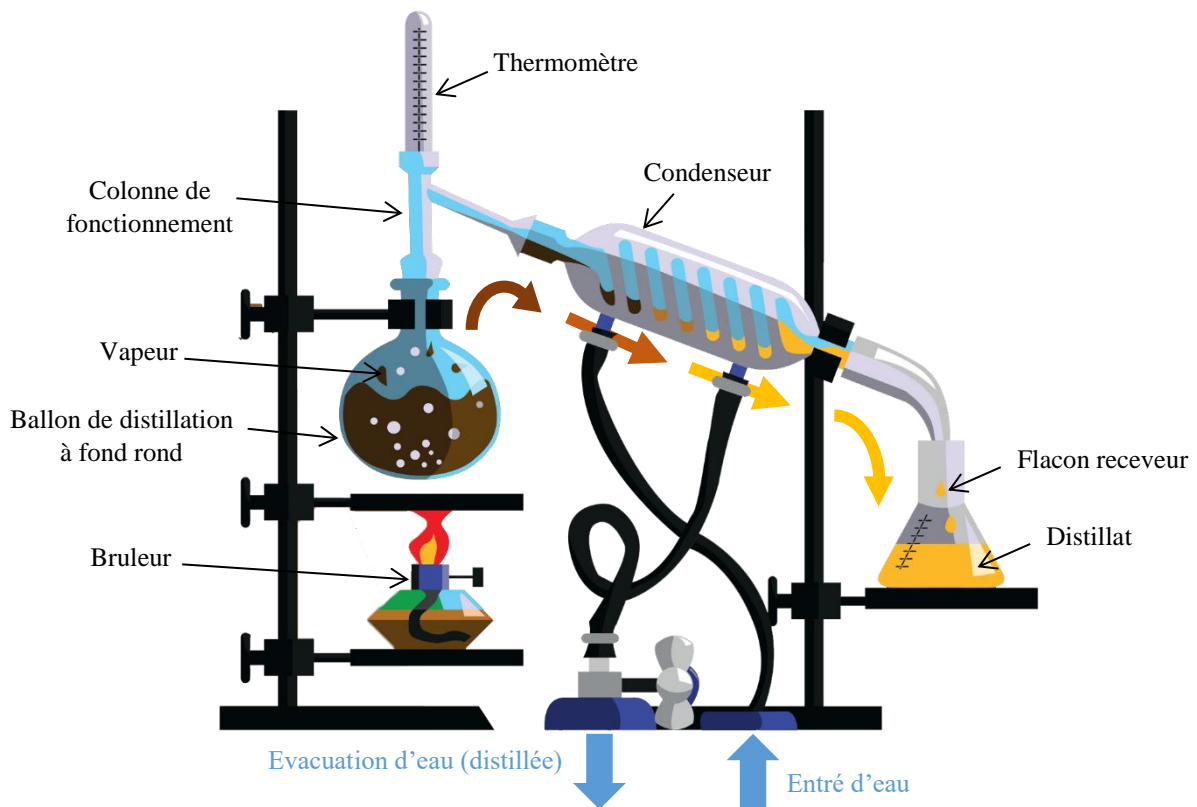


Figure I.3 : Procédé de distillation (modifié d'après [6]).

Il existe plusieurs types de distillation :

a) Distillation à simple effet : Un procédé de distillation qui consiste en l'évaporation et la condensation d'un liquide en une seule étape. Dans ce processus, le liquide est chauffé pour le vaporiser, puis la vapeur est refroidie et condensée pour obtenir le produit désiré (Figure I.4) [7].

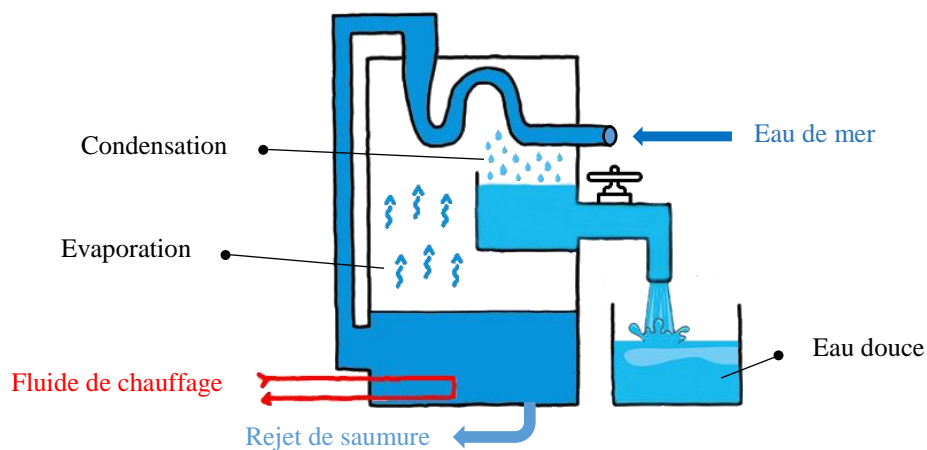


Figure I.4 : Principe de distillation à simple effet (modifié d'après [7]).

b) Distillation multi-effet : La distillation à effets multiples (Figure I.5) est un processus de distillation qui utilise plusieurs étapes d'évaporation et de condensation pour séparer les composants d'un mélange liquide. Particulièrement adapté à la purification de l'eau. Le procédé repose sur le principe de la distillation à simple effet, mais est amélioré par l'accumulation de plusieurs unités (ou effets) en abaissant progressivement la pression et la température d'une unité à l'autre. Dans la première unité la plus chaude, le fluide caloporteur chauffe l'eau jusqu'à ce qu'elle s'évapore et produise de la vapeur d'eau pure. Cette vapeur est condensée dans un échangeur de chaleur pour produire une eau hautement purifiée. La vapeur entre ensuite dans une deuxième unité avec une pression légèrement inférieure pour chauffer l'effet suivant. Répéter ce processus plusieurs fois réduit les coûts d'exploitation en réutilisant la chaleur latente [8].

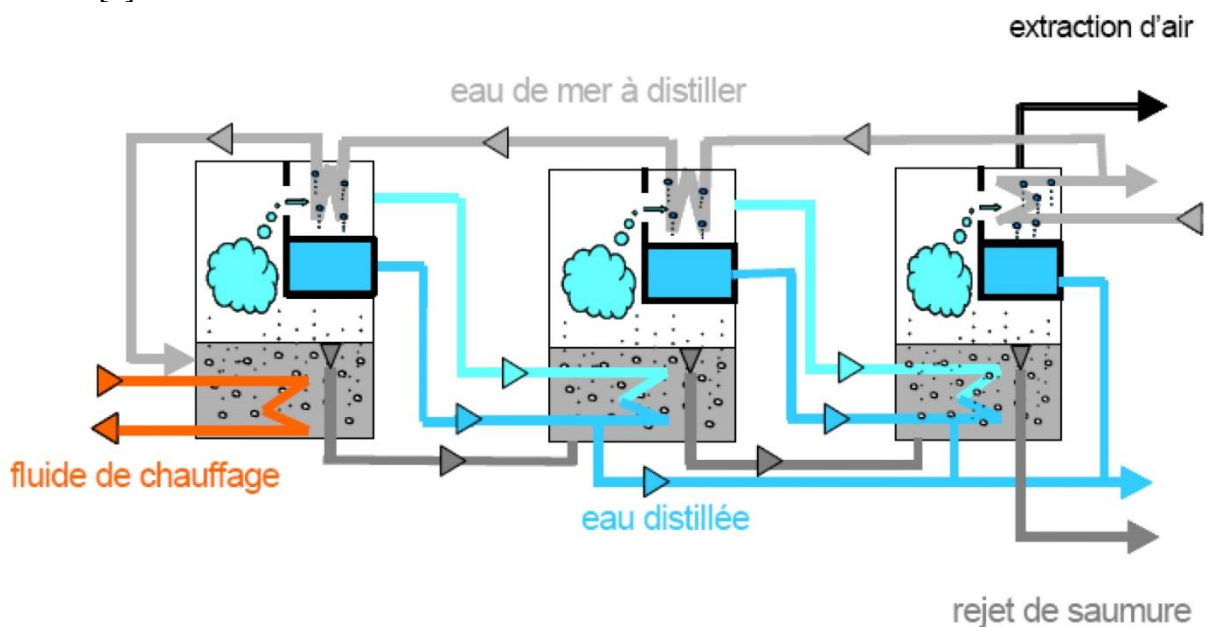


Figure I.5 : Principe de distillation à multiples effets [8].

c) Distillation avec compresseur de vapeur : Cette méthode de dessalement de l'eau utilise un compresseur pour augmenter la pression de la vapeur, qui est ensuite utilisée pour chauffer et vaporiser un liquide. Le processus consiste en un évaporateur, où l'eau est chauffée et vaporisée, et un compresseur, qui compresse la vapeur produite par l'évaporateur. La vapeur compressée est ensuite condensée, libérant de la chaleur qui est utilisée pour préchauffer l'eau d'alimentation. La vapeur condensée est ensuite renvoyée à l'évaporateur, où elle est utilisée pour chauffer et vaporiser plus d'eau. Le processus est répété plusieurs fois, le nombre d'étapes déterminant l'économie d'énergie réalisée (Figure I.6) [5].

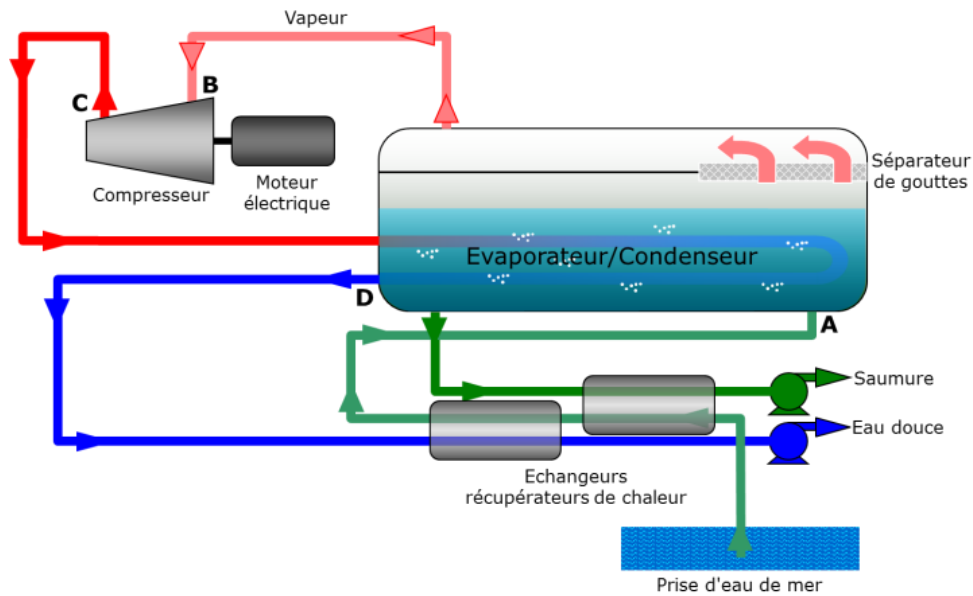


Figure I.6 : Principe du procédé à compression mécanique de vapeur [5].

d) Distillation par détente successive ou procédé « Flash » : La distillation par expansion continue (Figure I.7), également connue sous le nom de procédé « flash », est une méthode de distillation qui chauffe l'eau de mer sous pression puis la libère soudainement dans un espace à pression réduite. Cette expansion rapide provoque l'évaporation instantanée d'une partie de l'eau de mer, formant de la vapeur d'eau. Cette vapeur est ensuite refroidie et condensée pour produire de l'eau distillée. Le processus est répété en plusieurs étapes successives, permettant une séparation efficace des composants de l'eau de mer [9]. La distillation par expansion continue est utilisée dans le dessalement pour produire de l'eau douce, fournissant ainsi une méthode fiable et efficace d'obtention d'eau potable à partir de sources d'eau salée.

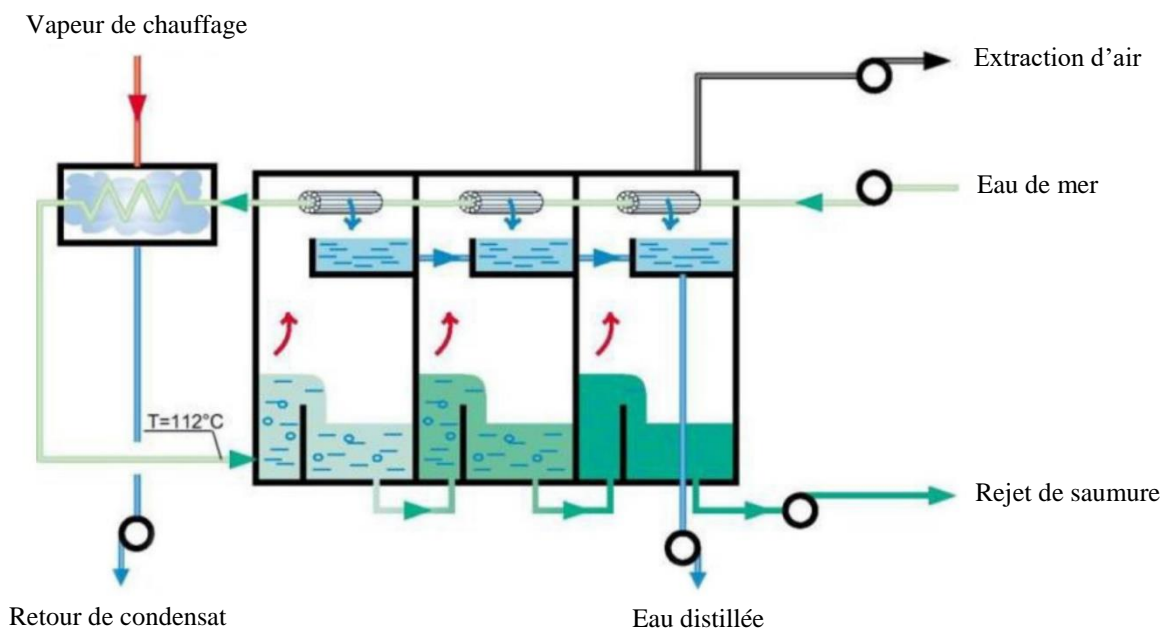


Figure I.7 : Procédé de distillation à détente étagée (modifié d'après [9]).

I.3.1.2 Congélation

Le processus de dessalement réfrigéré est une technologie innovante conçue pour purifier l'eau de mer en éliminant les impuretés en la convertissant en glace. Ce processus repose sur la formation de cristaux de glace dans l'eau de mer, qui séparent le sel et les autres contaminants de l'eau (Figure I.8) [10].

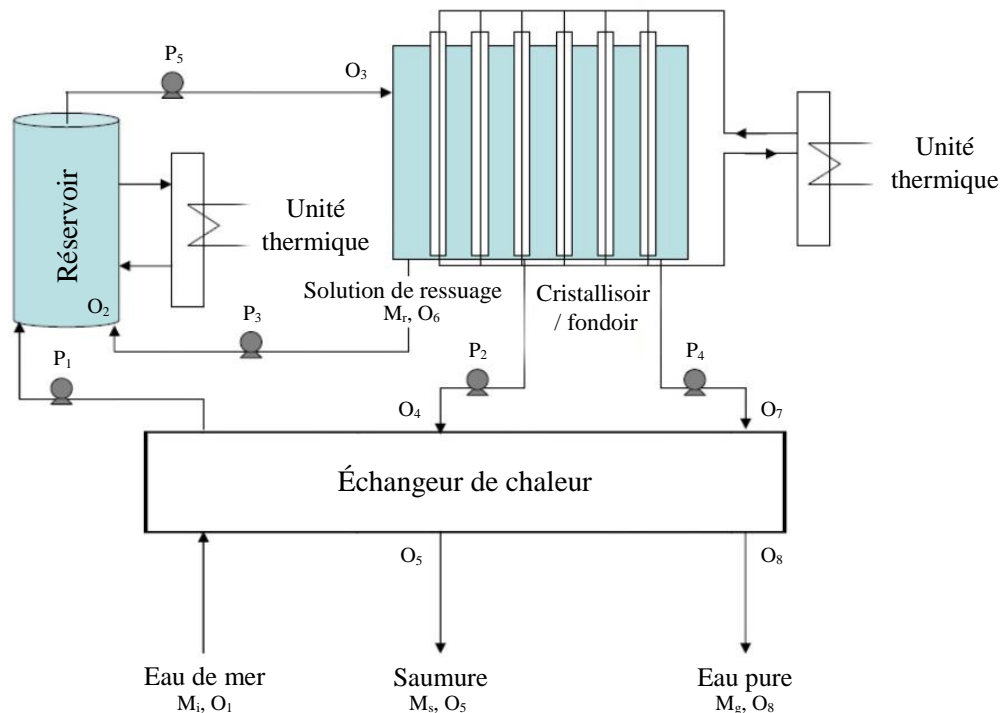


Figure I.8 : Schéma du procédé de dessalement par congélation sur parois froides (modifié d'après [10]).

I.3.2 Procédé chimique

Un procédé chimique est une méthode ou un ensemble d'opérations permettant de modifier la composition chimique d'une ou plusieurs substances. Ce procédé peut survenir naturellement ou être artificiellement créé. Les procédés chimiques les plus connus sont présentés ci-dessous :

I.3.2.1 L'échange d'ions

L'échange d'ions est un processus qui élimine les sels dissous de l'eau en utilisant des substances insolubles appelées échangeurs d'ions pour échanger avec les ions présents dans l'eau (Figure I.9) [11]. Le procédé a longtemps été utilisé pour adoucir l'eau et est aujourd'hui utilisé pour produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer, où l'eau saumâtre est également utilisée dans de nombreuses zones industrielles et agricoles.

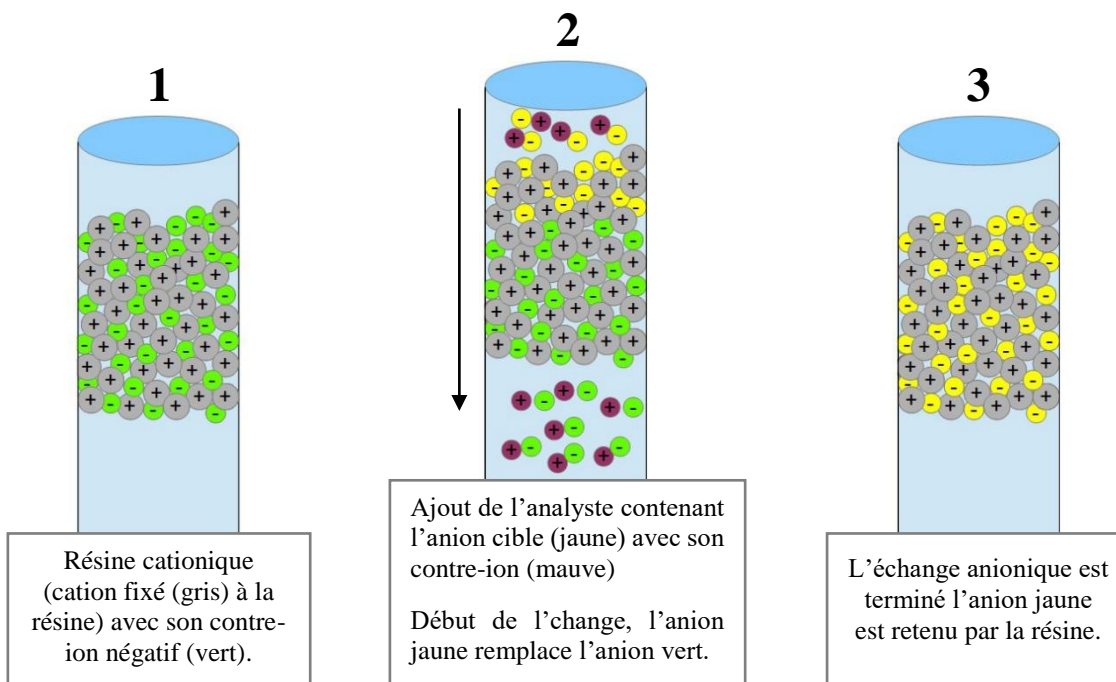


Figure I.9 : Schéma des étapes de l'échange anionique (modifié d'après [11]).

Le principe est simple : l'eau contenant des sels dissous entre en contact avec un échangeur d'ions. Les ions présents dans l'eau sont échangés avec les ions présents sur l'échangeur.

Afin d'obtenir de l'eau potable, un double échange d'ions doit se produire. Deux types d'échangeurs d'ions sont alors utilisés : les résines cationiques, qui absorbent les ions positifs, et les résines anioniques, qui absorbent les ions négatifs.

Après une certaine période d'utilisation, l'échangeur d'ions doit être régénéré pour restaurer sa capacité d'échange.

I.3.2.2 L'extraction par solvant

L'extraction par solvant, en tant que méthode de dessalage, implique le transfert de solutés d'une solution liquide vers un solvant non miscible (Figure I.10). Ce procédé suit le principe de l'extraction liquide-liquide, aboutissant à un solvant enrichi en solutés et à une solution de départ appauvrie en solutés [12].

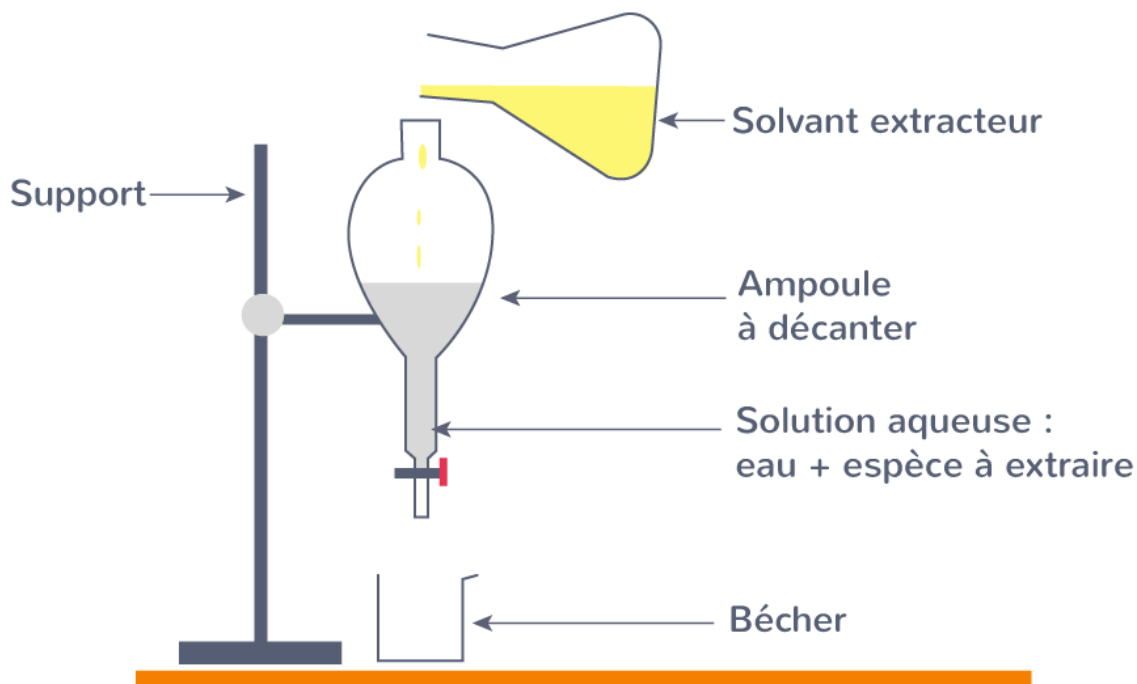


Figure I.10 : Schéma de l'extraction par solvant d'une entité chimique [13].

Une extraction par solvant peut être effectuée de différentes façons, telles que l'échange d'ions et le transfert de molécules ou d'agrégats d'ions neutres [11]. Dans le cas du dessalement de l'eau de mer, les méthodes d'extraction par solvant opèrent soit pour extraire l'eau jusqu'au solvant, soit pour extraire le sel. Afin d'assurer l'efficacité du processus, il est nécessaire de régénérer et de recycler le solvant en le chauffant, ce qui entraîne une modification importante de son pouvoir solvant en fonction de la température. La sélection du solvant est donc cruciale pour évaluer l'efficacité du processus de dessalement. Il est possible d'extraire l'eau en utilisant des amines secondaires et tertiaires, tandis que l'extraction du sel requiert l'emploi de solvants polymères.

Cependant, cette dernière méthode n'est pas couramment utilisée en raison de l'exigence d'une immiscibilité totale entre le solvant et l'eau. Bien que l'extraction par solvant soit prometteuse en tant que technique de dessalement, elle n'a pas encore été largement utilisée au niveau industriel à cette fin particulière. Néanmoins, il présente des possibilités intéressantes pour le traitement de l'eau et la production d'eau douce à partir de sources d'eau non traitées.

I.3.3 Procédés membranaires

Les procédés membranaires de dessalement de l'eau de mer sont des techniques de séparation utilisées pour produire de l'eau douce à partir de l'eau salée. Ces méthodes impliquent l'utilisation de membranes pour filtrer les sels et autres composés présents dans l'eau de mer.

I.3.3.1 L'électrodialyse

Le procédé de dessalement par électrodialyse consiste à extraire les ions contenus dans l'eau de mer à l'aide d'un procédé électrochimique basé sur la migration des ions à travers une membrane sélective sous l'influence d'un champ électrique. La membrane utilisée peut être une membrane anionique (permettant le passage des anions) ou une membrane cationique (permettant le passage des cations), éliminant ainsi certains ions présents dans l'eau [7]. En associant plusieurs membranes parallèlement, de l'eau douce et salée peut être obtenue à la fin du traitement (Figure I.11). Ce procédé est particulièrement adapté au dessalement partiel des eaux saumâtres. Les membranes utilisées doivent être mécaniquement résistantes, étanches, chimiquement inertes et avoir une faible résistance ohmique pour garantir un fonctionnement efficace du système d'électrodialyse [14].

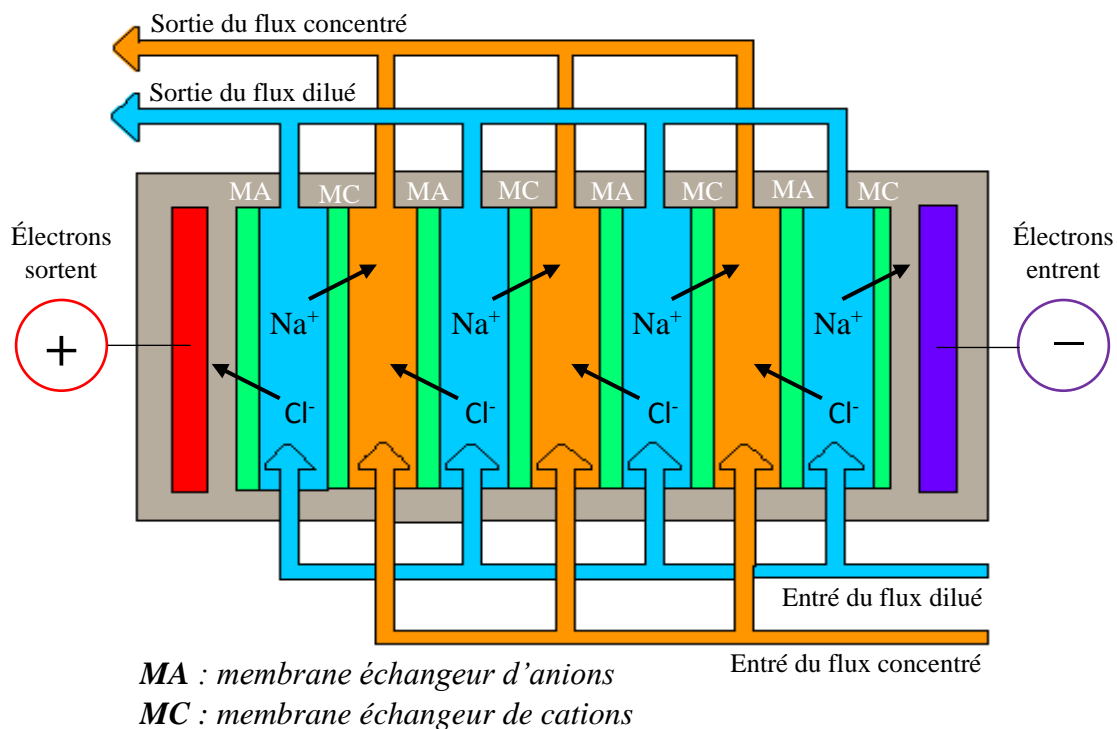


Figure I.11 : Principe de l'électrodialyse (modifié d'après [7]).

I.3.3.2 Osmose inverse

L'osmose est un phénomène naturel qui se produit lorsque deux solutions aqueuses de concentrations en sel différentes sont séparées par une membrane semi-perméable. Au cours de ce processus, l'eau passe spontanément d'une solution saline moins concentrée à une solution saline plus concentrée. En revanche, l'osmose inverse est un processus de purification de l'eau qui fonctionne à l'opposé de l'osmose normale. Il s'agit d'appliquer une pression sur une solution concentrée, forçant l'eau à s'écouler de la solution concentrée vers la solution diluée à travers une membrane semi-perméable. Ce processus piège le sel et les impuretés, ne laissant passer que les molécules d'eau, créant ainsi de l'eau douce [15].

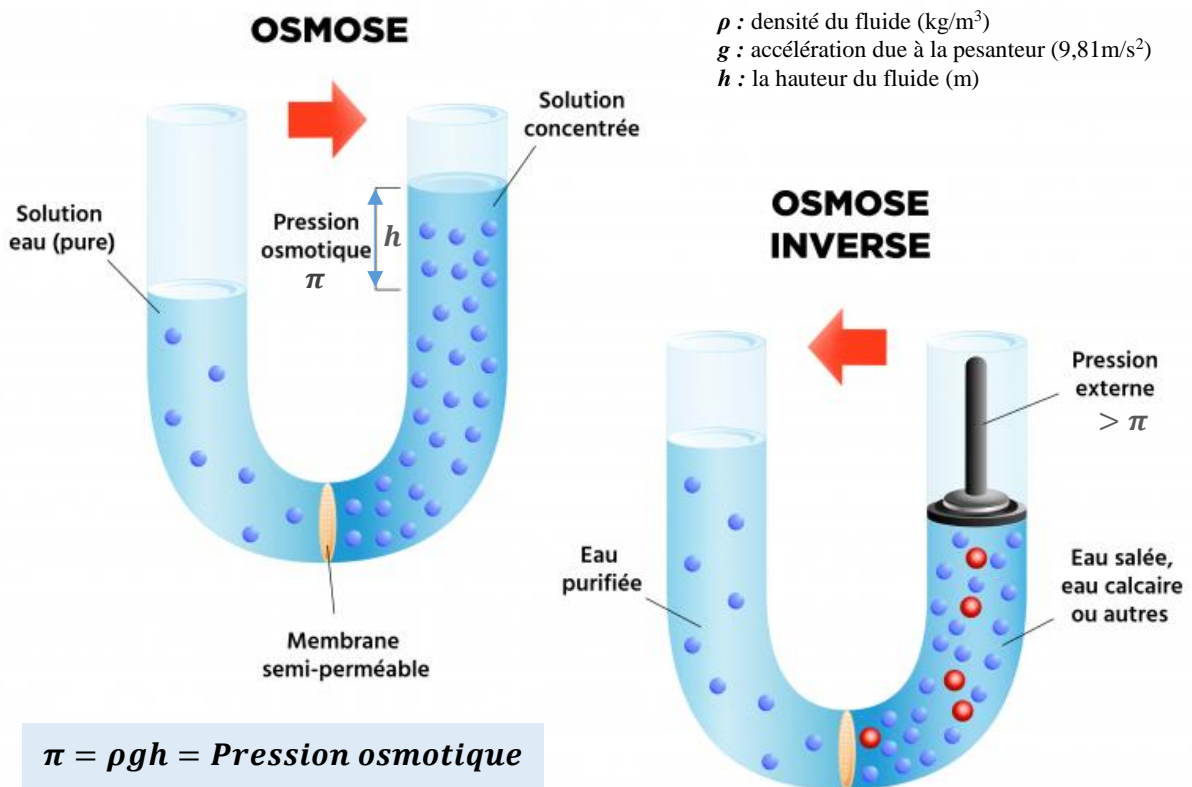


Figure I.12 : Osmose et osmose inverse (modifié d'après [15]).

Une augmentation de la pression au-delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique (Figure I.12), c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est le phénomène d'osmose inverse [16].

Pour les solutions suffisamment diluées, la pression osmotique notée π peut être calculée d'après la loi de Van't Hoff :

$$\pi = i \times C \times R \times T \quad [\text{Pa}] \quad (\text{I.1})$$

Avec :

- i : Le nombre d'espèces d'ions constituant le soluté;
- C : La concentration molaire du soluté (mol/L);
- R : La constante des gaz parfaits ($0,082 \text{ L.atm.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$);
- T : La température (K);

I.4 Présentation d'une station de dessalement utilisant la technologie d'osmose inverse

L'opération d'une station de dessalement d'eau de mer par osmose inverse suit un processus méthodique en cinq étapes essentielles (Figure I.13), assurant ainsi une conversion efficace de l'eau de mer en une ressource d'eau douce vitale.

- 1 Captage de l'eau de mer :** Le processus commence par la collecte de l'eau de mer, qui est généralement pompée depuis une source océanique. Cette eau salée est la matière première essentielle pour la suite du processus.
- 2 Prétraitement :** Cette étape implique d'éliminer les particules solides, les sédiments et les impuretés présents dans l'eau de mer, puis de la filtrer afin d'éliminer les particules plus fines, comme les algues et les bactéries, qui pourraient également entraîner le colmatage des membranes d'osmose inverse.
- 3 Osmose inverse :** L'étape centrale du processus implique l'utilisation de membranes semi-perméables spéciales dans une unité d'osmose inverse. Ces membranes laissent passer les molécules d'eau tout en retenant le sel, les impuretés et d'autres composants indésirables. L'eau qui traverse les membranes devient ainsi de l'eau douce, tandis que la saumure concentrée est séparée et traitée ultérieurement.
- 4 Post-traitement :** Une fois l'osmose inverse terminée, l'eau produite est soumise à un traitement ultérieur afin de neutraliser le pH et de fournir une eau plus saine. L'objectif de cette étape est de supprimer les substances toxiques et de maintenir le pH de l'eau stable. Par la suite, on ajoute des minéraux à l'eau afin de la régénérer, ce qui permet de rétablir les niveaux de minéraux nécessaires à la santé humaine.
- 5 Stockage et distribution :** L'eau potable issue du processus de dessalement ne peut pas être utilisée immédiatement. On la conserve donc dans des réservoirs spécialement aménagés pour cela. Ces réservoirs sont indispensables pour faire face aux fluctuations de la demande en eau et garantir un approvisionnement constant aux populations locales. En somme, l'eau douce est constamment disponible pour tous ceux qui en ont besoin grâce au stockage et à la distribution.

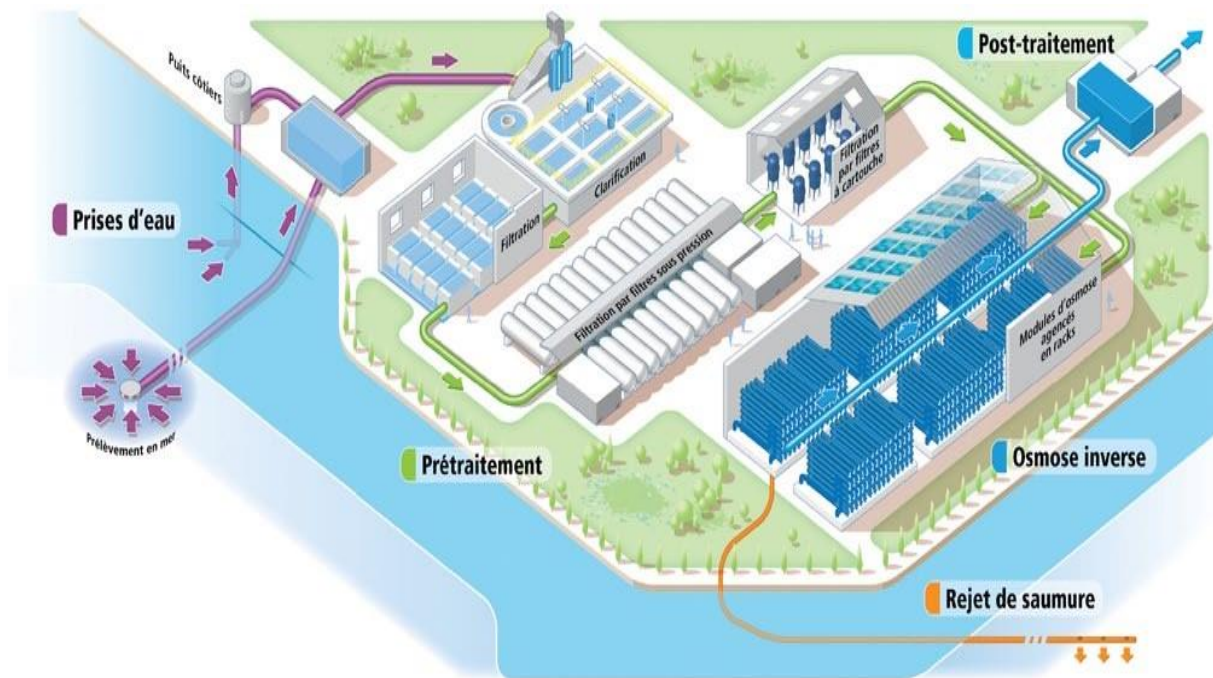


Figure I.13 : Processus de dessalement par osmose inverse [17].

I.4.1 Captage de l'eau de mer

Le procédé de dessalement commence par la collecte de l'eau de mer (Figure I.14), principalement à partir des prises d'eau ouvertes ou de puits de plage (Figure I.15).

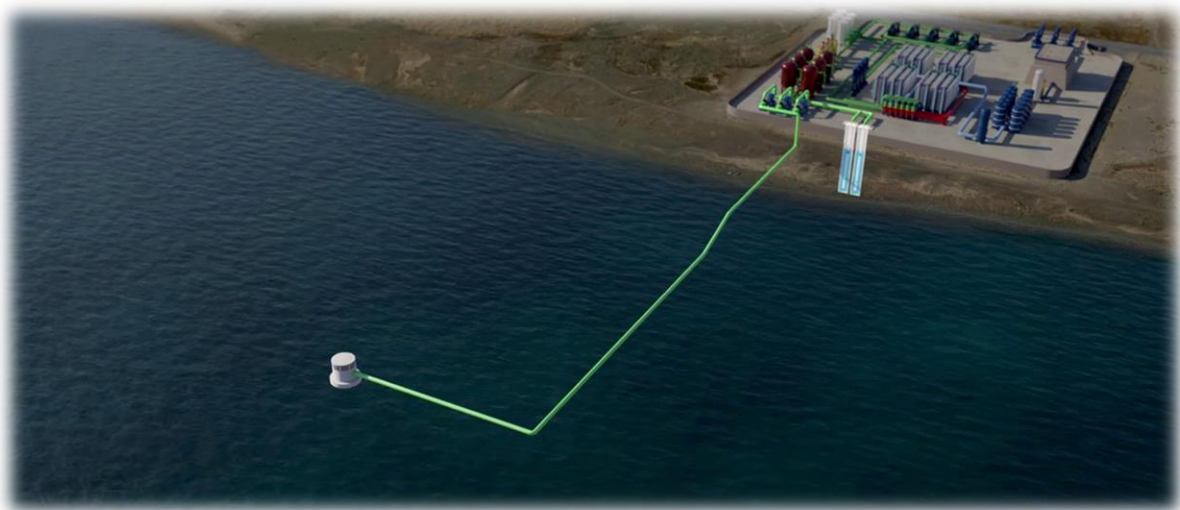


Figure I.14 : La collecte d'eau de mer [18].

Les entrées ouvertes (Figure I.15.a) captent des débits plus importants et constituent donc la méthode la plus recommandée pour les grandes usines de dessalement.

Cependant, la qualité des réserves d'eau n'est pas stable dans le temps, affectée par la turbidité, les changements de température, les rejets dans l'océan ou encore l'impact des tempêtes.

Le système de puits (Figure I.15.b) fournit une eau de meilleure qualité et plus constante grâce au processus de filtration naturel qui se produit sous terre.

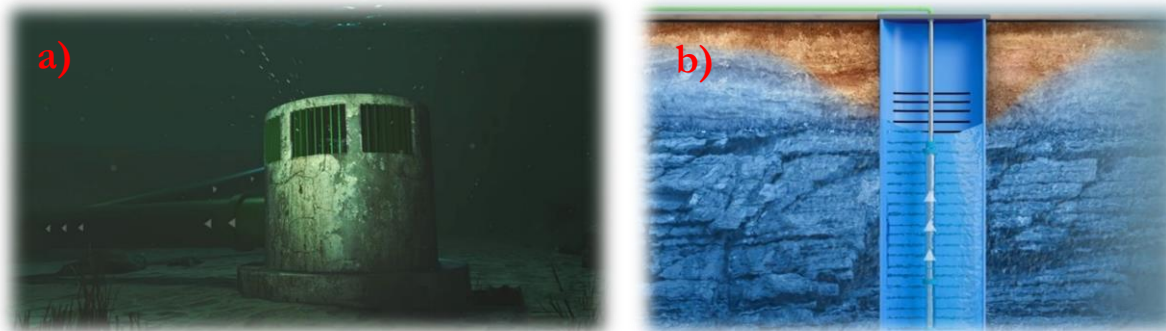


Figure I.15 : Approches de collecte d'eau de mer pour le dessalement : a) Prise d'eau ouverte ; b) Système des puits [18].

Il est nécessaire d'utiliser des pompes pour acheminer l'eau de mer jusqu'à l'usine, installées à la surface ou immergées (Figure I.16.a).

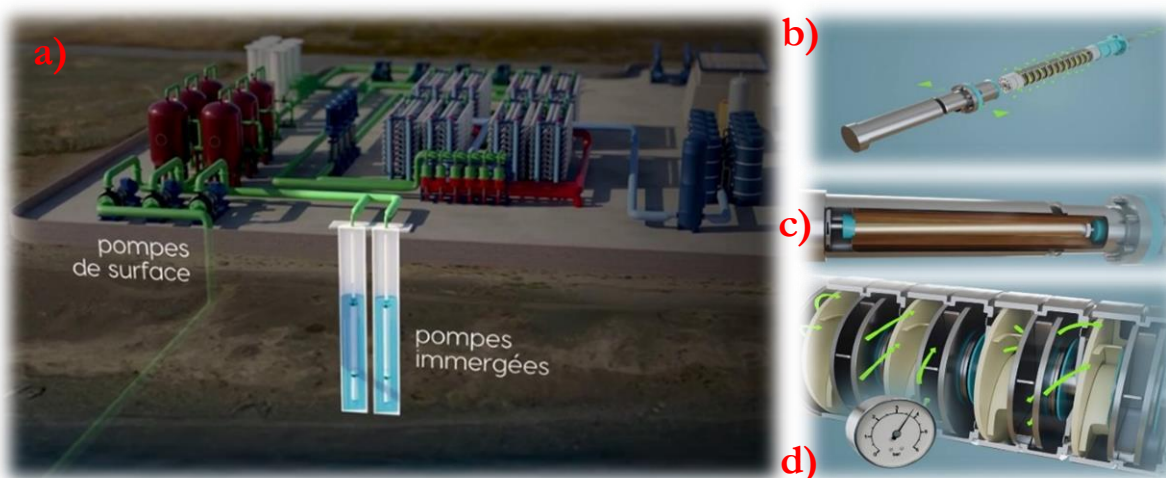


Figure I.16 : Pompage de l'eau [18].

Dans le cas de pompes immergées, l'eau de mer pénètre à travers des trous des roues de la pompe, où elle est propulsée radialement sous l'effet de l'action centrifuge, (Figure I.16.b). Ces roues sont reliées à un seul arbre, entraîné par un moteur à induction (Figure I.16.c).

L'alternance des roues et des diffuseurs augmente la pression à chaque étape jusqu'à atteindre une pression suffisante permettant de pousser l'eau de mer jusqu'à l'usine de dessalement, (Figure I.16.d).

I.4.2 Prétraitement

L'eau de mer doit être plus ou moins prétraitée selon le type de captage et les caractéristiques physico-chimiques de l'eau.



Figure I.17 : Prétraitement de l'eau [18].

La première étape de prétraitement consiste généralement en une filtration à différentes granulométries pour retenir les solides en suspension supérieurs à 20 micromètres, (Figure I.17). Les filtres utilisés sont souvent des filtres à cartouche ou des filtres à sable. Ces filtres doivent être régulièrement lavés à contre-courant pour maintenir leur efficacité, car ils s'encrassent et perdent en efficacité au fur et à mesure qu'ils retiennent des matières solides.



Figure I.18 : Filtres à cartouche [18].

Les filtres à cartouche (Figure I.18) jouent un rôle crucial dans les systèmes de dessalement de l'eau de mer en assurant la protection des équipements sensibles tels que les pompes et les membranes d'osmose inverse.

Installés en amont de ces équipements, les filtres à cartouche constituent un système de sécurité supplémentaire permettant de retenir les microparticules qui pourraient endommager les composants internes des machines.

Leur fonctionnement repose sur l'utilisation d'un média filtrant pour piéger les particules solides présentes dans l'eau de mer, avec une taille de filtration généralement comprise entre 1 et 5 micromètres nominaux.

En empêchant les particules solides d'entrer en contact avec les pompes, les filtres à cartouche prolongent leur durée de vie et réduisent les risques de dysfonctionnement.

De même, en capturant les impuretés avant qu'elles n'atteignent les membranes d'osmose inverse, ces filtres contribuent à maintenir leur efficacité et leur durabilité à long terme, assurant ainsi la fiabilité et l'efficacité globale du processus de dessalement de l'eau de mer.

I.4.3 Osmose inverse

Une fois prétraitée, l'eau destinée au processus d'osmose inverse nécessite une pression adéquate pour être acheminée vers les tubes de pression contenant les membranes. Cette pression, généralement entre 50 et 60 bars, est essentielle pour garantir un flux continu à travers les membranes et ainsi faciliter le processus de séparation des sels et des impuretés de l'eau. Des pompes haute pression sont donc utilisées pour fournir cette force nécessaire, assurant ainsi un fonctionnement efficace et optimal du système d'osmose inverse (Figure I.19).

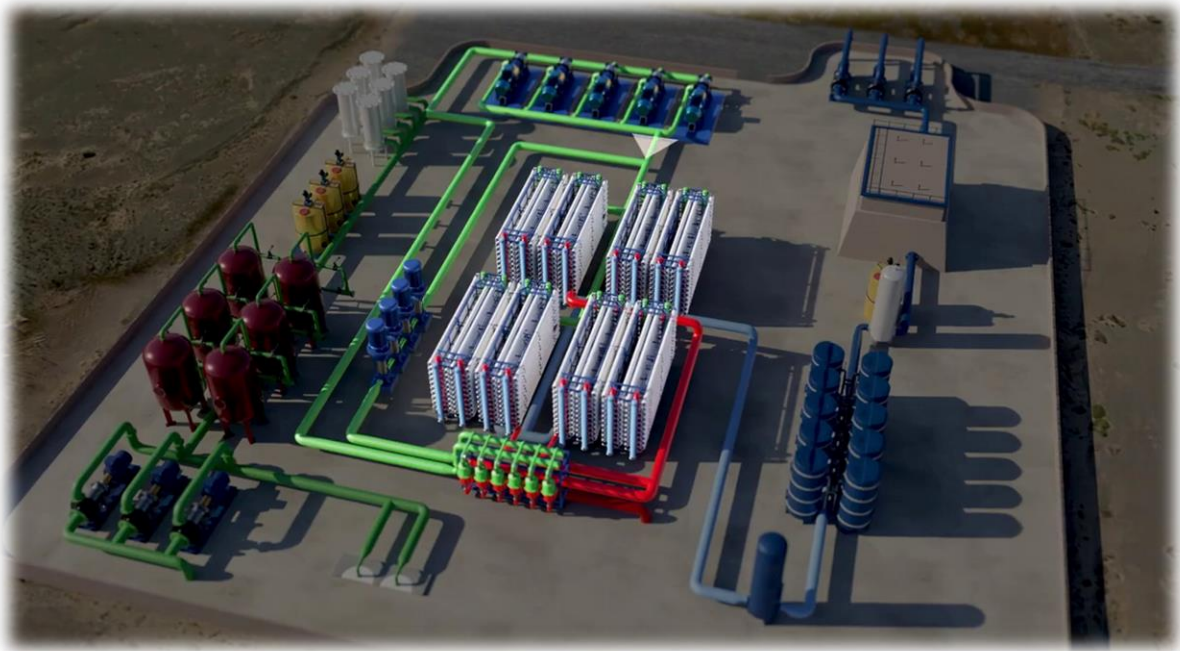


Figure I.19 : Rack d'osmose inverse [18].

Comme montré sur la Figure I.20.a, le système d'osmose inverse comprend une série de tuyaux de pression contenant généralement sept (7) membranes disposées en série.

Une pression osmotique élevée, typiquement entre 50 et 70 bars, est appliquée pour initier le processus. Sous cette pression, l'eau de mer est forcée à travers les membranes de manière tangentielle.

Environ 40 à 45 % de l'eau traverse la surface de la membrane (Figure I.20.b), formant le perméat, tandis que le reste, avec une concentration élevée en sels, il s'agit du concentrât.

Les membranes sélectives rejettent environ 99,98 % des sels présents dans l'eau de mer.

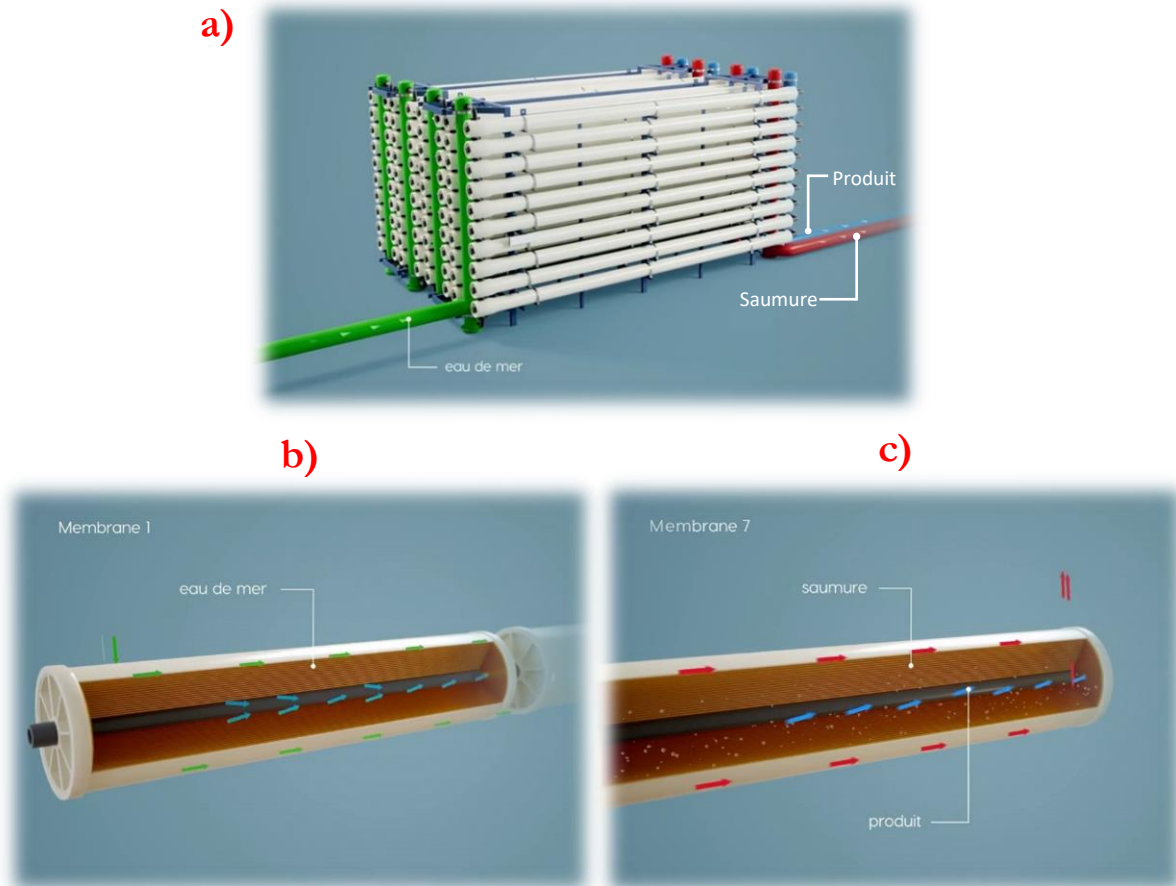


Figure I.20 : Modules membranaires [18].

Environ 60 % de l'eau de mer ne traverse pas les membranes et sort des tubes de pression avec une concentration élevée en sels, constituant la saumure, (Figure I.20.a et c). Cette saumure conserve une pression élevée qui peut être exploitée pour réduire la consommation énergétique du procédé de dessalement.

Différents dispositifs de récupération d'énergie existent, les plus courants étant les chambres isobares. Dans ces chambres, l'énergie potentielle de la saumure est transmise à un même volume d'eau de mer à dessaler, avec un rendement supérieur à 95 % (Figure I.21).

L'eau de mer sortant du récupérateur d'énergie n'a pas la même pression que l'eau de mer brute. Une pompe supplémentaire, appelée pompe booster, est nécessaire pour égaliser la pression des deux flux d'entrée dans les tubes de pression.

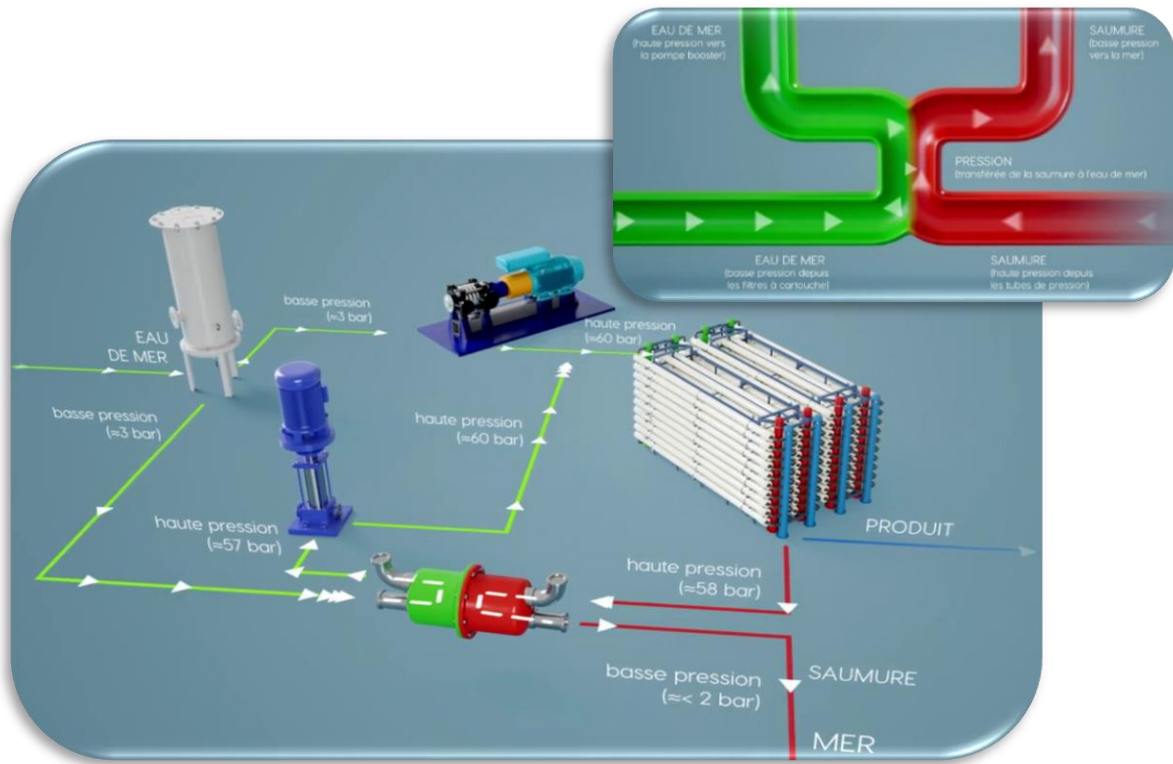


Figure I.21 : Procédé de dessalement [18].

Après avoir traversé les chambres isobares et transféré sa pression, la saumure sort de l'équipement à basse pression et est rejetée en mer avec des mécanismes garantissant sa correcte dilution et dispersion, (Figure I. 22).

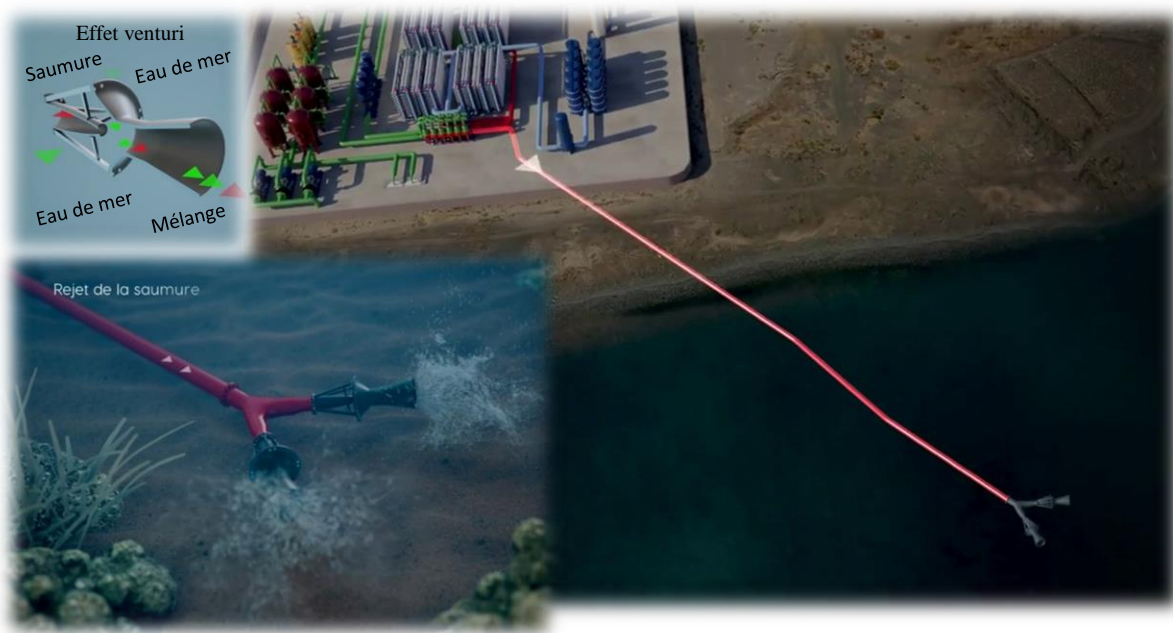


Figure I.22 : Rejet de la saumure [18].

I.4.4 Conception des systèmes de rejet de saumure

La conception adéquate des ouvrages de rejet est essentielle pour minimiser l'impact environnemental des rejets de saumure. Une conception inadéquate peut entraîner une concentration excessive de saumure dans certaines zones, nuisant aux écosystèmes marins locaux [19].

L'utilisation de diffuseurs multiports immergés et en mer est particulièrement efficace (Figure I.23.a, b et c). Ces diffuseurs permettent une dispersion uniforme de la saumure sur une grande surface, ce qui favorise son mélange avec l'eau de mer et réduit ainsi son impact sur l'environnement marin [19], tandis que les systèmes de rejet utilisant une seule buse (Figure I.23.d) peuvent provoquer des concentrations localisées d'eau salée, augmentant ainsi le risque de dommages aux écosystèmes marins dans cette zone particulière.

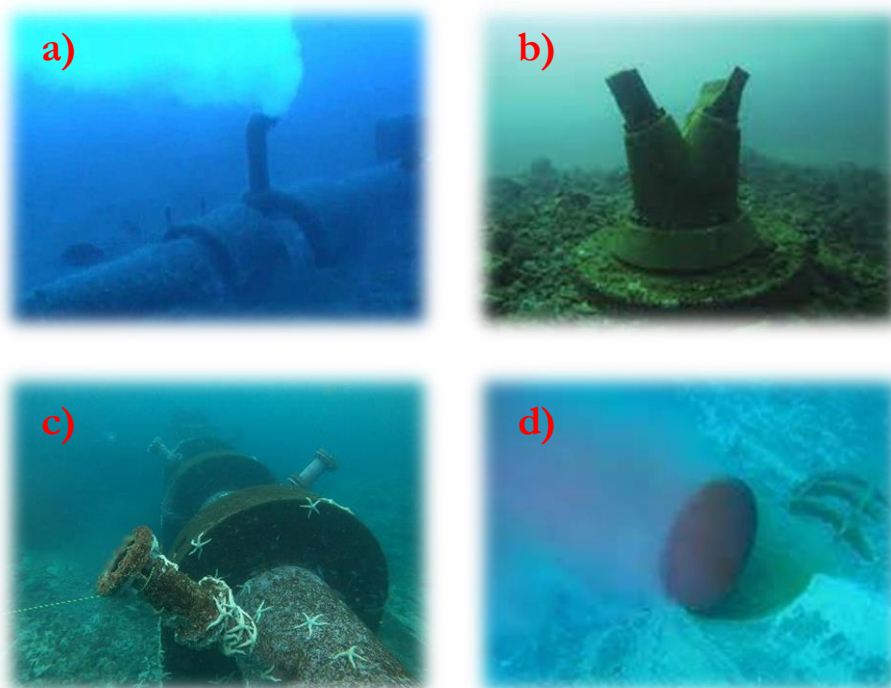


Figure I.23 : Diverses catégories de systèmes d'évacuation de saumure : a) Diffuseur unidirectionnel ; b) Diffuseurs à multi-buses avec valves à bec de canard ; c) Emissaire marin avec diffuseur multi-ports ; d) Emissaire marin avec un simple port (buse simple) [19].

I.4.5 Post-traitement, stockage et distribution

Le procédé de dessalement se termine par une étape de post-traitement. L'eau dessalée, bien que potable, est corrosive en raison de sa faible teneur en minéraux. Le post-traitement vise à reminéraliser l'eau pour stabiliser son pH et son alcalinité, augmenter sa teneur en calcium et autres minéraux essentiels pour la santé et réduire son caractère corrosif afin de protéger les infrastructures (Figure I.24).



Figure I.24 : Post-traitement [18].

Pour la reminéralisation de l'eau produite par le processus de dessalement, diverses techniques sont disponibles, parmi lesquelles l'injection de CO_2 est largement utilisée. Cette méthode, combinée à l'utilisation de lits de calcite, permet d'ajouter du carbonate de calcium à l'eau, ce qui ajuste son pH et augmente sa dureté et son alcalinité. Le carbonate de calcium, ajouté sous forme de calcite, réagit avec le CO_2 pour former du bicarbonate de calcium, contribuant ainsi à la reminéralisation de l'eau. Cette technique est essentielle pour rendre l'eau produite par le dessalement compatible avec les normes de qualité de l'eau potable et pour prévenir la corrosion des canalisations.

Après reminéralisation, l'eau destinée à la consommation humaine est chlorée dans les réservoirs de distribution pour respecter la législation sanitaire. Cette chloration permet de garantir la potabilité de l'eau en éliminant les bactéries et autres micro-organismes potentiellement pathogènes.

Conformément à la législation, l'eau distribuée est soumise à des contrôles analytiques rigoureux. Ces contrôles, réalisés par des laboratoires accrédités, permettent de vérifier que l'eau répond aux critères physicochimiques et microbiologiques définis par les normes en vigueur.

L'eau potable est ensuite distribuée aux usagers (ville, agriculture, industrie) via des réseaux hydrauliques et des systèmes de pompage.

I.5 Conclusion

Ce chapitre a pour but d'explorer les méthodes de dessalement de l'eau salée ou saumâtre, en mettant en avant la technologie de l'osmose inverse. Nous avons ensuite analysé le fonctionnement détaillé d'une usine de dessalement par osmose inverse, en décrivant les différentes phases du traitement de l'eau.

En guise de conclusion, le dessalement de l'eau de mer nécessite une compréhension approfondie des principes physiques et chimiques et une expertise technique pour garantir son efficacité, du prétraitement jusqu'au rejet.

Chapitre II

UTILISATION DE L'IMAGERIE
SATELLITE POUR ÉTUDIER LES
STATIONS DE DESSALEMENT D'EAU
DE MER

II.1 Introduction

Ce chapitre vise à utiliser l'imagerie satellite, pour étudier six stations de dessalement de l'eau de mer en Algérie.

II.2 État actuel du dessalement en Algérie

Face à la sécheresse chronique et à la pénurie d'eau qui affectent l'Algérie, le Ministère des ressources en eau a revisité sa stratégie nationale en matière d'eau. Pour répondre à ce défi, une solution solide a émergé avec l'adoption d'un programme ambitieux axé sur le dessalement de l'eau de mer. Ce programme a conduit au lancement de quinze méga-usines, avec des capacités de production allant de 100 000 à 500 000 m³/jour, privilégiant principalement la technologie de l'osmose inverse. Ces initiatives récentes ont propulsé le programme de dessalement algérien parmi les marchés à la croissance la plus rapide à l'échelle mondiale. Actuellement, quatorze usines de dessalement sont opérationnelles, dont le plus grand projet d'osmose inverse pour l'eau de mer en Algérie, doté d'une capacité totale de 2,2 millions de m³/jour. D'autres projets sont en cours de construction ou en phase de mise en service, illustrant l'ampleur et l'importance croissante du dessalement en Algérie [20].

Le Tableau II.1 et la Figure II.1 donnent un aperçu des usines de dessalement opérationnelles en Algérie, ainsi que d'autres détails.

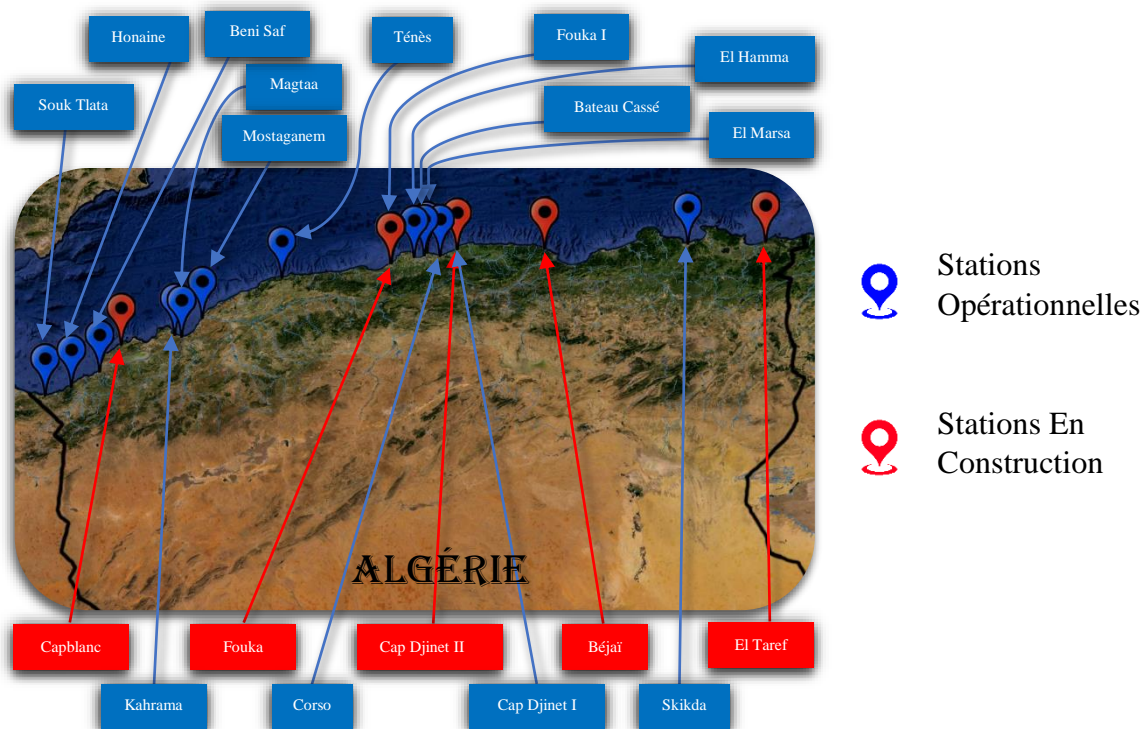


Figure II.1 : Répartition des usines de dessalement d'eau de mer sur le territoire national

[21].

La Figure II.1 révèle la répartition stratégique des usines de dessalement en Algérie, concentrées à hauteur de 70 % dans les régions ouest du pays. Ces régions sont les plus durement touchées par la sécheresse. 20 % desservent les zones centrales du pays, également touchées, mais à un degré moindre, tandis que les 10 % restants s'implantent dans l'est du pays, illustrant ainsi les efforts déployés pour mailler l'ensemble du territoire et contrer le manque d'eau.

<i>Station</i>	<i>Localisation</i>	<i>Procédé</i>	<i>Capacité de production [m³/jour]</i>	<i>Date de mise en service</i>
Ténès	Chlef	Osmose Inverse	200 000	Juin 2015
Souk Tlata	Tlemcen	Osmose Inverse	200 000	Avril 2011
Skikda	Skikda	Osmose Inverse	100 000	Mars 2009
Mostaganem	Mostaganem	Osmose Inverse	200 000	Mars 2020
Mactaa	Oran	Osmose Inverse	500 000	Juillet 2016
Kahrama	Oran	MSF	86 000	Novembre 2005
Honaïne	Tlemcen	Osmose Inverse	200 000	Juillet 2012
Fouka I	Tipaza	Osmose Inverse	120 000	Juillet 2011
El Marsa	Alger	Osmose Inverse	60 000	Juillet 2022
El Hamma	Alger	Osmose Inverse	200 000	Juillet 2008
Corso	Boumerdes	Osmose Inverse	80 000	Janvier 2023
Cap Djinet I	Boumerdes	Osmose Inverse	100 000	Juillet 2012
Beni Saf	Ain-Temouchent	Osmose Inverse	200 000	Mars 2010
Bateau Cassé	Alger	Osmose Inverse	10 000	Avril 2022
Fouka II	Tipaza	Osmose Inverse	300 000	En construction
El Taref	El Taref	Osmose Inverse	300 000	En construction
Cap Blanc	Oran	Osmose Inverse	300 000	En construction
Cap Djinet II	Boumerdes	Osmose Inverse	300 000	En construction
Tighremt	Béjaïa	Osmose Inverse	300 000	En construction

Tableau II.1 : Usines de dessalement de l'eau de mer en Algérie [20].

II.3 Motivation et objectifs

L'étude des rejets de saumure provenant des usines de dessalement de l'eau de mer revêt une importance croissante en raison de l'expansion de ces installations à travers le monde. Ces rejets, riches en sels et autres substances, peuvent avoir des impacts significatifs sur les écosystèmes marins environnants. Pour évaluer ces impacts, plusieurs approches méthodologiques peuvent être utilisées, telles que les modèles à échelle de longueur [22-23], les modèles intégraux [24-25], la mécanique des fluides numérique (CFD) [26-27] et l'imagerie satellite [28-29].

Les modèles à échelle de longueur et les modèles intégraux permettent de simuler les comportements des panaches de saumure sur des échelles variées, offrant une vision théorique précieuse. La CFD, quant à elle, fournit une analyse détaillée des mouvements des fluides et des interactions complexes dans l'eau, permettant de prédire la dispersion des saumures avec une grande précision.

Cependant, l'utilisation de l'imagerie satellite et des méthodes de télédétection se distingue par ses avantages uniques. Contrairement aux méthodes d'échantillonnage in situ, souvent coûteuses et limitées en couverture spatiale et temporelle, la télédétection permet une surveillance continue et à grande échelle des rejets de saumure. Cependant, l'analyse des images obtenues par télédétection nécessite plusieurs étapes : la collecte d'images, leur systématisation, et le post-traitement avec des algorithmes d'apprentissage automatique pour extraire des informations pertinentes [29].

Dans cette étude, l'objectif est d'étudier et de comparer plusieurs stations de dessalement en Algérie, notamment celles d'El Hamma, Fouka I, Cap Djinet I, Beni Saf, Tenes et Honaine, en utilisant les images satellites fournies par l'outil Google Earth Pro [21], afin de collecter des données visuelles sur ces stations. Nous mettrons en évidence les principales installations telles que l'admission de l'eau de mer, le prétraitement, le post-traitement et l'osmose inverse.

Une attention particulière sera portée à la mise en évidence des rejets de saumure dans la mer pour chaque station. Cette démarche nous permettra d'examiner non seulement les processus de traitement de l'eau de mer, mais également les impacts environnementaux des rejets associés, contribuant ainsi à une compréhension plus complète des opérations de dessalement et de leur interaction avec les écosystèmes marins.

II.4 Méthodologie

Pour cette investigation, nous allons suivre les étapes suivantes :

- Sélection des stations à étudier ;
- Utilisation d'un outil de télédétection ;
- Analyse des images, et le suivi de leur évolution au cours du temps.

II.4.1 Sélection des stations de dessalement

Pour sélectionner les stations de dessalement à étudier, nous avons pris en compte plusieurs critères, notamment la technologie utilisée (osmose inverse) et la capacité de production d'eau douce (200 000 m³/jour). Notre choix s'est porté sur les stations suivantes : El Hamma, Ténès, Beni Saf et Honaine. En complément de ces stations, nous avons ajouté les stations de Cap Djinet I et Fouka I, dont la capacité de production est d'environ 120 000 m³/jour.

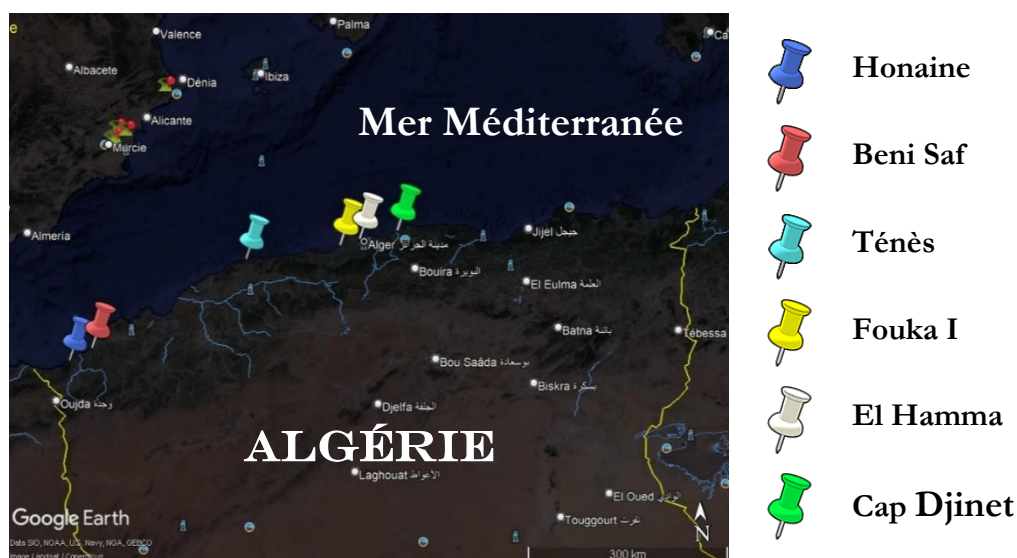


Figure II.2 : Stations de dessalement étudiées [21].

II.4.2 Utilisation de Google Earth Pro

Google Earth Pro [21] est l'outil privilégié pour l'analyse des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie dans le cadre de notre étude. Son accès libre aux images satellitaires haute résolution ainsi que ses fonctionnalités avancées, notamment la superposition d'images historiques, facilitent une investigation détaillée des caractéristiques des installations de dessalement. Malgré quelques limitations, telles que des lacunes temporaires dans la disponibilité des images, Google Earth Pro demeure un outil indispensable pour ce genre d'étude.

II.4.3 Analyse des images satellite

Les images satellite sont collectées pour la période allant de 02/02/2007 à 12/03/2024. Elles sont méticuleusement analysées en se focalisant sur la zone où se déverse la saumure. Pour une analyse encore plus précise, nous employons des techniques d'amélioration de la qualité de l'image, telles que l'ajustement du contraste et la détection des contours. Cette démarche nous permet d'obtenir des données visuelles plus détaillées pour une meilleure analyse.

II.5 Saumure de dessalement

La saumure de dessalement est un déchet liquide spécifique du processus de dessalement de l'eau de mer visant à produire de l'eau douce potable. Ce sous-produit est généralement plus dense et plus salin que l'eau de mer d'origine. Les méthodes de dessalement telles que l'osmose inverse produisent une saumure encore plus concentrée, avec une salinité variant de 50 à 75 grammes par litre, soit 3 à 5 fois plus que l'eau de mer normale. Le débit de saumure, représentant 70 à 55 % du débit d'eau de mer entrant dans l'usine de dessalement, peut avoir des conséquences écologiques importantes si son rejet direct dans l'environnement marin n'est pas assorti de mesures d'atténuation [30].

II.5.1 Méthodes de rejet à la mer du concentrât

Pour se débarrasser de la saumure produite par les usines de dessalement, différentes méthodes de rejet à la mer sont utilisées. Parmi les méthodes courantes, on trouve :

Le rejet à la côte au moyen d'un canal : Cette méthode implique de laisser couler la saumure dans un canal qui se déverse directement dans la mer (Figure II.3.a). Les canaux peuvent être construits en béton ou enrochements, avec des dispositifs de protection contre les débris flottants [31].

Le rejet au large au moyen d'un émissaire : La saumure est rejetée en mer via une galerie sous-marine ou un émissaire, généralement enfoui dans la zone de déferlement, puis posé au fond de la mer (Figure II.3.b). Les extrémités des émissaires peuvent être équipées de diffuseurs pour limiter l'impact sur la faune marine [31].

Le rejet par infiltration sous la mer : Cette méthode implique l'infiltration de la saumure dans le sol marin [31], évitant ainsi son rejet direct dans la colonne d'eau.

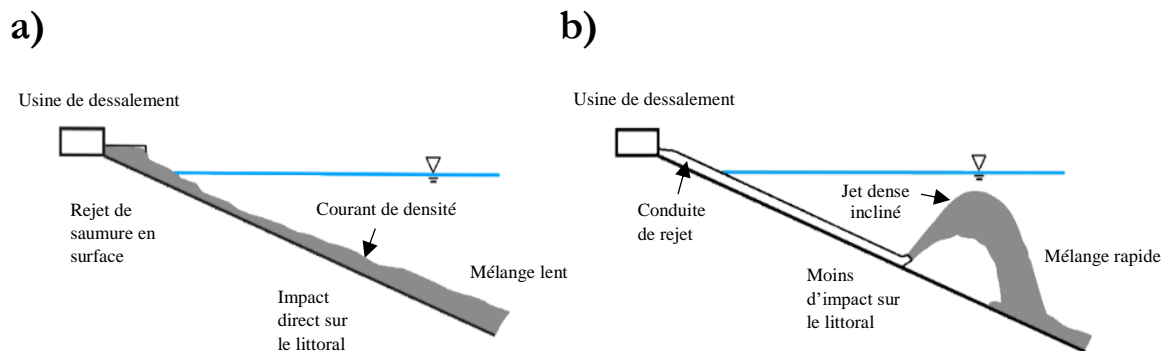


Figure II.3 : Stratégies de rejet pour les effluents à flottation négative : a) Rejet littoral via un canal ou un déversoir ; b) Rejet immergé via une canalisation et une buse ou un diffuseur (modifié d'après [32]).

Ces différentes méthodes de rejet en mer sont choisies en fonction de critères environnementaux et économiques, mais toutes visent à minimiser l'impact environnemental de la saumure rejetée. Les émissaires sous-marins sont notamment conçus pour favoriser le mélange de la saumure avec l'eau de mer environnante, réduisant ainsi son impact sur les écosystèmes marins.

II.5.2 Comportement de la saumure dans les eaux de mer

L'analyse du comportement de la saumure rejetée en mer est d'une importance capitale pour évaluer son impact environnemental et élaborer des stratégies de gestion efficaces. Cette analyse s'articule généralement autour de deux zones distinctes : le champ proche et le champ lointain du rejet.

Champ proche : Cette région est située à proximité immédiate du point de rejet de la saumure. Le comportement de la saumure dans cette zone est caractérisé par un mélange initial intense, influencé par la configuration de l'émissaire et les propriétés de l'effluent ainsi que par les conditions environnementales locales. Les taux de dilution sont généralement élevés dans cette région en raison des effets de turbulence créés par les différences de vitesse entre le jet de saumure et l'eau environnante. Les caractéristiques d'écoulement et de mélange dans cette région sont dominées par des échelles spatiales et temporelles relativement petites, ce qui favorise un mélange rapide de la saumure avec l'eau de mer [33].

Champ lointain : À mesure que la saumure se déplace loin du point de rejet, elle entre dans la région du champ lointain. Dans cette zone, la saumure se transforme en un courant gravitationnel qui s'écoule vers le fond marin. Le mélange dans cette région est principalement influencé par les conditions environnementales telles que la bathymétrie, les courants marins et les vagues, ainsi que par les différences de densité entre la saumure et l'eau environnante. Contrairement au champ proche, les taux de dilution dans le champ lointain sont généralement beaucoup plus faibles, car le mélange est principalement contrôlé par des échelles spatiales et temporelles plus grandes [33].

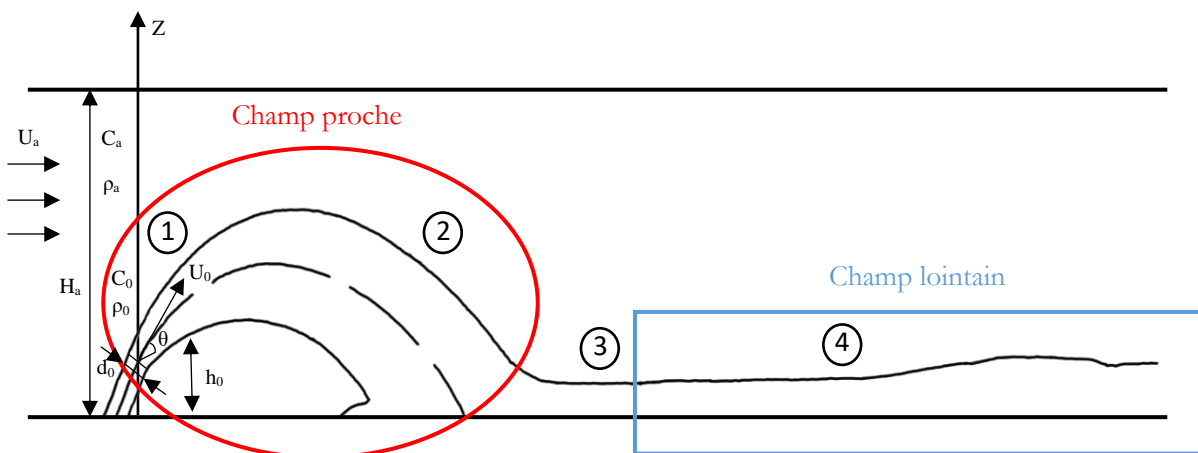


Figure II.4 : Régions de champ proche et lointain dans une décharge de jet
(modifié d'après [33])

La Figure II.4 montre un schéma des différentes zones de comportement d'un rejet de jet de saumure :

- ① trajectoire ascendante du jet : le jet incliné est déchargé avec une certaine vitesse, donc l'élan (impulsion) influence de manière significative sa trajectoire ascendante opposée à la force de gravité. À une certaine distance du point de rejet, la force de poussée (poids) est égale à l'élan et le jet atteint sa hauteur maximale. À partir de ce point, la flottabilité est la force dominante et ② le jet descend jusqu'à heurter le fond, où il subit une dilution supplémentaire due aux phénomènes de turbulence et de dilatation de l'écoulement. La région située entre la zone d'impact inférieure et la région du champ lointain ③ est une zone de transition dans laquelle l'écoulement se comporte comme une « couche d'étalement ». Dans la région du champ lointain, la saumure se comporte comme un courant gravitationnel ④ [33].

II.5.3 Paramètres affectant un rejet de saumure

La gestion des rejets de saumure des usines de dessalement d'eau de mer est influencée par divers paramètres qui déterminent le comportement et l'impact de la saumure dans l'environnement marin. Parmi ces paramètres, deux des plus significatifs sont l'effet de flottabilité et l'influence des courants marins.

Effets de flottabilité : L'effet de flottabilité joue un rôle crucial dans le comportement de la saumure rejetée dans les eaux de mer. La saumure, en raison de sa concentration en sels dissous, est généralement plus dense que l'eau de mer environnante. Cependant, cette différence de densité peut varier en fonction de la salinité et de la température de l'eau. Lorsque la saumure est rejetée, elle tend à descendre en raison de sa densité plus élevée, mais elle peut également être soumise à des forces ascensionnelles, en particulier si elle est émise avec une certaine vitesse. Cette interaction complexe entre la densité de la saumure et les forces de flottabilité influence la trajectoire et la dispersion de la saumure dans les eaux de mer, ce qui a des implications directes sur son impact environnemental [34].

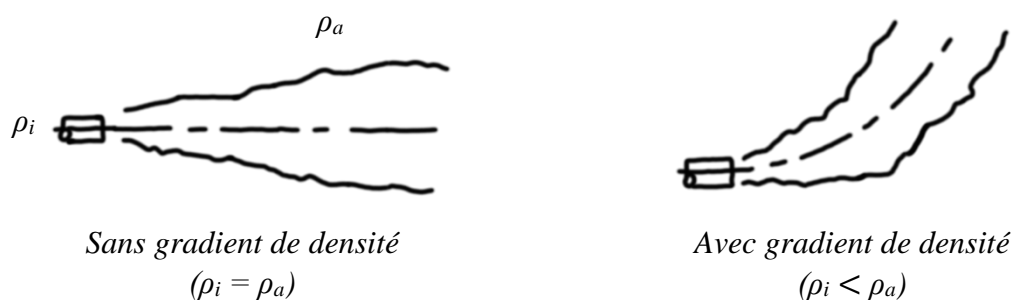


Figure II.5 : L'effet de flottabilité (modifié d'après [34]).

Effet des courants marins : Les courants marins ont un impact significatif sur le comportement et la dispersion de la saumure rejetée. Les mouvements naturels de l'eau, tels que les courants de marée et les courants océaniques, peuvent modifier la trajectoire et la distribution de la saumure dans l'environnement marin. Par exemple, des courants forts peuvent entraîner une dispersion plus rapide de la saumure, tandis que des courants plus faibles peuvent favoriser l'accumulation de saumure dans des zones spécifiques. De plus, les courants transversaux peuvent influencer la direction et l'étendue du mélange initial de la saumure avec l'eau de mer environnante, ce qui affecte finalement sa dilution et sa répartition dans le milieu marin [34].

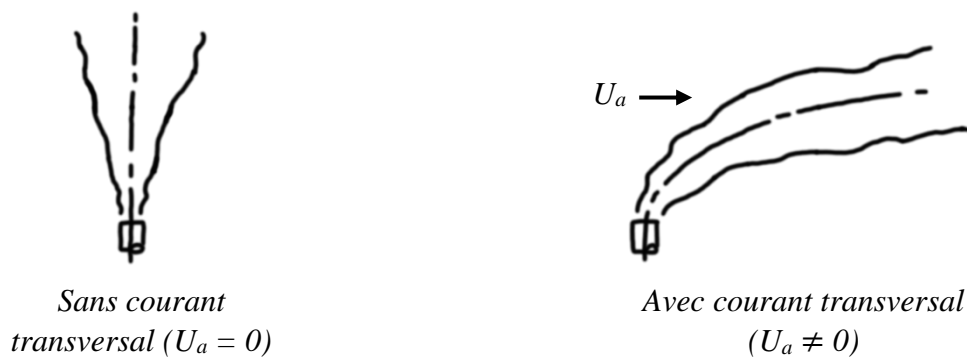


Figure II.6 : L'effet du courant (modifié d'après [34]).

II.6 Présentation des stations de dessalement étudiées

II.6.1 Station de dessalement d'El Hamma

La station de dessalement d'eau de mer d'El Hamma, érigée sur le site « Les Sablettes » à Hussein-dey, Belouizdad, Alger, représente un investissement majeur de 257 millions de dollars. Avec une capacité de production impressionnante de 200 000 m³/jour, cette station utilise le procédé d'osmose inverse avec échangeur d'énergie. Sa construction, réalisée en 26 mois, a mobilisé des entreprises renommées telles qu'Orascom Construction Industries Algeria (OCIA) et Besix LLC [35].

Les détails techniques de la station sont à trouver sur le Tableau II.2, tandis que la Figure II.7 montre les différentes parties de la station de dessalement d'El Hamma.

Localisation	El Hamma, Alger, Algérie, 36°45'04.88"N 3°04'46.57"E
Production	200 000 m ³ /jour
Partenariat	Ge Ionics (70%), AEC (30%)
Technique	Osмосe inverse
Émissaire de captation	550 m de longueur, 10 m de profondeur
Émissaire de rejet de saumure	258 m de longueur, 8 m de profondeur, diamètre de 1,6 m avec une buse de sortie sans diffuseur

Tableau II.2 : Caractéristiques techniques de la station de dessalement d'El Hamma [21-28-35].

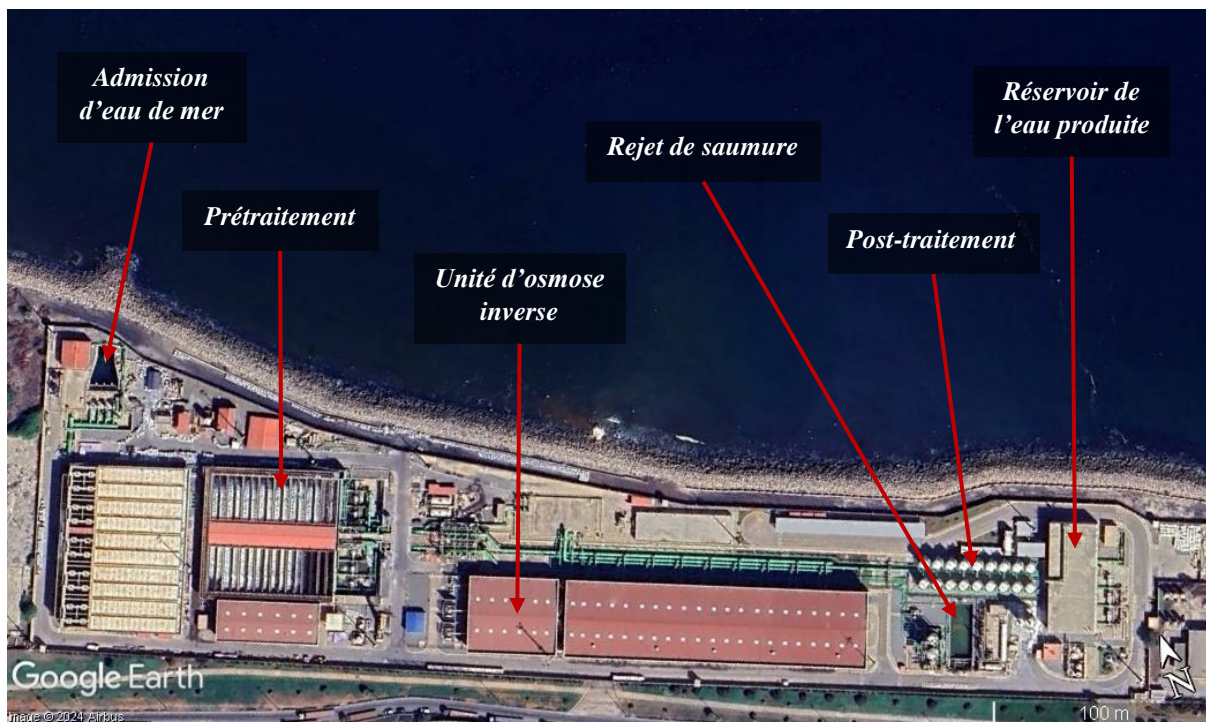


Figure II.7 : Image satellite de la station de dessalement d'El Hamma le (30/09/2023) [21].

II.6.2 Station de dessalement de Ténès

L'usine de dessalement d'eau de mer de Ténès, implantée dans la wilaya de Chlef, représente un pilier essentiel de l'approvisionnement en eau potable de la région. Nichée à l'entrée ouest de la ville de Ténès, cet établissement s'étend sur une superficie de 8 hectares, bénéficiant d'un emplacement stratégique le long du littoral méditerranéen. Avec une capacité de production impressionnante de 200 000 m³/jour, cette station de dessalement utilise la technologie d'osmose inverse pour fournir de l'eau potable de qualité. Opérant avec un débit maximal de captage de 540 000 m³/jour, cette infrastructure est le fruit d'un partenariat solide entre "SONATRACH" et "SONELGAZ", ainsi que l'entreprise espagnole "ABENGOA". Son rôle crucial dans l'assurance d'un approvisionnement en eau fiable pour la région témoigne de son importance stratégique pour la communauté locale [20,36].

Les détails techniques de la station sont à trouver sur le Tableau II.3, tandis que la Figure II.8 montre les différentes parties de la station de dessalement de Ténès.

Localisation	Ténès, Chlef, Algérie, 36°30'20.50"N 1°13'34.97"E
Production	200 000 m ³ /jour
Partenariat	Sonatrach, Sonelgaz (49%), Abengoa (51%)
Technique	Osmose inverse
Émissaire de captation	600 m de longueur, 10 m de profondeur, diamètre de 1800 mm
Émissaire de rejet de saumure	200 m de longueur, 5 m de profondeur avec diffuseur multi-port système double alternative

Tableau II.3 : Caractéristiques techniques de la station de dessalement de Ténès [20-21-36].

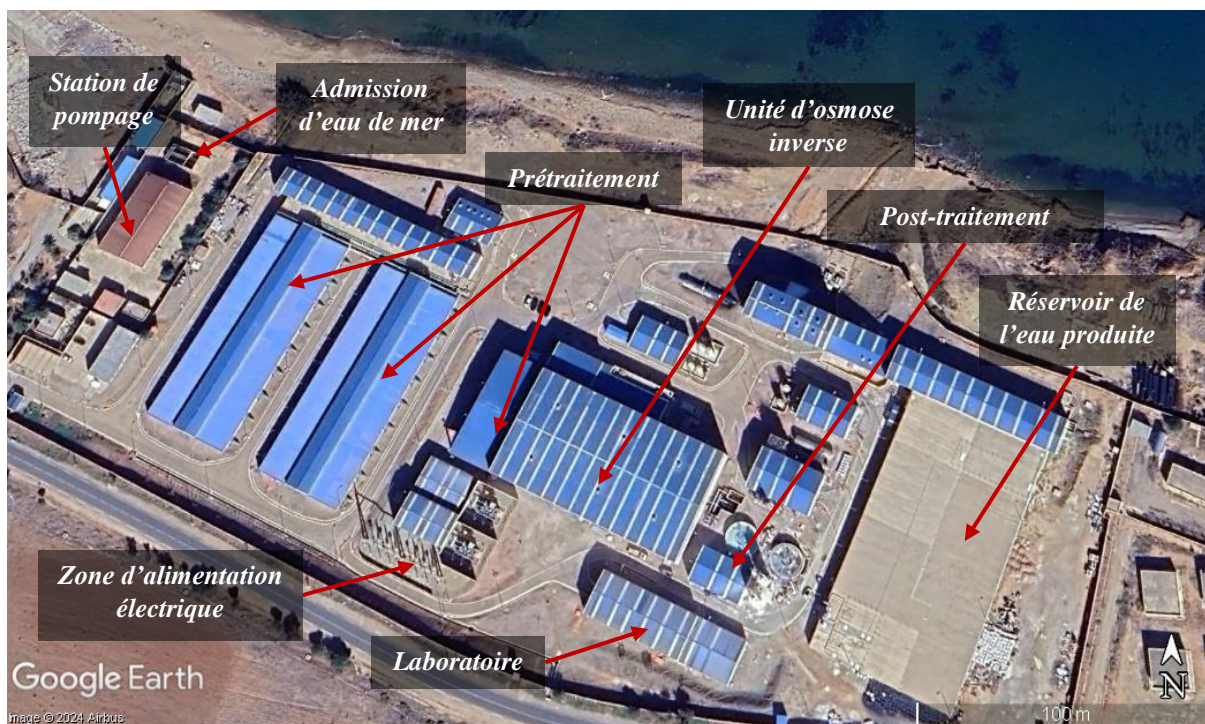


Figure II.8 : Image satellite de la station de dessalement de Ténès le (27/10/2022) [21].

II.6.3 Station de dessalement de Honaine

L'usine de dessalement d'eau de mer de Honaine, située dans la Zone d'Extension Touristique Tafsout (ZET) de la commune éponyme, représente un maillon crucial de l'approvisionnement en eau potable de la région. Implantée à 64 kilomètres du chef-lieu de la wilaya de Tlemcen, cette infrastructure jouxte les rives méditerranéennes, offrant un accès direct à la source d'eau salée. Occupant une superficie de 58 485 hectares, cet établissement utilise la technologie d'osmose inverse pour produire jusqu'à 200 000 m³/jour, répondant ainsi aux besoins croissants de la population locale. Gérée par le consortium espagnol GEIDA, en partenariat avec l'Algérienne de l'Énergie (AEC), cette usine met en œuvre des pratiques de traitement biologique et physique avancées pour garantir la qualité de l'eau produite. Avec un taux de récupération d'énergie remarquable de 97 %, cette installation illustre l'engagement envers l'efficacité énergétique et la durabilité environnementale [37-38].

Les détails techniques de la station sont à trouver sur le Tableau II.4, tandis que la Figure II.9 montre les différentes parties de la station de dessalement de Honaine.

<i>Localisation</i>	Honaine, Tlemcen, Algérie, 35°10'48.09"N 1°38'41.28"O
<i>Production</i>	200 000 m ³ /jour
<i>Partenariat</i>	GEIDA (51%), AEC (49%)
<i>Technique</i>	Osmose inverse
<i>Émissaire de captation</i>	1200 m de longueur, 9 m de profondeur, diamètre de 1800 mm
<i>Émissaire de rejet de saumure</i>	480 m de longueur

Tableau II.4 : Caractéristiques techniques de la station de dessalement de Honaine

[21-37-38].

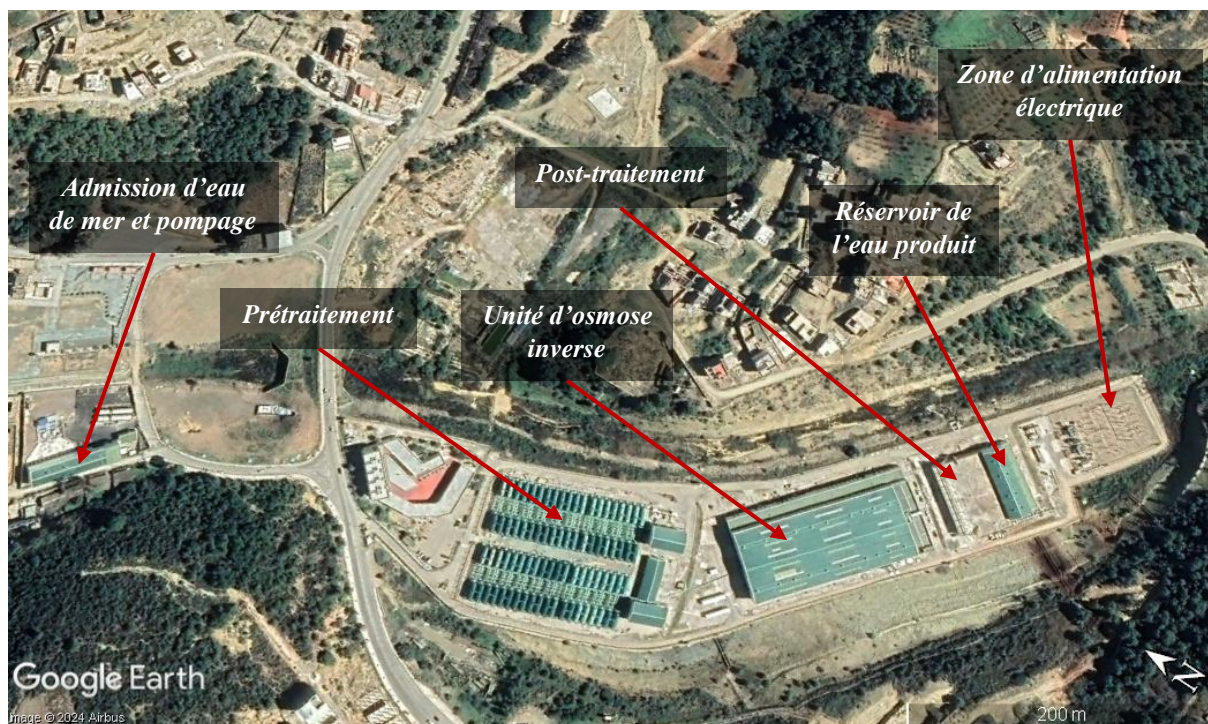


Figure II.9 : Image satellite de la station de dessalement de Honaine le (14/03/2023) [21].

II.6.4 Station de dessalement de Beni Saf

La BENISAF WATER COMPANY SPA, première station de dessalement d'eau de mer en Algérie à intégrer des énergies renouvelables dans ses processus, joue un rôle crucial dans l'approvisionnement en eau potable de la région ouest du pays. Dotée d'une capacité de production de 200 000 m³/jour, elle assure l'approvisionnement en eau de plus de 950 000 habitants, soit une allocation de 210 litres par habitant par jour. Avec 100 000 m³ quotidiens alloués à Oran et autant à Ain Témouchent, cette station libère les eaux de surface pour l'irrigation, réduisant ainsi la surexploitation des eaux souterraines. De plus, elle contribue au traitement des eaux usées dans la région d'Ain Témouchent, permettant la récupération de 13 millions de m³ d'eau pour l'irrigation de 1300 hectares de terres agricoles. Depuis sa mise en service en novembre 2009, la station de Beni Saf s'engage à produire une eau de qualité constante, tout en minimisant les coûts humains, économiques et environnementaux.

Cette démarche qualité se traduit par l'installation de membranes à osmose inverse de dernière génération, permettant une augmentation du rendement de 10 %, ainsi que par des efforts constants en matière d'efficacité énergétique, notamment grâce à l'installation de variateurs de vitesse pour réduire la consommation énergétique et l'empreinte carbone de la station. La BENISAF WATER COMPANY SPA est le fruit d'une joint-venture entre GEIDA BENI SAF SL du groupe (ACS) et (AEC), dans le cadre des investissements directs étrangers (IDE) [39].

Les détails techniques de la station sont à trouver sur le Tableau II.5, tandis que la Figure II.10 montre les différentes parties de la station de dessalement de Beni Saf.

Localisation	Beni-Saf, Ain Témouchent, Algérie, 35°21'39.48"N 1°15'55.21"O
Production	200 000 m ³ /jour
Partenariat	UTE DESALADORA BENI SAF CONSTRUCCION, GEIDA, AEC
Technique	Osmose inverse
Émissaire de captation	1 km de longueur, 18 m de profondeur, diamètre de 2400 mm
Émissaire de rejet de saumure	500 m de longueur, buse de sortie (mono-port) de diamètre de 1800 mm

Tableau II.5 : Caractéristiques techniques de la station de dessalement de Beni Saf

[21,28,39].

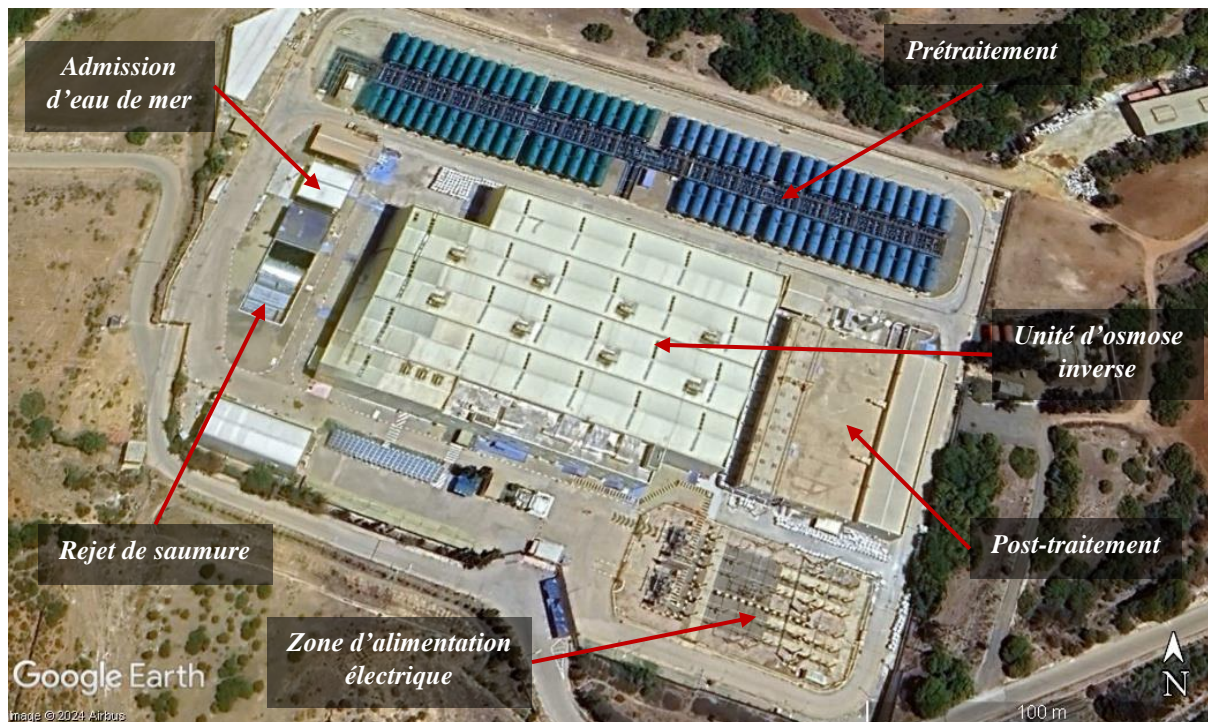


Figure II.10 : Image satellite de la station de dessalement de Beni Saf le (02/07/2023) [21].

II.6.5 Station de dessalement de Fouka I

La station de dessalement d'eau de mer de Fouka I, localisée dans la wilaya de Tipaza, représente un pilier essentiel de l'approvisionnement en eau potable de la région. Érigée à la sortie de la ville de Douaouda, elle occupe une superficie de 4 hectares, avec une infrastructure impressionnante s'étendant sur 300 mètres de longueur et une largeur atteignant jusqu'à 150 mètres. Opérationnelle depuis juillet 2011, cette station est construite par les filières de COSIDER et Sonatrach, avec le soutien de la société nationale de génie civil et bâtiment (GCB), gérée par MYAH TIPAZA SPA. Elle assure une production quotidienne de 120 000 m³/jour d'eau potable grâce à la technologie d'osmose inverse avec 9072 membranes. Son rôle crucial dans la sécurisation de l'approvisionnement en eau potable pour l'ouest de la wilaya d'Alger et l'est de la wilaya de Tipaza témoigne de son importance stratégique. Son partenariat avec des acteurs nationaux et internationaux assure une exploitation efficiente et pérenne de cette infrastructure vitale pour la région [40,41].

Les détails techniques de la station sont à trouver sur le Tableau II.6, tandis que la Figure II.11 montre les différentes parties de la station de dessalement de Beni Saf.

Localisation	Fouka, Tipaza, Algérie, 36°40'43.18"N 2°45'36.37"E
Production	120 000 m ³ /jour
Partenariat	Myah Tipaza SPA, consortium GEIDA, AEC, SNG-Lavalin Internacional Espana S.A.U, Assiona Agua S.A.U
Technique	Osmose inverse
Émissaire de captation	1800 m de longueur, 15 m de profondeur, diamètre de 1600 mm
Émissaire de rejet de saumure	370 m de longueur, 7 m de profondeur, buse de sortie (mono-port) de 1,4 m de diamètre

Tableau II.6 : Caractéristiques techniques de la station de dessalement de Fouka I [21,40,41].

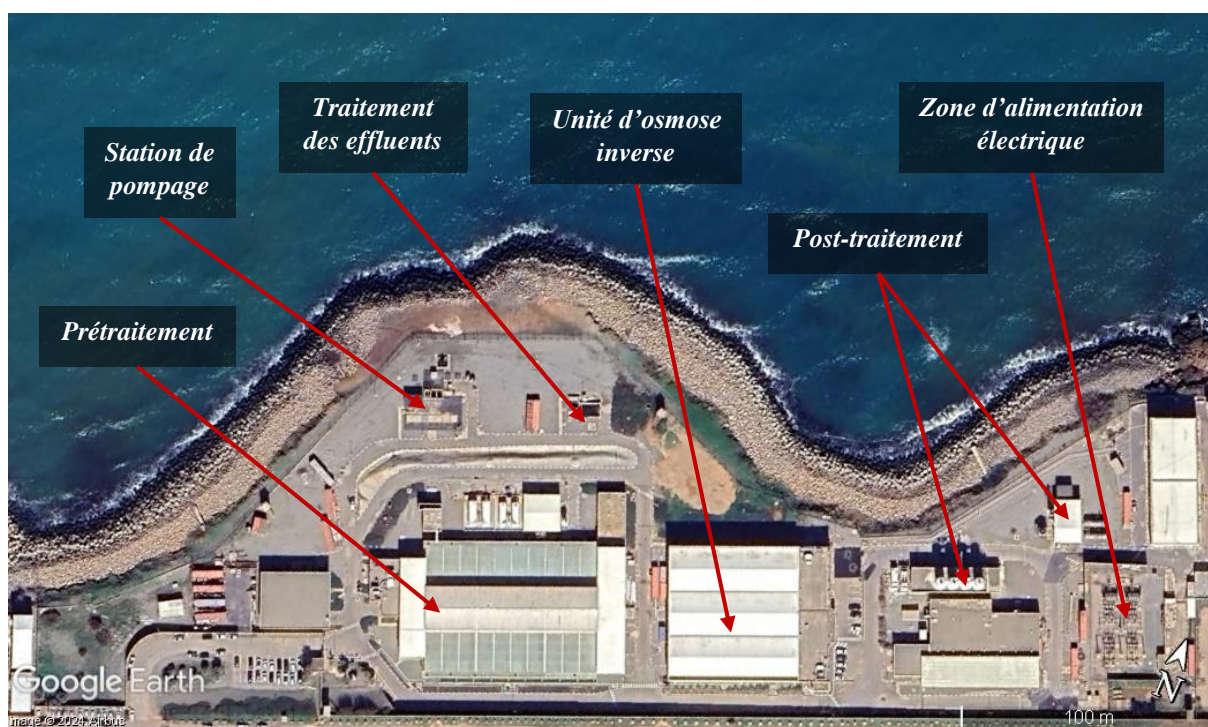


Figure II.11 : Image satellite de la station de dessalement de Fouka I le (12/03/2024) [21].

II.6.6 Station de dessalement de Cap Djinet I

La station de dessalement de Cap Djinet I, située à 45 km à l'est d'Alger, représente un investissement majeur de 133 millions de dollars. Avec une capacité de production de 100 000 m³/jour grâce à la technique d'osmose inverse avec un système de récupération d'énergie PX depuis août 2012, elle assure l'approvisionnement en eau potable d'environ 400 000 habitants dans la région de Boumerdes. La société Sonatrach et Sonelgaz détiennent conjointement 49 % des parts, tandis que deux entreprises espagnoles, INIMA et AQUALIA, détiennent chacune 25,50 %. Son processus de dessalement par osmose inverse est soutenu par 8 512 membranes et un système de récupération d'énergie PX, assurant ainsi une production constante et efficace [20].

Les détails techniques de la station sont à trouver sur le Tableau II.7, tandis que la Figure II.12 montre les différentes parties de la station de dessalement de la station de Cap Djinet I.

<i>Localisation</i>	Cap Djinet, Boumerdes, Algérie, 36°50'41.67"N 3°41'24.32"E
<i>Production</i>	100 000 m ³ /jour
<i>Partenariat</i>	Sonatrach, Sonelgaz (49%), INIMA (25,50%), Aqualia (25,50 %)
<i>Technique</i>	Osmose inverse
<i>Émissaire de captation</i>	1,8 km de longueur, 20 m de profondeur, diamètre de 1800 mm
<i>Émissaire de rejet de saumure</i>	1,2 km de longueur, 8 m de profondeur, buse de sortie (multiport) de diamètre de 1200 mm

Tableau II.7 : Caractéristiques techniques de la station de dessalement de Cap Djinet I [20,21].

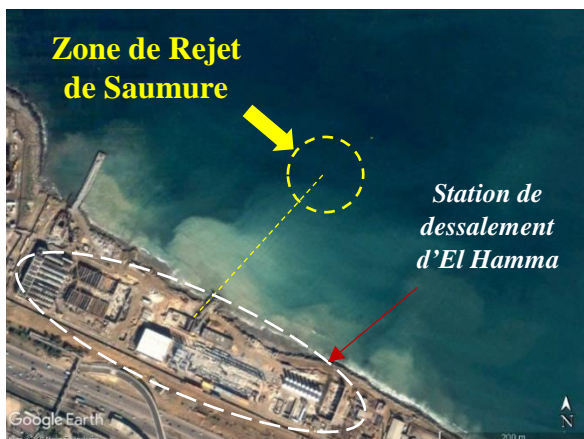


Figure II.12 : Image satellite de la station de dessalement de Cap Djinet I le (30/09/2023) [21].

II.7 Analyse comparative des stations de dessalement

Afin d'effectuer une première comparaison entre les stations, nous avons exploité l'outil des archives d'images de Google Earth Pro [21] pour représenter visuellement les installations lors de leur construction et leurs détails.

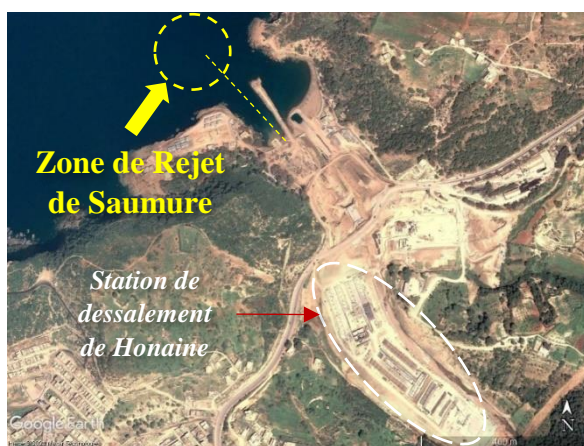
La Figure II.13 montre des images satellites des stations de dessalement en cours de construction, indiquant les lieux prévus pour le rejet de la saumure, tandis que la Figure II.14 représente des images satellites des stations de dessalement en cours d'exploitation.



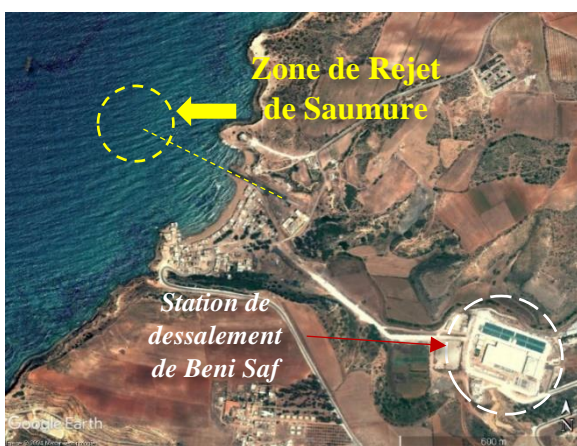
El Hamma en construction (02/02/2007)



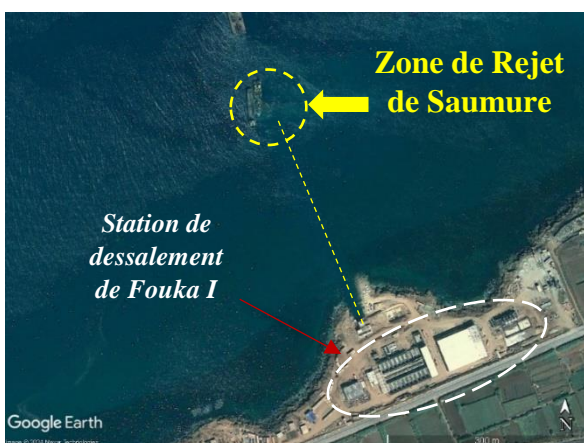
Ténès en construction (31/03/2014)



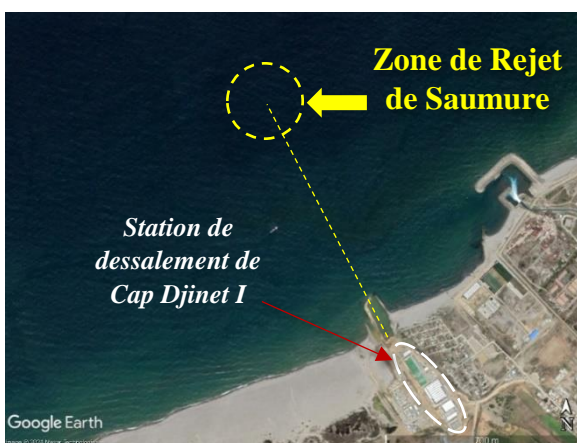
Honaine en construction (26/03/2009)



Beni Saf en construction (22/06/2009)



Fouka I en construction (04/09/2009)



Cap Djinet I en construction (26/05/2011)

Figure II.13 : Images satellites des stations de dessalement en cours de construction avec point de rejet de saumure [21].

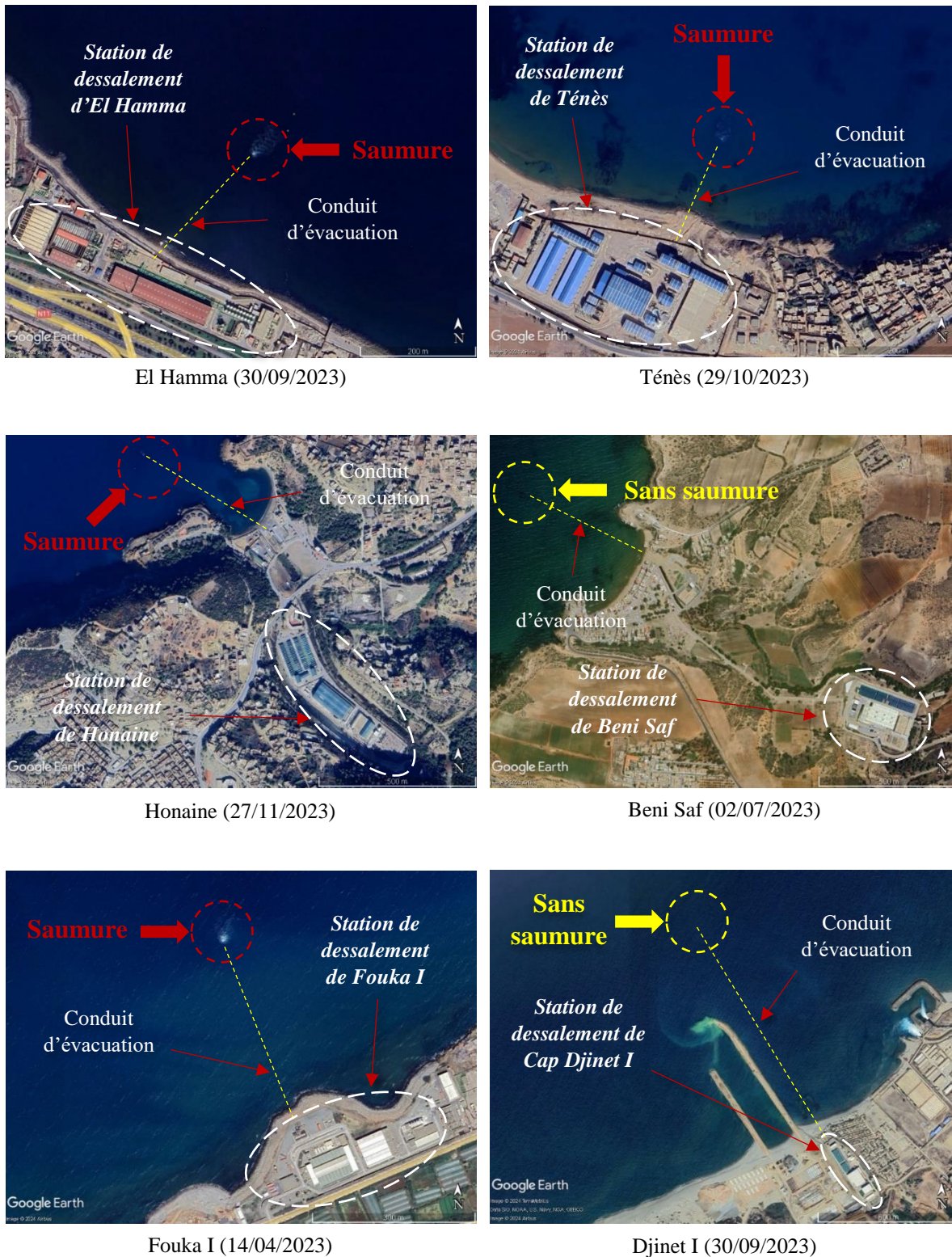


Figure II.14 : Images satellites des stations de dessalement en opération [21].

D'après les Figures II.13 et II.14, on remarque que la conception et l'emplacement des installations diffèrent, certaines se situent juste à côté du rivage, tandis que d'autres sont positionnées un peu plus loin de la côte. On peut aussi remarquer que la surface qu'occupe chaque station est différente des autres (Figure II.15). Par exemple, la surface de la station d'El Hamma est de 50 000 m², et celle de Honaine est de 71 000 m².

Superficie (m²)

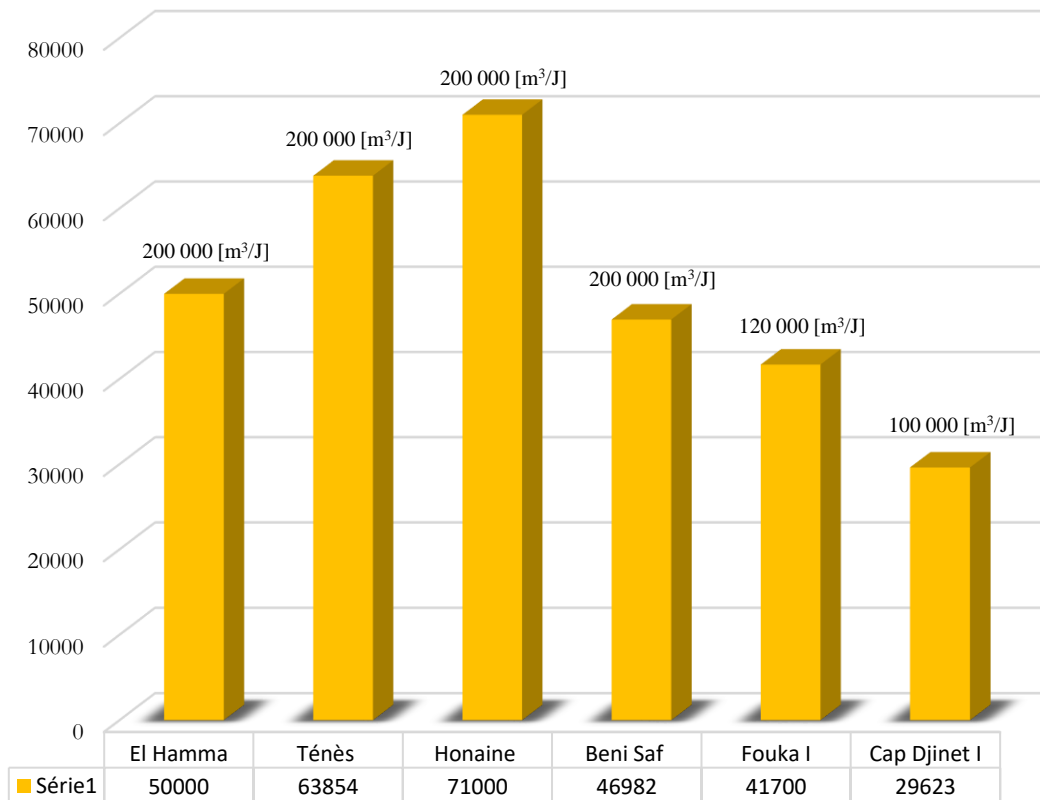


Figure II.15 : *Superficie des stations de dessalement.*

Cette différence peut être attribuée à plusieurs facteurs comme la capacité de production. En effet, les stations de Fouka I et celle de Cap Djinet I ont une même superficie en raison de leur capacité de production presque identique (~ 120 000 m³/jour) ; en revanche, la station de Honaine possède une superficie plus grande que celles de Beni Saf, Ténès et El Hamma, même si leur capacité de production est similaire. Aussi, cette différence est due à l'emplacement des stations, car celles qui se situent en ville (El Hamma) disposent de moins d'espace que celles qui sont dans des régions éloignées des villes.

Il est noté que les observations satellitaires (Figures II.13 et II.14) mettent en évidence la présence d'une perturbation à la surface de l'eau, au niveau de la zone où les rejets des stations El Hamma, Ténès, Honaine et Fouka I se déversent. En effet, on constate la présence d'une interaction entre le jet de la saumure et la surface de l'eau qui est visible sur les images satellites [29,42,43].

Pour examiner de près le phénomène observé à la surface de l'eau, nous suivons de près la zone de rejet des stations Ténès et d'El Hamma.

La Figure II.16 met en évidence la zone du champ proche où la saumure est rejetée. Une interaction entre le jet de saumure et la surface de l'eau est clairement visible. La Figure II.16.a, datée du 28 octobre 2020, illustre les contours de l'interaction lorsque la mer est calme, tandis que la Figure II.16.b datant du 26 février 2020 montre les contours de l'interaction en conditions de mer agitée.

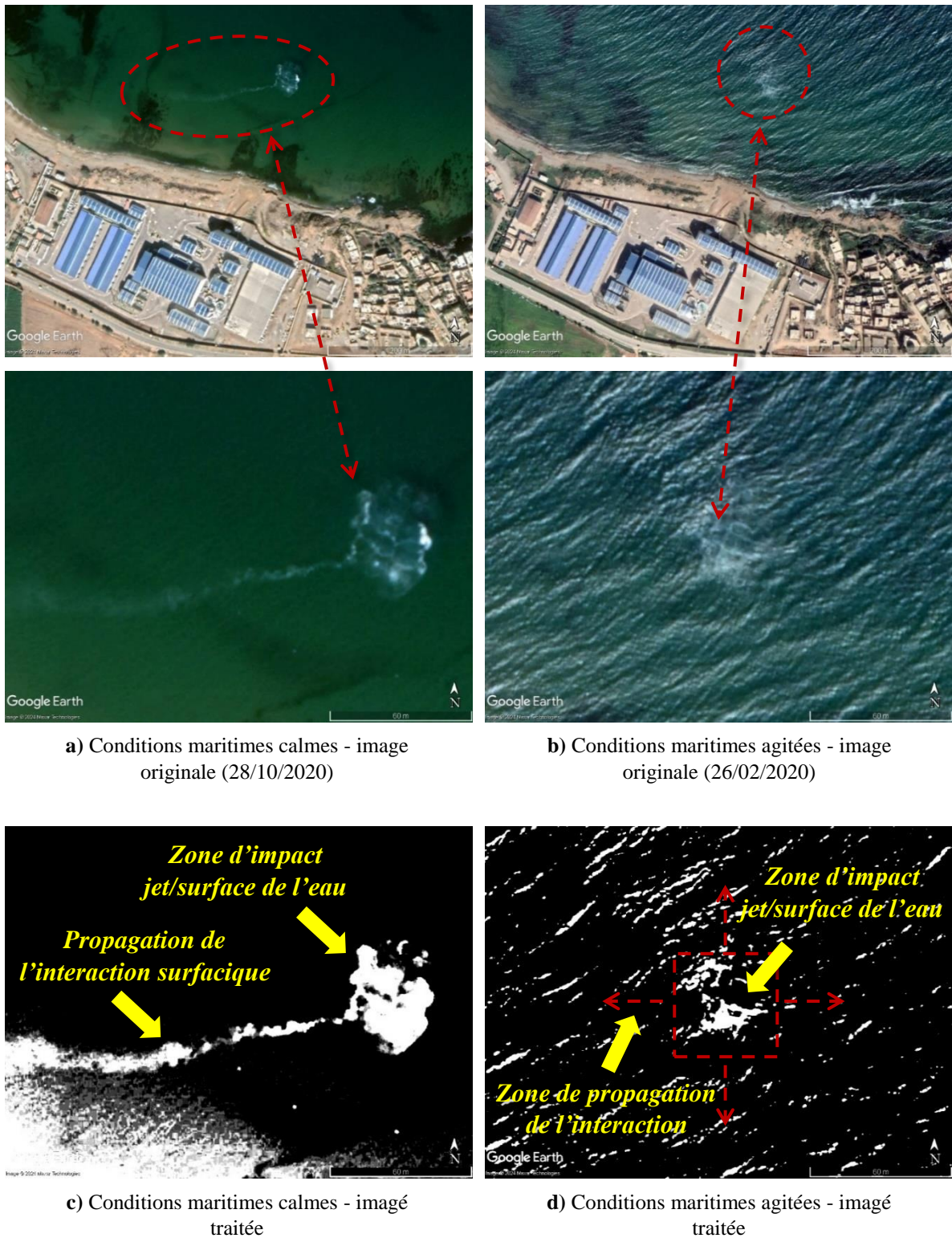


Figure II.16 : Analyse de la dispersion de la saumure à la station de dessalement de Ténès sous différents régimes de vent et de mer [21]

Nous notons que la zone d'interaction est plus étendue lorsque la mer est calme, en accord avec des observations antérieures [44]. Cela démontre le rôle positif d'une mer agitée dans l'augmentation de la dispersion et du mélange de la saumure dans l'eau de mer, favorisant ainsi une dilution plus rapide et une réduction potentielle de son impact sur l'environnement marin.

L'utilisation d'un traitement d'image (Figure II.16.c) montre clairement qu'une partie du panache de saumure s'est détachée et a été transportée passivement en direction sud-est. Cette observation suggère probablement un phénomène de sédimentation ou de matières en suspension, telles que des biocides, des antitartres, des inhibiteurs et autres, qui se sont mélangés à la saumure [45].

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser à suivre l'évolution de l'interaction entre le jet de saumure et la surface de l'eau (ou bien le panache) pour le cas de la station d'El Hamma et la Figure II.17 montre des images satellites traitées prises entre le 9 janvier 2015 et le 13 décembre 2015.

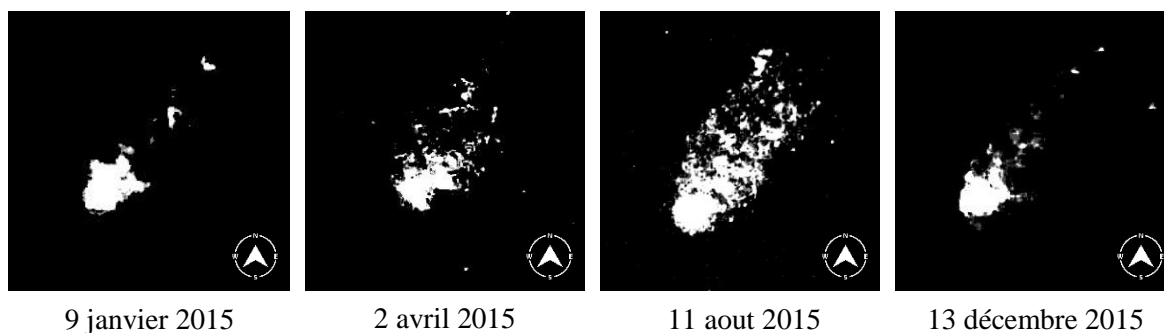


Figure II.17 : Évolution temporelle de l'interaction de jet sur la surface de l'eau de la station de dessalement d'El Hamma en 2015 [21].

Depuis ces images satellites, nous pouvons interpréter le comportement de l'interaction entre le jet de la saumure et la surface de l'eau. Nous pouvons comprendre que le jet provenant de la station sort depuis une buse simple inclinée et impacte la surface de l'eau puis se propage dans la direction Nord-Est. Ce cas de figure a été étudié à l'échelle du laboratoire et caractérisé par le cas d'un jet à flottabilité négative qui se déverse dans une eau peu profonde (Figure II.18 et II.19) [42,43]. On peut aussi constater depuis ces images satellites que l'interaction entre le jet et la surface de l'eau diffère au cours du temps, et cela dépend de plusieurs facteurs, comme le débit de saumure rejeté et les conditions marines [29].

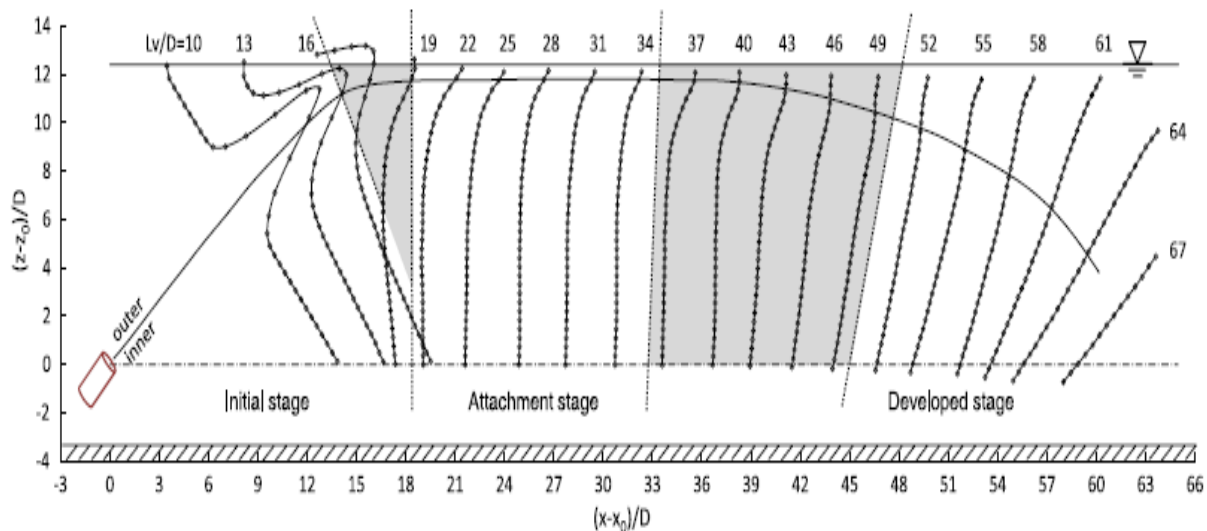


Figure II.18 : Vue de profil de l'impact d'un jet incliné en eau peu profonde [42].

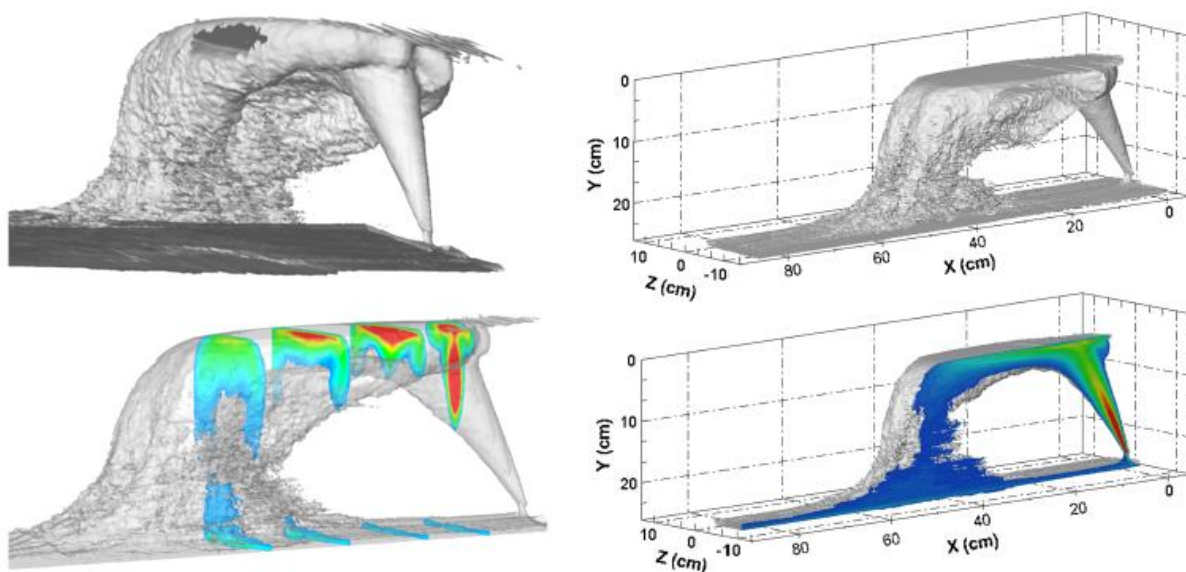


Figure II.19 : Images en 3D de l'impact de jet sur la surface de l'eau dans le cas d'un déversement dans une eau peu profonde [43].

En complément de l'analyse précédente, la Figure II.19 expose la dynamique saisonnière du périmètre de l'interaction de jet sur la surface de l'eau à la station de dessalement d'El Hamma pour l'année 2015.

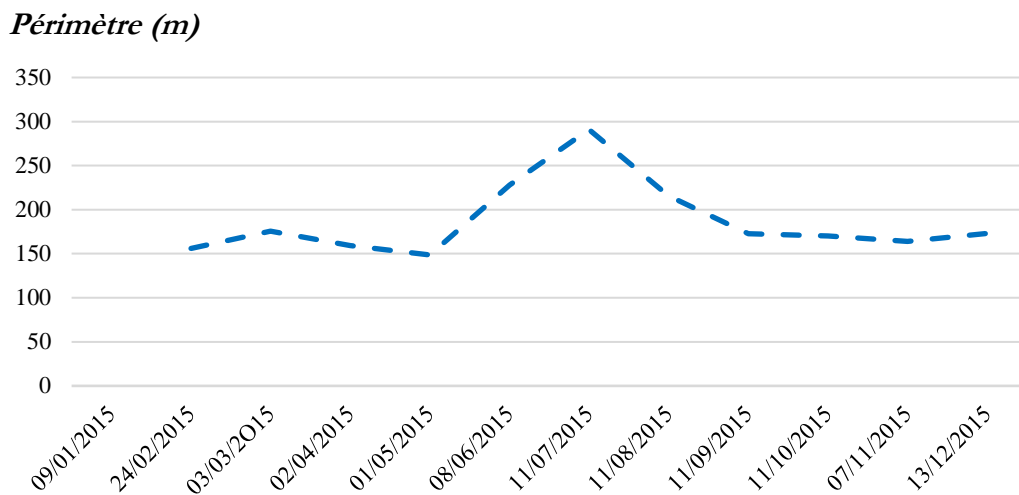


Figure II.19 : Variation saisonnière du périmètre de l'interaction de jet sur la surface de l'eau à la station de dessalement d'El Hamma (2015).

Pour cette analyse, nous avons pris comme échantillon toutes les images satellites fournies par Google Earth Pro [21], pendant la période allant de janvier à décembre 2015. Le choix s'est porté sur l'année 2015, car elle offre une couverture complète des saisons avec des images mensuelles disponibles de manière systématique. Il ressort de ce graphe que pendant la période estivale, on observe une expansion notable de l'interaction de jet sur la surface de l'eau, caractérisée par des valeurs maximales de périmètre. En revanche, les valeurs minimales sont enregistrées pendant la saison hivernale. Cette observation suggère une efficacité accrue de la dilution de la saumure pendant les mois les plus froids de l'année. Ces résultats sont très probablement liés aux propriétés de la saumure elle-même et aux conditions environnementales marines. En effet, il est plausible que la période estivale corresponde au pic de production de la station de dessalement d'El Hamma, ce qui se traduit par une augmentation proportionnelle des rejets de saumure. Cette tendance peut être attribuée à la demande croissante en eau potable pendant cette période, associée à des niveaux de précipitations réduits et à une capacité de stockage des barrages amoindrie. D'autre part, les variations saisonnières de la salinité, induites par les changements dans les régimes de précipitations et d'évaporation, ainsi que par les fluctuations de la circulation marine et des vagues, peuvent également influencer la dispersion de la saumure.

II.8 Conclusion

L'étude présentée dans ce chapitre a pour but d'utiliser les images satellites fournies par Google Earth Pro comme outil pour étudier les stations de dessalement algériennes et leurs zones de rejets.

En guise de conclusion, l'analyse révèle des images satellites des phénomènes de surface à El Hamma, Ténès, Honaine et Fouka I, résultant d'interactions entre les jets de saumure et les surfaces de l'eau. Ces phénomènes varient en fonction de facteurs tels que le débit, la profondeur de l'eau, les conditions météorologiques et la bathymétrie.

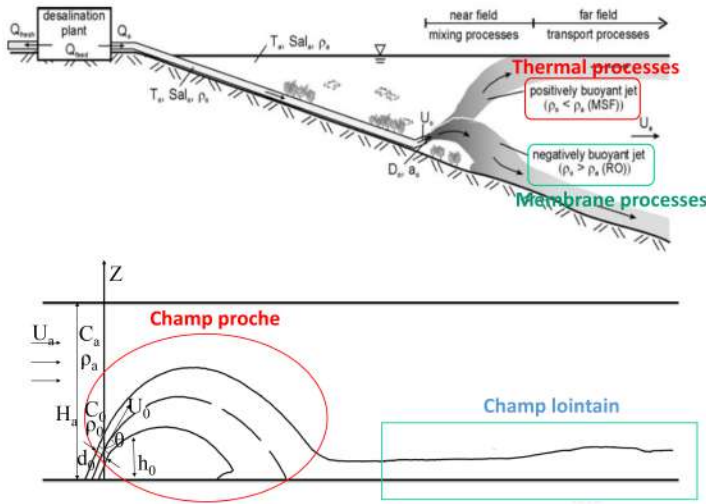
Cette étude a fait l'objet d'une communication intitulée : Étude de l'impact des rejets de saumures des stations de dessalement en utilisant l'imagerie satellite présentée lors de la 1ère Journée nationale sur la Biotechnologie, Valorisation et Conservation des Bio-ressources (BVCB-2024) organisée par le laboratoire PSEMRVC et la FSBSA en juin 2024 à l'UMMTO.



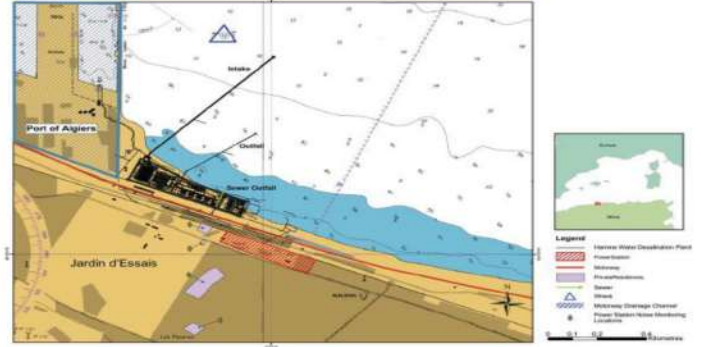
Motivation et Objectifs

- Le peu d'études consacrées à l'analyse des rejets de saumures dans les eaux côtières peu profondes
- Le manque d'études utilisant l'imagerie satellitaire pour étudier les saumures provenant des usines de dessalement d'eau de mer
- Mieux comprendre, à une échelle réaliste, la propagation à surface libre de la saumure déversée dans les eaux peu profondes
- Observer et analyser l'interaction des rejets de saumure de la station d'El Hamma à Alger avec la surface de l'eau

Classification et Caractéristiques des Rejets de Saumure



Détails de l'usine d'El Hamma



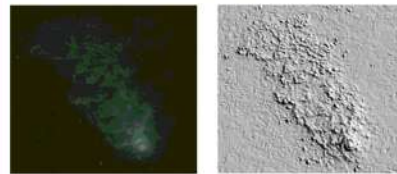
Localisation	El Hamma, Alger, Algérie, 36° 45'04.88"N 3° 04'46.57"E
Production	200 000 m ³ /jour
Partenariat	Ge Ionics (70%), AEC (30%)
Technique	Osмосe inverse
Émissaire de captation	550 m de longueur, 10 m de profondeur
Émissaire de rejet de saumure	258 m de longueur, 8 m de profondeur, diamètre de 1,6 m avec une buse de sortie sans diffuseur

Méthodologie

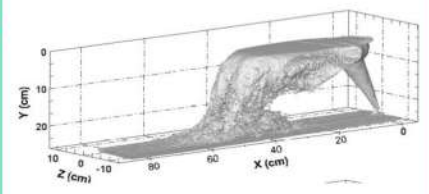
1/ Suivi du panache surfacique



2/ Traitement d'images

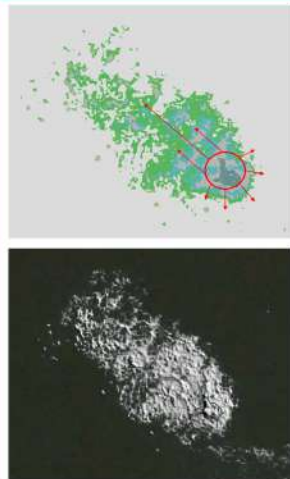


3/ Analyse du phénomène

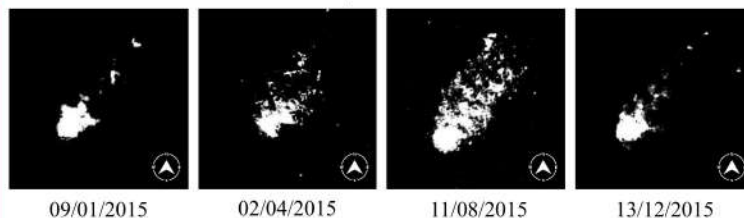


Principaux Résultats

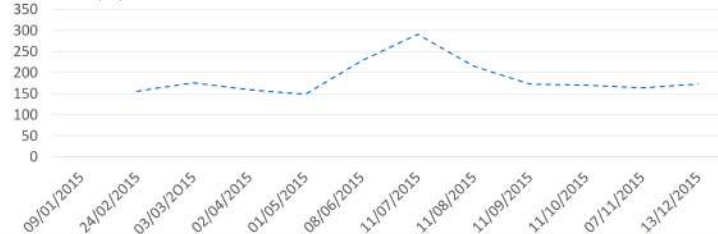
Images traitées



Evolution de l'interaction entre le jet de saumure et la surface de l'eau



Périmètre (m)



Conclusion et Recommandations

- L'interaction revêt une forme non uniforme qui varie en fonction de facteurs tels que le débit de saumure rejetée, la profondeur de l'eau, les conditions météorologiques et la bathymétrie du site
- Apporter des modifications à la conception du système de rejet en remplaçant la simple buse par un système de diffuseur ou en augmentant la longueur du conduit d'évacuation
- Étudier l'impact de l'usine sur l'environnement et mener un programme de surveillance pour suivre le comportement du rejet de la saumure

Chapitre III

ANALYSE DES REJETS DE SAUMURES
DES USINES DE DESSALEMENT EN
UTILISANT LA MÉTHODE À ANALYSE
DIMENSIONNELLE

III.1 Introduction

Ce chapitre vise à utiliser la méthode d'analyse dimensionnelle pour étudier les jets de saumure des six stations en Algérie.

III.2 Motivation et objectifs

Les usines de dessalement rejettent généralement de grandes quantités de déchets de saumure dans les eaux côtières adjacentes, entraînant des impacts environnementaux potentiellement nocifs. Pour augmenter la dilution des effluents avant leur impact sur le fond marin, une élimination au moyen de jets denses inclinés vers le haut (à flottabilité négative) peut être appliquée [46].

Pour minimiser les effets nocifs et évaluer l'impact environnemental, plusieurs outils peuvent être employés des systèmes d'expertise qui fournissent une évaluation détaillée des impacts environnementaux des rejets comme le Cornell Mixing Zone Expert System (CORMIX) se composent d'une série de systèmes logiciels pour l'analyse, la prédiction et la conception des rejets aqueux dans les cours d'eau, avec une attention particulière à la géométrie et aux caractéristiques de dilution de la zone de mélange initiale [47]. Ce système approuvé par l'EPA des États-Unis met l'accent sur la prédiction de l'interaction des limites de panache et fournit une documentation approfondie de la vérification des données d'entrée, de la sélection du modèle hydrodynamique et de la documentation des résultats de simulation. Les nouvelles fonctionnalités du système incluent une interface graphique intelligente basée sur des formulaires pour Windows 95/98/NT/2000, appelée CORMIX-GI, qui donne accès à des outils de conception avancés pour la visualisation des émissaires (CorSpy), la visualisation des zones de mélange (CorVue), l'accès aux données historiques (CorData) et l'analyse de l'étude de sensibilité (CorSens). Les sous-systèmes CORMIX1 (port unique submergé) et CORMIX2 (ports multiples submergés) peuvent simuler le mélange de sources de rejet denses telles que les rejets de saumure des installations de dessalement [47] et le RO-discharge-calculator développé par Bleninger pour calculer les propriétés de l'effluent et les concentrations en substances au point de rejet. Il permet d'entrer jusqu'à trois types d'effluents différents avec des débits, propriétés et constituants individuels différents, qui sont ensuite fusionnés au point de rejet. Cela permet de prendre en compte le mélange des effluents de dessalement avec d'autres effluents. De plus, le calculateur caractérise les propriétés de l'effluent et calcule les caractéristiques de rejet de base en comparant les propriétés de l'effluent avec les caractéristiques ambiantes [48].

Dans cette étude, notre objectif principal est d'analyser de manière détaillée les rejets de saumure provenant de six usines de dessalement. Nous utiliserons la méthode de l'analyse dimensionnelle pour comprendre les liens entre les différents paramètres impliqués dans ces rejets. Notre but est d'identifier les éléments clés qui influent sur la dynamique d'un rejet de saumure.

III.3 Méthodologie

Pour cette investigation, nous allons suivre les étapes suivantes :

- Collecte des données initiales ;
- Utilisation de l'analyse dimensionnelle ;
- Analyse et interprétation des résultats.

III.3.1 Collecte des données sur les caractéristiques de la saumure rejetée

La méthodologie à suivre pour l'analyse des rejets à l'aide du calculateur implique plusieurs étapes. Tout d'abord, il est nécessaire de collecter des données sur les caractéristiques de la saumure rejetée, telles que sa salinité, sa température et sa composition chimique. Dans notre cas, nous allons nous intéresser au cas de six stations de dessalement qui sont : El Hamma, Ténès, Beni Saf, Honaine, Fouka I et Cap Djinet I.

III.3.2 Utilisation de l'analyse dimensionnelle

Le calculateur développé par Bleninger et al [48] utilise la méthode à analyse dimensionnelle pour évaluer l'impact environnemental des rejets de saumure provenant des usines de dessalement. Son interface simple permet d'estimer la dilution, la trajectoire du panache et les impacts potentiels sur les écosystèmes marins. Au-delà de sa simplicité d'utilisation, le calculateur se distingue par ses capacités de modélisation avancées. En effet, il simule le comportement de la saumure rejetée dans le milieu marin en tenant compte de divers facteurs physico-chimiques tels que la salinité, la température, la concentration en éléments chimiques. Cette modélisation précise permet d'obtenir des données précieuses sur la dispersion et la dilution de la saumure dans l'eau environnante, ainsi que sur son impact potentiel sur les écosystèmes marins.

III.3.3 Paramétrage des caractéristiques environnementales et des spécificités des installations

Pour mener à bien cette analyse, nous allons fixer différents paramètres :

III.3.3.1 Caractéristiques environnementales

Les caractéristiques environnementales sont des valeurs par défaut que nous avons uniformément appliquées à toutes les stations de dessalement étudiées afin de standardiser l'analyse. Ces valeurs incluent :

- Température (T_a) : 25 °C
- Salinité (Sal_a) : 35 ppt
- Inclinaison du fond (θ_B) : 45°

III.3.3.2 Spécificités des installations

Contrairement aux caractéristiques environnementales, les spécificités des installations varient d'une station à l'autre. Ces paramètres spécifiques à chaque installation sont essentiels pour comprendre les différences de performance et d'impact environnemental entre les stations. Les spécificités incluent :

- Débit de production d'eau potable (Q_{drink})
- Taux de récupération (r)
- Température de la saumure (T_{desal})
- Nombre d'ouvertures (port) (n)
- Angle vertical par rapport au fond (θ_0)
- Diamètre de l'émissaire (D)

Dans le cas où un mélange d'effluents de charbon est présent, des variables supplémentaires telles que le débit ($Q_{effl,ex}$), la température ($T_{effl,ex}$) et la salinité ($Sal_{effl,ex}$) doivent être prises en considération. Or, dans notre étude, l'absence d'effluents externes mélangés nous amène à considérer [$T_{effl,ex}$, $Q_{effl,ex}$ et $S_{effl,ex} = 0$]. En outre, la géométrie de l'émissaire, définie par des aspects tels que l'angle de décharge (θ_0) et le nombre d'ouvertures portuaires (n), joue un rôle crucial dans nos calculs.

III.4 Caractéristiques des jets de saumure en utilisant l'analyse dimensionnelle

Plusieurs méthodes sont utilisées pour étudier les rejets de saumure des usines de dessalement de l'eau de mer. Parmi elles, la méthode d'analyse dimensionnelle est simple et donne des résultats satisfaisants. Dans ce qui suit, nous allons présenter les principaux paramètres qui caractérisent cette méthode. Pour cela, nous allons nous focaliser sur le cas d'un jet de saumure à flottabilité négative, comme celui des rejets provenant des usines à osmose inverse.

La Figure III.1 montre la vue latérale d'un jet à flottabilité négative se déchargeant dans de l'eau stagnante ayant une profondeur notée (H_{ao}) et incliné d'un angle (θ_B). La géométrie du port est donnée par son diamètre (D), sa hauteur au-dessus du fond (h_o) et son angle d'inclinaison (θ_o) par rapport à l'horizontale, pointant vers le large, l'eau réceptrice est non stratifiée avec une densité constante (ρ_a) et stagnante (aucun courant). Le jet a une vitesse de décharge et une masse volumique ($\rho_o > \rho_a$).

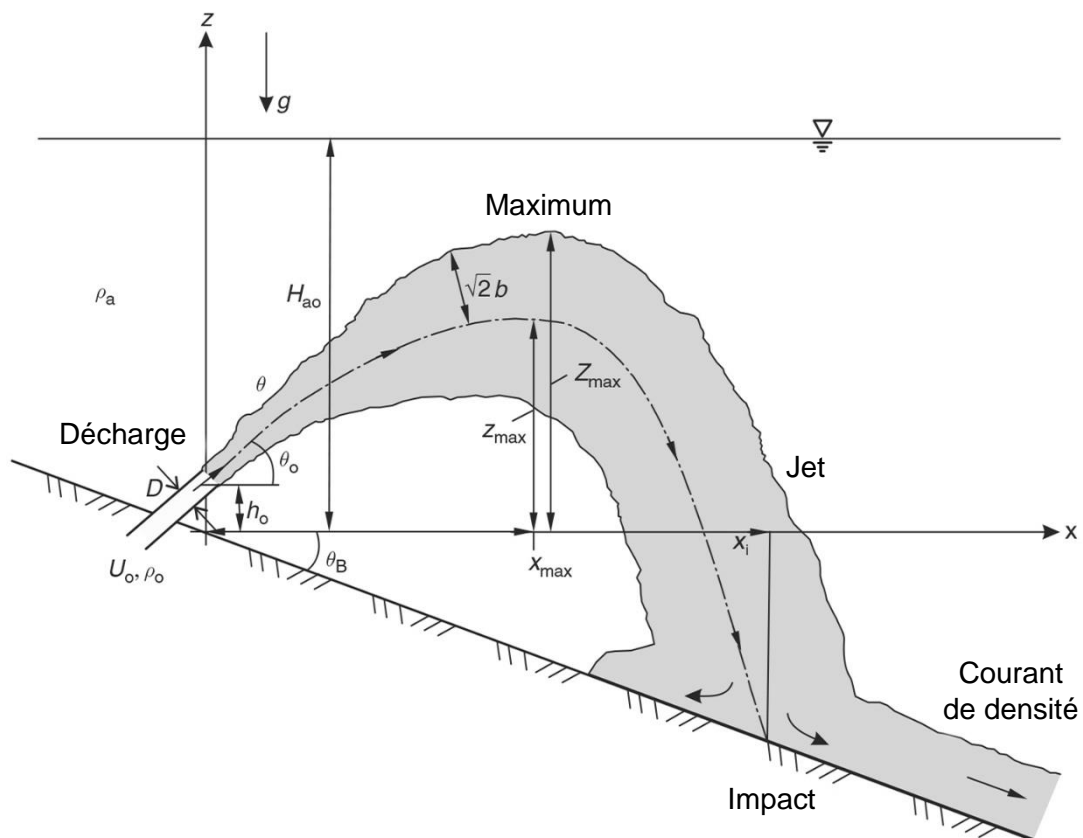


Figure III.1 : Vue latérale schématique d'un jet à flottabilité négative se déversant dans un milieu ambiant stagnant avec un fond incliné [32].

Les autres paramètres représentés sur la Figure III.1 sont les suivants :

Z_{max} : Hauteur maximale d'élévation (hauteur maximale de la limite supérieure ou du bord supérieur du jet) [m].

X_{max} : Position horizontale de la crête de la ligne centrale [m].

X_i : Position horizontale au point d'impact (point où l'axe du jet heurte le fond) [m].

H_{ao} : Profondeur moyenne au point de rejet [m].

ρ_a : Masse volumique ambiante [kg/m^3].

ρ_0 : Masse volumique de l'effluent [kg/m^3].

U_0 : Vitesse initiale de décharge du jet [m/s].

D : Diamètre du port [m].

h_0 : Hauteur du port [m].

θ_0 : Angle de décharge du jet (angle vertical par rapport au fond) [$^\circ$].

θ_B : Pente en mer [$^\circ$].

g : Accélération gravitationnelle à n'importe quel point de la décharge [m/s^2].

$\sqrt{2b}$: Demi-largeur du jet [m].

Pour le processus de rejet, les flux principaux sont :

Le flux volumique (ou débit) (Q_0) : Correspond à la quantité de fluide expulsée par unité de temps et est calculé comme suit :

$$Q_0 = U_0 D^2 \pi / 4 \quad [m^3/s] \quad (III.1)$$

Le flux de quantité de mouvement (M_0) : Représente la quantité de mouvement transportée par le jet par unité de temps et est calculé comme suit :

$$M_0 = U_0 Q_0 \quad [m^4/s^2] \quad (III.2)$$

Le flux de flottabilité (J_0) : Exprime la force ascensionnelle nette exercée sur le jet en raison de sa densité inférieure à celle de l'eau environnante et est calculé comme suit :

$$J_0 = g'_0 Q_0 \quad [m^4/s^3] \quad (III.4)$$

Avec :

$$g'_0 = g(\rho_a - \rho_0) / \rho_a \quad [m/s^2] \quad (III.3)$$

La flottabilité négative, indiquée par cette valeur négative, signifie que le jet subit une accélération dirigée vers le haut. Initialement propulsé vers le haut à une vitesse élevée, le jet atteint son altitude maximale avant de redescendre sous l'effet de la flottabilité négative jusqu'à heurter le fond incliné [32].

Les caractéristiques géométriques et de mélange du jet turbulent et flottant peuvent être déterminées par deux échelles de longueur [49,50] :

L'échelle de longueur de rejet, notée (L_Q) qui représente la distance caractéristique sur laquelle le jet se propage dans l'environnement (Équation III.5) :

$$L_Q = Q_0 / \sqrt{M_0} \quad [m] \quad (III.5)$$

L'échelle de longueur de quantité de mouvement désignée par (L_M), qui marque la transition entre le comportement du jet et celui du panache (Équation III.6) :

$$L_M = M_0^{3/4} / \sqrt{|J_0|} \quad [m] \quad (III.6)$$

Le nombre de Froude densimétrique du jet noté (F_0), est un paramètre adimensionnel utilisé pour caractériser le comportement d'un jet de fluide en mouvement [51]. Il prend en compte la densité des deux fluides impliqués dans le jet, ainsi que sa vitesse (Équation III.7) :

$$F_0 = U_0 / \sqrt{|g'_0| D} \quad (III.7)$$

L'analyse dimensionnelle est utilisée dans cette étude pour évaluer les caractéristiques des jets de saumure provenant des usines de dessalement. Cet outil est essentiel pour estimer avec précision le débit volumique, la quantité de mouvement et la flottabilité du jet dans différentes conditions environnementales.

Pour illustrer son utilisation, une capture d'écran du RO-discharge-calculator est présentée ci-dessous, (Figure III.2). Cette figure montre l'interface du logiciel avec les champs de saisie pour les paramètres géométriques du port de décharge et les propriétés physiques de l'eau réceptrice et de la saumure. En entrant ces données, le modèle calcule automatiquement les flux principaux du jet, fournissant ainsi des informations cruciales pour évaluer son comportement et son impact environnemental.

Flowrates & Effluent Characteristics RO

annotations/limitations:

- ambient characteristics (seawater)
 ambient temperature $T_a = 22,00$ °C $T = 10$ to 180 °C
 ambient salinity $Sal_a = 33,00$ ppt $Sal = 0$ to 160 ppt (ppt = g/kg)
 ambient density $\rho_a = 1022,44$ kg/m³ allowed ranges for viscosity calculation:
 ambient kin. viscosity $\nu_a = 9,98E-07$ m²/s $Sal = 0$ to 130 ppt, $T = 10$ to 180 °C (El-Dessouky, Ettoumy (2002))

- fresh water (permeate)
 flowrate $Q_{drink} = 1,00$ m³/s recovery rate:
 recovery rate $r = 50$ % percentage of intake water converted into permeate;
 intake flowrate $Q_{in} = 2,00$ m³/s plant characteristic; following Lattemann: $r = 40-65$ %

- brine characteristics (effluent from desalination process)
 plant effluent flowrate $Q_{desal} = 1,00$ m³/s usually ambient or 1°C above
 temperature $T_{desal} = 22,00$ °C with $Sal_{drink} = 0$ ppt
 salinity $Sal_{desal} = 66,00$ ppt e.g. coagulants, anti-scalants, ...
 density $\rho_{desal} = 1047,49$ kg/m³ (has no effect on density or mixing characteristics)
 substance concentration $C_{desal} = 20,00$ ppm

- blended effluent - external - (e.g. waste water or others)
 flowrate $Q_{eff,ex} = 1,00$ m³/s $Sal = 0$ to 160 ppt, $T = 10$ to 180 °C
 temperature $T_{eff,ex} = 20,00$ °C
 salinity $Sal_{eff,ex} = 0,00$ ppt
 density $\rho_{eff,ex} = 998,40$ kg/m³

a)

Discharge Characteristics RO

annotations:

- ambient characteristics
 ambient density $\rho_a = 1022,44$ kg/m³
 buoyant acceleration $g'_a = #####$ m/s²
 offshore slope $\theta_p = 10$

- effluent characteristics
 flowrate $Q_e = 2,00$ m³/s
 discharge density $\rho_e = 1022,73$ kg/m³
 kin. viscosity $\nu_e = #####$ m²/s

- discharge characteristics
 Choose a discharge angle (recommended: ≤ 15 °)
 discharge angle $\theta_d = 15$ °
 discharge angle ok!
 port discharge velocity $U_p = 5,00$ m/s
 number of openings $n = 6$
 port diameter $D = 0,29$ m
 dens. Froude Number $Fr_e = 174,75$
 Reynolds Number $Re_e = #####$

Checking of characteristic properties:
 Diameter D : in required range, ok!
 Froude Number Fr_e : huge value, please check openings!
 Reynolds Number Re_e : in required range, ok!

required:
 $0,1 \leq D \leq 10$
 $Fr_e \geq 10$, recommended: $Fr_e = 20-25$
 $Re_e > 4000$

Choose an appropriate port diameter (DN according to ISO standard):
 port diameter $D = 0,30$ m

$[0^\circ \leq \theta_d \leq 90^\circ]$ only integer!
 recommended: $U_p = 4-6$ m/s
 start with one opening!
 $Fr_e = U_p \cdot (g'_a \cdot D)^{-0,5} = Q_e \cdot (D^2 \cdot \rho^4 / g'_a \cdot \nu_e)^{-0,5}$
 $Re_e = U_p \cdot D / \nu_e$

b)

Jet Properties RO

annotations:

- discharge & ambient characteristics
 discharge angle $\theta_d = 15$ °
 port height $h_p = 0,50$ m $S = 0,33 \cdot S_p = 0,5 \cdot 0,33 = 0,165$ m
 in required range, ok!
 offshore slope $\theta_p = 10$ °
 imaginary offshore slope $\theta_{p'} = 10$ °
 momentum length $L_p = 45,87$ m
 dens. Froude Number $Fr_e = 162,42$

due to port height, not implemented!

- geometric jet prop. (for discharge angle that are not a multiple of 15°: linear interpolation?)
 2 m at 12 m (30%) $\rightarrow 0,564$ m 1 m $\rightarrow 0,321$ m
 2 m at 12 m (25%) $\rightarrow 0,447$ m 1 m $\rightarrow 0,253$ m
 2 m at 12 m $\rightarrow 0,232$ m
 2 m at 12 m $\rightarrow 1,241$ m
 2 m at 12 m $\rightarrow -0,487$ m
 2 m at 12 m $\rightarrow 2,700$ m
 2 m at 12 m $\rightarrow 25,06$ m

upper jet boundary
 2 m at 12 m (25%) $\rightarrow #####$ m

maximum jet centerline
 parition $x_{max} = #####$ m
 jet centerline parition $x_j = #####$ m
 the impingement point $x_i = #####$ m
 offshore location $x = 869,632$ m
 local water depth $H_{loc} = 15,238$ m $H_{loc} \cdot 0,75 \cdot S = 12,528$ m

Choose an appropriate water location
 offshore location $x = #####$ m in required range.
 local water depth $H_{loc} = #####$ m offshore location ok!

- dilution & concentration (that are not a multiple of 10°: linear interpolation?)
 minimum centerline $C_{min} = 0,21$ ppm Fig. 101
 dilution at $x_{max} = 34,3$ ppm
 bulk dilution at $x_i = 1,00$ ppm Fig. 101
 impingement point $C_i = #####$ ppm
 substance concentration at the centerline of max. local at risk $C_{max} = 0,29$ ppm
 impingement point $C_i = 0,06$ ppm

c)

SEAWATER DENSITY & VISCOSITY CALCULATOR

Please enter the values of salinity and temperature of the effluent or ambient water (p=1atm):

Salinity: Sal = ppt for ρ : $0 \leq Sal \leq 160$ ppt
 for μ : $0 \leq Sal \leq 130$ ppt

Temperature: T = °C $10 \leq T \leq 180$ °C

Density: $\rho = 1023,019$ kg/m³

Dynamic Viscosity: $\mu = 1,069 \cdot 10^{-3}$ kg/m s

Kinematic Viscosity: $\nu = 1,045 \cdot 10^{-6}$ m²/s

SOURCE:
 El-Dessouky, Ettoumy (2002): Fundamentals of Sea Water Desalination (Appendix A: Thermodynamic Properties)

d)

Figure III.2 : Captures d'écran du RO-discharge-calculator : a) Flux et caractéristiques des effluents d'osmose inverse, b) Caractéristiques des rejets d'osmose inverse, c) Propriétés des jets d'osmose inverse, d) Calculateur de densité et de viscosité de l'eau de mer.

En intégrant les résultats obtenus à l'aide de cet outil dans notre analyse dimensionnelle, nous affinons notre compréhension des processus de dispersion et de mélange des rejets de saumure, ce qui contribue à l'optimisation des opérations de dessalement et à une gestion plus durable des ressources en eau douce.

Les caractéristiques des systèmes de rejet de saumures des usines en question sont présentées sur le tableau suivant :

<i>Station</i>	Q_{drink} (m^3/s)	r (%)	D (m)	Q_{desal} (m^3/s)	n	θ_0 ($^\circ$)	U_0^* (m/s)	<i>Type de la sortie</i>
<i>El Hamma</i>	2,32	40-44,5 (43)	1,6	3,08	1	60°	5	Buse
<i>Ténès</i>	2,32	45	0,28	2,84	12	60°	5	Multi-port
<i>Honaine</i>	2,32	47	1,6	2,62	1	45°	5	Buse
<i>Beni Saf</i>	2,32	47	1,8	2,62	1	45°	5	Buse
<i>Fouka I</i>	1,39	45	1,1	1,70	1	45°	5	Buse
<i>Cap Djinet I</i>	1,16	45	1,2	1,42	6	45°	5	Multi-port

* : *fixé par défaut*

Tableau III.1 : *Caractéristiques des stations de dessalement utilisées pour l'analyse.*

III.5 Résultats et discussion

Dans notre étude, nous avons appliqué cet outil à six stations qui sont : El Hamma, Ténès, Beni Saf et Honaine, Cap Djinet I et Fouka I et les résultats obtenus sont présentés ci-dessous :

III.5.1 Débit individuel de saumure ($Q_{0.ind}$)

La Figure III.3 illustre que les stations ont un débit individuel compris entre (1,7 et 3 m^3/s). Le débit individuel le plus élevé est celui calculé pour la station d'El Hamma (3,08 m^3/s), tandis que le plus faible est enregistré pour la station de Cap Djinet I (0,24 m^3/s).

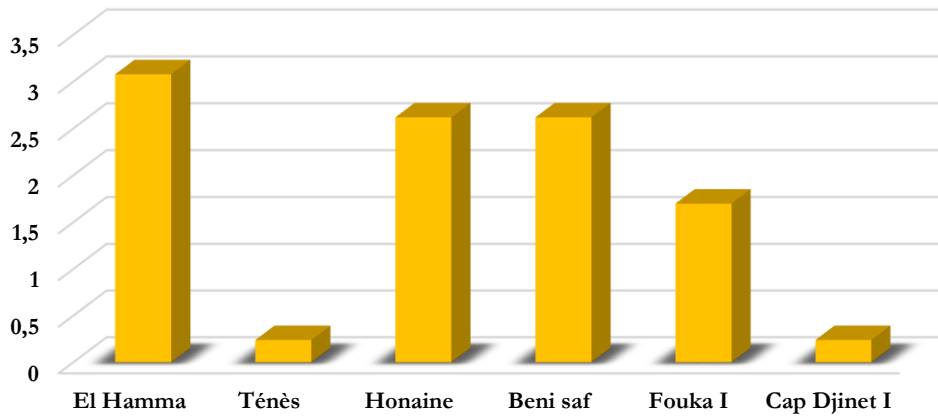
$Q_{0 \cdot ind} (m^3/s)$


Figure III.3 : Répartition des débits individuels de saumure.

III.5.2 Flux de quantité de mouvement (M_0)

La Figure III.4 montre que les valeurs de M_0 (m^4/s^2) sont concentrées entre (0 et 3 m^4/s^2). La station de Cap Djinet I présente la valeur la plus faible (0,05 m^4/s^2), tandis que la station d'El Hamma présente la valeur la plus élevée (4,7 m^4/s^2).

La différence de débit individuel ($Q_{0 \cdot ind}$) présentée en Figure III.3 et de valeur du flux de quantité de mouvement (M_0) présentée sur la Figure III.4 entre les stations est probablement attribuable aux différences dans le diamètre et le nombre des ports de rejet de chaque système de rejet de station.

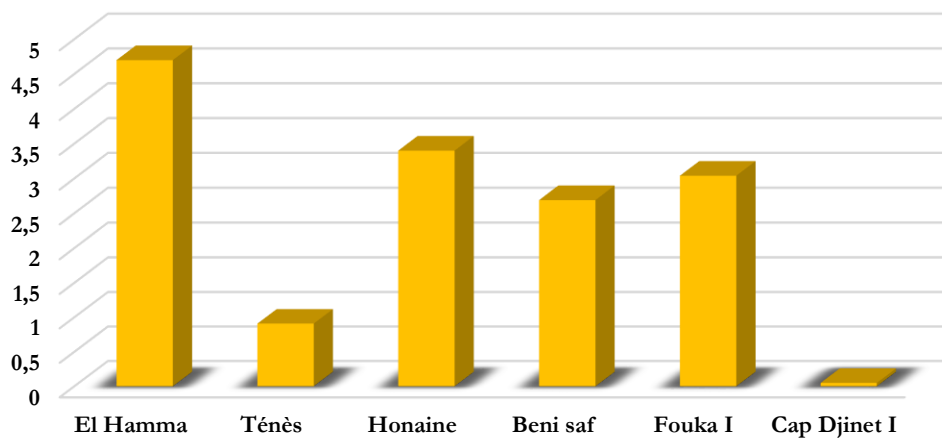
 $M_0 (m^4/s^2)$


Figure III.4 : Représentation des valeurs de flux de quantité de mouvement.

III.5.3 Flux de flottabilité (J_0)

Les valeurs des flux de flottabilité représentées sur la Figure III.5 sont négatives pour toutes les stations, ce qui indique une perte de flottabilité. Cette observation est cohérente avec notre analyse du jet négatif.

Les stations de Cap Djinet I et Ténès se distinguent par des flux de flottabilité nettement plus élevés que les autres, tandis que la station d'El Hamma affiche le flux le plus faible parmi celles représentées. Ces différences peuvent être attribuées à plusieurs facteurs. Premièrement, l'utilisation de diffuseurs multiports à Cap Djinet I et Ténès.

Ces derniers permettent une distribution plus uniforme de l'eau et une meilleure efficacité de flottabilité, contrairement aux buses simples utilisées dans les autres stations. Enfin des facteurs environnementaux locaux pourraient également influencer les flux de flottabilité de manière différente selon les stations, notamment la salinité, la température et les courants marins [32].

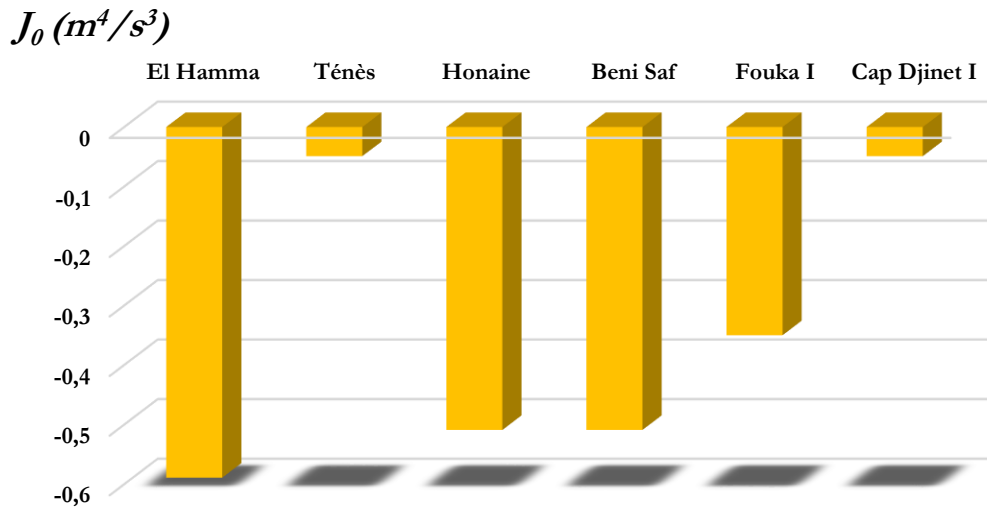


Figure III.5 : Représentation des flux de flottabilité.

III.5.4 Échelles de longueur de décharge (L_Q)

D'après la Figure III.6, les valeurs des (L_Q) varient entre (0,5 et 1,5 m). Beni Saf présente la valeur la plus élevée (1,6 m), tandis que Ténès affiche la valeur la plus faible (0,25 m).

On remarque que les stations qui ont une buse simple, comme El Hamma, Beni Saf et Honaine [28], ont un (L_Q) plus élevé. Cela signifie que les effluents de saumure sont dispersés sur de grandes distances, ce qui peut avoir un effet négatif sur la vie marine.

L_Q (m)

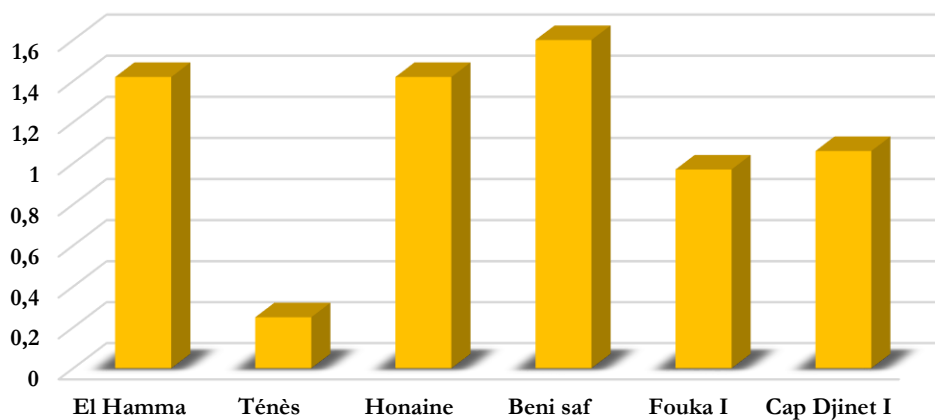


Figure III.6 : Représentation des échelles de longueur de décharge.

III.5.5 Échelles de longueur d'impulsion (L_M)

L'échelle de longueur d'impulsion varie considérablement d'une station à l'autre, comme montré sur la Figure III.7. Les stations de Fouka I et El Hamma présentent les valeurs les plus élevées, alors que la station de Cap Djinet I affiche la valeur la plus faible. Cela est très certainement dû à la conception des systèmes de rejet. El Hamma et Fouka I utilisent une buse simple [28,41], tandis que Cap Djinet I emploie un diffuseur multiport.

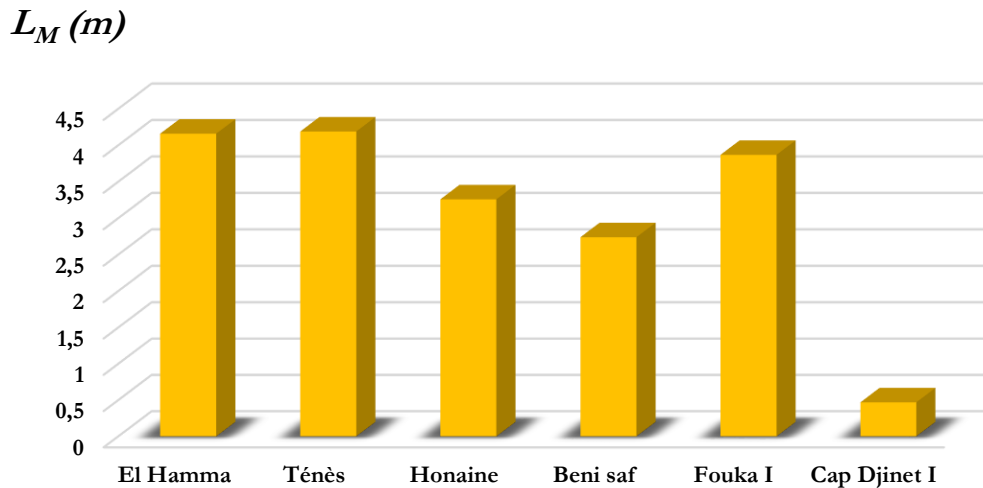


Figure III.7 : Représentation des échelles de longueur d'impulsion.

Une autre observation est que la station de Ténès a une valeur élevée, similaire aux stations dotées d'une buse simple, bien qu'elle soit équipée d'un diffuseur multiport à double alternative. Cela peut être lié à son diamètre de port ($D = 0,28$ m) et à la vitesse initiale du jet de 35 m/s [36], tandis que le calculateur fixe la vitesse initiale (U_0) à 5 m/s.

III.5.6 La hauteur maximale d'élévation (Z_{max})

La Figure III.8 présente les valeurs de la hauteur maximale d'élévation, (Z_{max}) des six stations de dessalement. On observe que les stations de Fouka I, El Hamma et Ténès affichent les valeurs les plus élevées, tandis que les autres stations, notamment Cap Djinet I, présentent des valeurs plus faibles. Les stations de Fouka I et EL Hamma utilisent des buses simples [28,41], tandis que la station de Cap Djinet I est équipée d'un système diffuseur multiport.

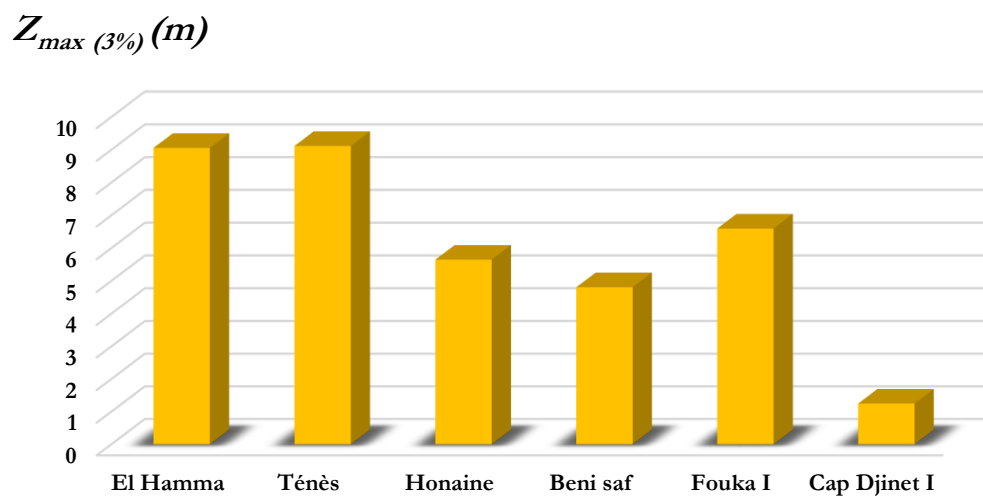


Figure III.8 : Représentation des limites supérieures du jet.

Les buses simples génèrent un jet concentré avec une longueur de jet maximale (Z_{max}) plus élevée, alors que les diffuseurs multiports répartissent la saumure sur une plus grande surface, réduisant ainsi le (Z_{max}). On observe également que la station de Ténès a un (Z_{max}) plus élevé malgré l'utilisation d'un diffuseur, en raison de la profondeur de rejet qui est de 5 m [36]. En revanche, Honaine et Beni Saf ont des (Z_{max}) moins élevés par rapport à leur utilisation de buses simples [28], ce qui s'explique par leur profondeur de rejet.

III.5.7 Position horizontale de la crête de la ligne centrale (X_{max})

Toutes les stations, à l'exception de Cap Djinet I, ont la crête de leur ligne centrale située à la même position horizontale.

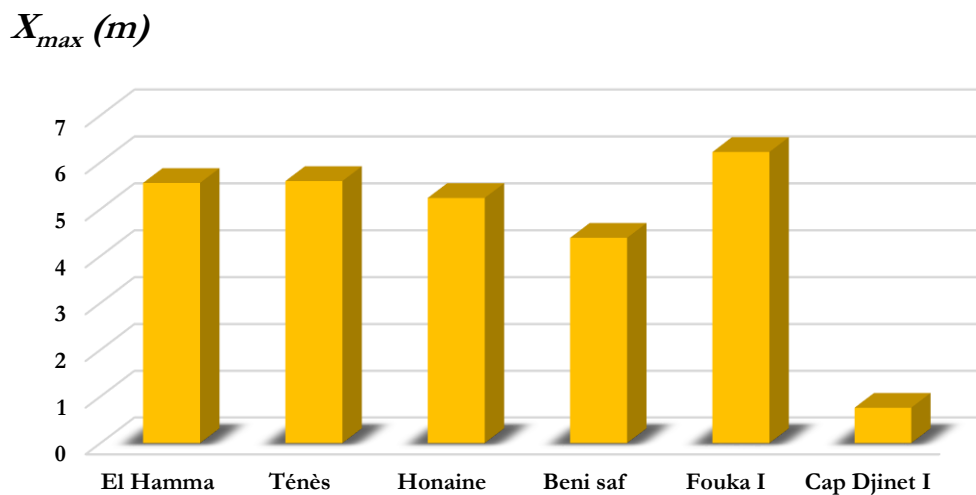


Figure III.9 : Représentation des positions horizontales de la crête de la ligne centrale.

Cependant, il est important de noter que les valeurs de (L_Q) et (L_M), (X_{max}) et (Z_{max}) présentées ne sont pas forcément parfaitement exactes. Effectivement, le calculateur établit une vitesse de sortie initiale à ($U_0 = 5$ m/s) pour toutes les stations, ce qui peut ne pas refléter la réalité du débit de rejet dans chaque cas.

Afin de compléter notre analyse, la Figure III.10 présente une représentation visuelle des jets de rejet de saumure des stations étudiées (El Hamma, Ténès, Beni Saf, Honaine, Fouka I et Cap Djinet I) se déversant dans un milieu ambiant stagnant avec un fond incliné. Cette illustration permet de mieux comprendre les comportements des jets de saumure dans l'environnement marin, en tenant compte des différences de configuration des stations.

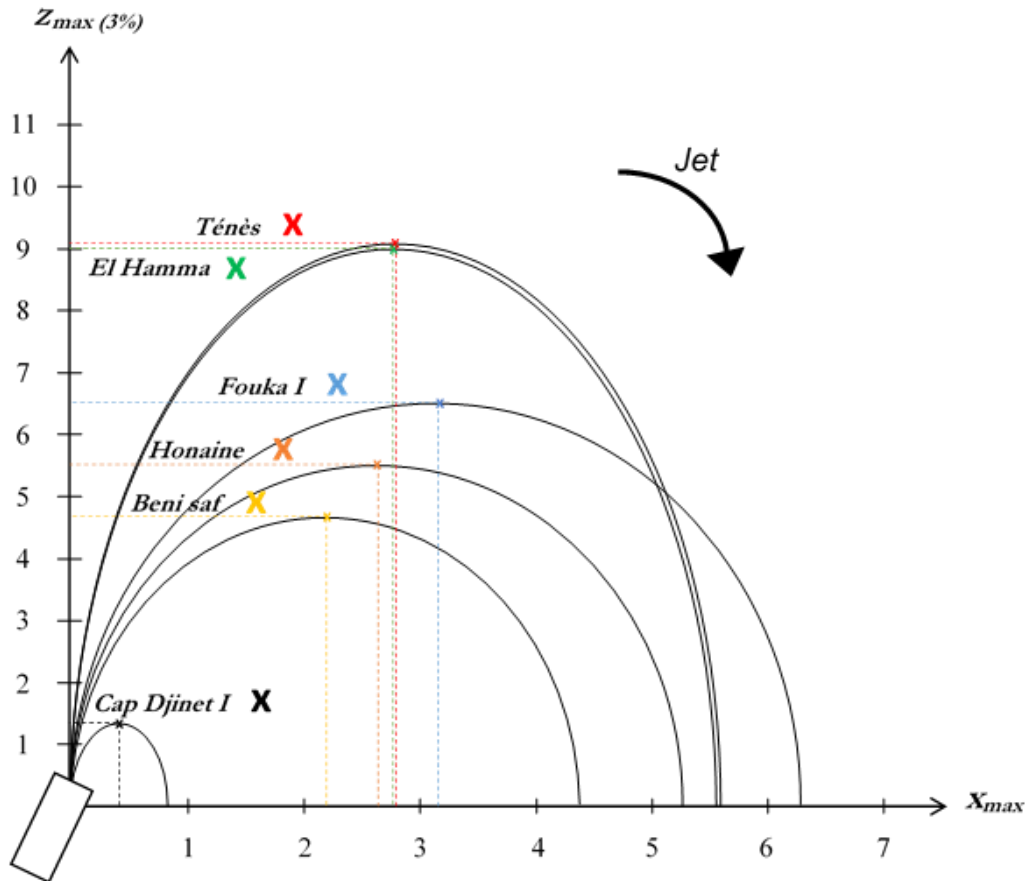


Figure III.10 : Représentation des jets à flottabilité négative dans un milieu ambiant stagnant avec fond incliné, basée sur les caractéristiques des six stations.

III.6 Conclusion

L'étude présentée dans ce chapitre a pour but d'analyser le fonctionnement des jets de saumure des six stations de dessalement d'eau de mer en Algérie en utilisant le calculateur d'analyse dimensionnelle de Bleninger.

En guise de conclusion, les diffuseurs multiports améliorent la dilution de la saumure et réduisent l'impact environnemental en dispersant celle-ci à travers plusieurs sorties, ce qui diminue la vitesse du jet de saumure et l'étend sur une plus grande surface, contrairement aux buses uniques.

Cette étude a fait l'objet d'une communication intitulée : Comparative analysis of effluent characteristics from three operating RO desalination plants in Algeria. Acceptée pour présentation lors du 1er colloque national sur l'hydraulique et le génie civil 'CNHGC-2024' qui aura lieu à l'université de Bouira en octobre 2024.

Conclusion générale

Dans ce manuscrit, nous avons utilisé l'imagerie satellite pour évaluer les rejets de saumures des stations de dessalement en Algérie. Notre étude a conduit à analyser en profondeur l'impact de ces rejets et à formuler des recommandations pour optimiser les pratiques de dessalement.

Nous avons examiné différentes méthodes de dessalement, en mettant l'accent sur l'osmose inverse. En utilisant la télédétection par imagerie satellite, nous avons détecté :

- Un phénomène de surface au niveau des zones de rejets des stations de dessalement, notamment à El Hamma, Ténès, Honaine et Fouka I.
- Une variation significative dans la manière dont les jets de saumure interagissent avec la surface de l'eau, dépendant de facteurs tels que le débit de saumure rejetée, la profondeur de l'eau, les conditions météorologiques et la bathymétrie du site.

Cependant, l'utilisation de l'imagerie satellite fournie par Google Earth Pro présente des limitations en termes de résolution et de mise à jour des images. De plus, cette méthode ne fournit pas d'informations détaillées sur les caractéristiques du panache de saumure, telles que la salinité et la température. Pour compléter ces observations, une analyse dimensionnelle a été effectuée. Les conclusions sont les suivantes :

- Les stations qui utilisent des diffuseurs multiports favorisent une meilleure dilution de la saumure par rapport à celles utilisant des buses uniques.
- Rejeter la saumure dans des zones profondes permet une bonne dispersion de la saumure et réduit l'impact environnemental par rapport aux zones peu profondes.
- Les stations d'El Hamma, Ténès et Fouka I ont montré les hauteurs d'élévation et les paramètres de crête les plus élevés, conformément aux données spécifiques recueillies pour chaque station.
- L'analyse dimensionnelle constitue une étude complémentaire indispensable à l'analyse par imagerie satellite.

Pour améliorer la gestion des rejets de saumure, nous proposons les recommandations suivantes :

- Choisir un type adéquat de système de rejet, soit direct sur la côte soit par le biais d'un émissaire sous-marin, en tenant compte de l'importance de la vitesse et de l'angle de sortie du jet ou des diffuseurs d'eau, de la bathymétrie du fond marin, du régime des houles et des courants marins.
- Placer la sortie de la conduite au niveau d'un courant fort, optimisant ainsi le mélange de la saumure et de l'eau de mer.
- Remplacer les buses par des systèmes de diffusion ou augmenter la longueur des tuyaux d'émissaire.
- Diriger les saumures vers des installations de production de sel ou d'autres utilisations industrielles appropriées.
- Produire des produits chimiques comme l'acide chlorhydrique, la soude et le magnésium à partir des rejets de dessalement de l'eau de mer, avec des possibilités futures d'extraction de matériaux comme le lithium.
- Les autorités devraient revoir la réglementation du secteur du dessalement, incluant le choix de l'emplacement des sites et le contrôle des rejets.

Références

- [1] GreenFacts. (2007). Water, A shared Responsibility, The United Nations Water Development report 2.
- [2] Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., & Melin, T. (2007). State-of-the-art reverse osmosis desalination. *Desalination*, 216(1-3), 1-76.
- [3] Miller, S., Shemer, H., & Semiat, R. (2015). Energy and environmental issues in desalination. *Desalination*, 366.
- [4] Panagopoulos, A., & Haralambous, K.-J. (2020). Environmental impacts of desalination and brine treatment - Challenges and mitigation measures. *Marine Pollution Bulletin*, 161(Pt B), 111773.
- [5] Bandelier, P. (2016). Le dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres. *Encyclopédie de l'énergie*.
- [6] Deluzarche, C. (2020). Distillation : qu'est-ce que c'est ? Futura Sciences.
- [7] Kuntz, D., & Kuntz, J. (2012). Eau potable : enjeux géopolitiques. Le dessalement est-il une solution d'avenir ?
- [8] Danis, P. (2003). Dessalement de l'eau de mer. *Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés*, J2 700.
- [9] Despax, C. Eau Résolution de problème expérimentale n°3 : Eau et ressources - Le dessalement de l'eau de mer. *Sciences physiques et chimiques - Terminale S spécialité*.
- [10] Mandri, Y., Rich, A., Mangin, D., Cogne, C., Rivoire, A., Bounahmidi, T., & Bouhaouss, A. Étude paramétrique du dessalement de l'eau de mer par congélation sur parois froides. *Laboratoire d'Automatique et de Génie des Procédés (LAGEP - UMR CNRS 5007), Université Claude Bernard Lyon 1, Université de Lyon, 69622 Villeurbanne*.
- [11] Bachelier, F. (2017). Chromatographie à échange d'ions. *Wikipédia*. <https://fr.wikipedia>.
- [12] Colman, Z. *Technique : Extraction liquide-liquide*. Université de Sherbrooke.
- [13] Kartable. Schématiser l'extraction par solvant d'une entité chimique.
- [14] Strathmann, H. (2010). Electrodialysis, a mature technology with a multitude of new applications. *Desalination*, 264(3), 268-288.
- [15] Union française des professionnels du traitement de l'eau (UAE). La qualité de votre eau au quotidien
- [16] Renaudin, V. (2003). Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. *CultureSciences-Chimie*.
- [17] SUEZ. Le dessalement [Brochure].
- [18] Agence Canarienne de Recherche, d'Innovation et de Société de l'Information (ACIISI) [ACIISI Gobierno de Canarias]. (2023). Vidéo 3D hyperréaliste du fonctionnement d'une unité de dessalement d'eau de mer par osmose inverse [Vidéo]. YouTube.
- [19] Blesing, J. E., & Pelekani, C. (2016). Seawater desalination: A sustainable solution to world water shortage - Planning, design, construction and operation of the Adelaide Desalination Plant. *Desalination: SEAWATER DESALINATION: A SUSTAINABLE SOLUTION TO WORLD WATER SHORTAGE, Volume 1(1)*.
- [20] Algerian Energy Company SPA. Data on seawater desalination stations. 2024.

- [21] Google Earth Pro software.
- [22] Roberts, P.J.W., Snyder, W.H., & Baumgartner, D.J. (1989). Ocean outfalls. I: submerged wastefield formation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115, 1–25.
- [23] Roberts, P.J.W., Snyder, W.H., & Baumgartner, D.J. (1989). Ocean outfalls. II: spatial evolution of submerged wastefield. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115, 26–48.
- [24] Jirka, G.H. (2004). Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows. Part I: Single round jet. *Environmental Fluid Mechanics*, 4, 1–56.
- [25] Yannopoulos, P.C. (2006). An improved integral model for plane and round turbulent buoyant jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 547, 267–296.
- [26] Devenish, B.J., Rooney, G.G., & Thomson, D.J. (2010). Large-eddy simulation of a buoyant plume in uniform and stably stratified environments. *Journal of Fluid Mechanics*, 652, 75–103.
- [27] Robinson, D., Wood, M., Piggott, M., & Gorman, G. (2016). CFD modelling of marine discharge mixing and dispersion. *Journal of Applied Water Engineering Research*, 4, 152–162.
- [28] Amokrane, M., & Salmi, A. (2021). Surface spreading of the brine discharge from the SWRO plants: Hamma Water Desalination plant in Algeria. *Desalination and Water Treatment*, 222, 81-91.
- [29] Alvir, M., Lučin, I., & Kranjčević, L. (Proceedings). Application Of Remote Sensing Technologies On Industrial Outfalls. 9th International Conference on Physical Modelling in Coastal Engineering (Coastlab24).
- [30] Lenntech. Brine treatment.
- [31] Bougis, J. (2011). Aspects maritimes du dessalement d'eau de mer. *Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Édition 2, Tanger, Maroc*.
- [32] Bleninger, T., & Jirka, G. H. (2008). "Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants." *Desalination*, 221, 585–597.
- [33] Palomar, P., & Losada, I. J. (13). Impacts of Brine Discharge on the Marine Environment: Modelling as a Predictive Tool. Environmental Hydraulics Institute "IH Cantabria", Universidad de Cantabria, Spain.
- [34] Fan, L. N. (1967). Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids (Doctoral dissertation). California Institute of Technology, Pasadena, California.
- [35] HWD Hamma Water Desalination Spa. À propos de HWD.
- [36] Bouthiba, A., Amitouche, M., Moudjeber, D.-E., Mahmoudi, H., & Goosen, M. T. F. A. (2022). Simulation study of the interaction between brine discharge and catchment water of a desalination plant in Tenes, Algeria under various hydrodynamic conditions. *Desalination and Water Treatment*, 16, 16–28. doi:10.5004/dwt.2022.29063279
- [37] Mehtougui, M. S., Kerfouf, A., Ardjoum, S., & Mehtougui, F. (2018). Assessment of the Quality of Water Discharges from a Desalination Plant: Case of Honaine Station (Western Algeria). *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, 89.
- [38] Allam, H., & Mellah, A. (2013). Étude économique et impact écologique de la station de dessalement de Honaine (W. Tlemcen). Dans *Proceedings du Séminaire International sur l'Hydrogéologie et l'Environnement (SIHE 2013)*, Ouargla.
- [39] Beni Saf Water Company Spa.

- [40] MYAH Tipaza. Présentation.
- [41] Filali, B., Kattab, A., & Bessenasse, M. (2018). Modelling and design of brine outfall discharges: Case of a desalination plant in Mediterranean. *Journal of Industrial Pollution Control*, 34(1), 1862-1871.
- [42] Jiang, B., Law, A.W.K., & Lee, J.H.W. (2014). Mixing of 30° and 45° inclined dense jets in shallow coastal waters. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140, 241–253.
- [43] Abessi, O., & Roberts, P.J.W. (2016). Dense jet discharges in shallow water. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142.
- [44] Kress, N., Gertner, Y., & Shoham-Frider, E. (2020). Seawater quality at the brine discharge site from two mega size seawater reverse osmosis desalination plants in Israel (Eastern Mediterranean). *Water Research*, 171, 115402.
- [45] Lattemann, S. (2010). Development of an Environmental Impact Assessment and Decision Support System for Seawater Desalination Plants. CRC Press/Balkema.
- [46] Christodoulou, G. C., Papakonstantis, I. G., & Nikiforakis, I. K. (2014). *Desalination brine disposal by means of negatively buoyant jets*. *Desalination and Water Treatment*, 53(12), 1-6.
- [47] Doneker, R. L., & Jirka, G. H. (2001). *CORMIX-GI rule-based systems for mixing zone analysis in virtual reality*. Paper presented at the 3rd International Symposium on Environmental Hydraulics, Tempe, AZ.
- [48] Bleninger, T., Niepelt, A., & Jirka, G. (2009). *Desalination plant discharge calculator*. Paper BD 180 presented at EDS Congress, Baden-Baden, Germany. Institute for Hydromechanics, University Karlsruhe.
- [49] Wright, S. J. (1977). Mean behavior of buoyant jets in a crossflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, 103(HY5), 499–513.
- [50] Jirka, G. H., & Doneker, R. L. (1991). Hydrodynamic classification of submerged single port discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117, 1095–1112.
- [51] Jirka, G. H. (2004). Integral model for turbulent buoyant jets in unbounded stratified flows, Part 1: The single round jet. *Environmental Fluid Mechanics*, 4, 1–56.

ملخص

نظرًا لانخفاض الموارد المائية المتجددة وزيادة الطلب على المياه الصالحة للشرب، تبدو تحلية مياه البحر حلاً بديلاً جذاباً. يجب على محطة التحلية ضمان أن المياه الصالحة للشرب تلتزم بالمعايير الصحية مع تقليل التأثيرات على البيئة البحرية إلى الحد الأدنى. تجذب محطات تحلية مياه البحر في الجزائر، ولا سيما تلك الموجودة في الحامة، تينيس، هنين، بني صاف، فوكة I وكاب جنات I، اهتمامنا لأنها تنتج في المتوسط 200 000 متر مكعب يوميًا من المياه الصالحة للشرب وتفرغ ضعف هذه الكمية في شكل مياه مالحة في مياه البحر الأبيض المتوسط. تركز الدراسة على عدة جوانب: من جهة، الكشف والمراقبة لمناطق تصريف محطات التحلية باستخدام الصور الفضائية المقدمة من برنامج Google Earth Pro. كما تحلل التفاعل بين تدفق المياه المالحة وسطح الماء من خلال معالجة الصور، مع مراعاة الظروف البحرية المختلفة. من جهة أخرى، تشمل الدراسة تحليل سلوك تدفقات المياه المالحة في المحطات الست باستخدام منهجية التحليل البُعدي. بناءً على الملاحظات، تقترح هذه الدراسة اعتماد أنظمة تصريف مناسبة، مثل أنظمة التوزيع أو تمديد أنابيب التصريف نحو المياه العميقة، للحد من التأثير على النظام البيئي مع تحسين استخدام موارد المياه لمواجهة الطلب المتزايد.

الكلمات المفتاحية: تحلية المياه، مياه البحر، الجزائر، مصانع التحلية، التأثير البيئي، تصريف المياه المالحة، المراقبة عبر الأقمار الصناعية، التحليل البُعدي، النظام البيئي البحري.

Résumé

En raison de la baisse des ressources en eau renouvelable et de l'augmentation de la demande en eau potable, le dessalement de l'eau de mer semble être une solution alternative captivante. Une usine de dessalement doit s'assurer que l'eau potable respecte les normes sanitaires tout en réduisant au minimum les conséquences sur le milieu marin. Les usines de dessalement de l'eau de mer en Algérie, notamment celles d'El Hamma, Ténès, Honaïne, Béni Saf, Fouka I et Cap Djinet I, attirent notre attention, car elles produisent en moyenne 200 000 m³/jour d'eau potable et rejettent le double sous forme de saumure dans les eaux de la Méditerranée. L'étude se concentre sur plusieurs aspects : d'une part, la détection et la surveillance des zones de rejet des usines à l'aide des images satellites fournies par le logiciel Google Earth Pro. Elle analyse également l'interaction entre le jet de saumure et la surface de l'eau à travers le traitement d'images, en tenant compte de diverses conditions marines. D'autre part, elle comprend une analyse du comportement des jets de saumure des six stations grâce à l'approche de l'analyse dimensionnelle. Sur la base des observations, cette enquête suggère l'adoption de systèmes de rejet appropriés, tels que des systèmes de diffusion ou l'extension des tuyaux d'émissaire vers des eaux profondes, pour réduire au minimum l'impact sur l'écosystème tout en optimisant l'utilisation des ressources en eau face à une demande croissante.

Mots clés : Dessalement, Eau de mer, Algérie, Usines de dessalement, Impact environnemental, Rejet de saumure, Surveillance par satellite, Analyse dimensionnelle, Écosystème marin.

Abstract

Due to the decline in renewable water resources and the increase in demand for drinking water, seawater desalination appears to be an attractive alternative solution. A desalination plant must ensure that the drinking water meets health standards while minimizing the impact on the marine environment. The seawater desalination plants in Algeria, particularly those in El Hamma, Ténès, Honaïne, Béni Saf, Fouka I, and Cap Djinet I, draw our attention as they produce an average of 200,000 m³/day of drinking water and discharge twice that amount as brine into the Mediterranean Sea. The study focuses on several aspects: firstly, the detection and monitoring of discharge areas from the plants using satellite images provided by Google Earth Pro. It also analyzes the interaction between the brine jet and the water surface through image processing, taking various marine conditions into account. Secondly, it includes an analysis of the behavior of the brine jets from the six stations using the dimensional analysis approach. Based on the observations, this study suggests adopting appropriate discharge systems, such as diffusion systems or extending outfall pipes to deeper waters, to minimize the impact on the ecosystem while optimizing the use of water resources in response to increasing demand.

Keywords : Desalination, Seawater, Algeria, Desalination plants, Environmental impact, Brine discharge, Satellite monitoring, Dimensional analysis, Marine ecosystem.