

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI – TIZI OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de Fin d'Etudes
de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologie**
Faculté : **Génie de La Construction**
Filière : **Génie Mécanique**
Spécialité : **Energétique**

Intitulé du Thème

Utilisation de l'Imagerie Satellite pour l'Etude des Stations de
Dessalement d'Eau de Mer et des Rejets de Saumure au Moyen-
Orient et en Afrique du Nord

Réalisé par :

Mlle. HAMMAD Ryma

Mlle. BELKACEM Camelia

Encadré par :

M. AMOKRANE Mounir

Mémoire soutenu publiquement le 09/07/2025

Promotion 2024/2025

Remerciements

Avant toute chose, nous rendons grâce à Dieu Tout-Puissant, source de toute sagesse et de toute force, qui nous a accompagnés tout au long de ce parcours, nous a accordé la patience face aux difficultés et nous a permis d'atteindre cet objectif dans les meilleures conditions.

Nous tenons ensuite à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrant, Monsieur Mounir AMOKRANE (Maître de conférences A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou), pour sa précieuse guidance, sa disponibilité et ses conseils avisés tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Son encadrement rigoureux, sa bienveillance et ses encouragements ont été essentiels à l'aboutissement de ce travail.

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce travail, ainsi que pour l'intérêt porté à notre mémoire. Leurs remarques et observations contribueront sans aucun doute à enrichir notre réflexion et à parfaire notre démarche.

Sans oublier à remercier chaleureusement l'ensemble des enseignants que nous avons eu le privilège de rencontrer durant notre formation. Leurs enseignements, leurs conseils, ainsi que leur dévouement ont grandement contribué à notre apprentissage, tant sur le plan académique que personnel.

Enfin, nous tenons à exprimer nos remerciements les plus sincères à notre famille, nos proches et nos amis pour leur soutien moral, leur patience et leur présence indéfectible lors des moments les plus déterminants de notre parcours.

À toutes et à tous, nous vous sommes profondément reconnaissants.

Dédicaces

À Dieu Tout-Puissant,

Je dédie ce travail avec toute ma reconnaissance pour Sa guidance, Sa miséricorde et la force qu'il m'a accordée tout au long de ce parcours.

À mes chers parents,

Je vous dédie ce travail avec toute ma gratitude. Merci pour vos sacrifices, votre patience et votre soutien. Votre confiance et vos prières m'ont porté tout au long de ce parcours. Ce mémoire est aussi le fruit de votre amour et de vos valeurs. Qu'Allah vous récompense pour tout.

À mes grands-parents maternels

À mes grands-parents maternels, bien plus que des grands-parents : mes deuxièmes parents. À ma grand-mère, source de tendresse et de force, et à mon grand-père, exemple de droiture et de soutien. Ce travail vous est dédié, reflet de votre amour et votre foi en moi.

À ma tante maternelle, la seule et unique,

Ce travail t'est dédié avec tout mon amour et ma gratitude. Ta présence a été un vrai soutien, ta tendresse et ton écoute m'ont profondément marqué.

À mes sœurs et à mon petit frère,

Merci pour votre bienveillance et votre soutien qui ont été une force précieuse tout au long de ce chemin.

À mes amis et tous mes enseignants,

Merci pour votre accompagnement et vos encouragements durant ce parcours.

RYMA

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

L'âme de ma grand-mère décédée récemment et à celle de mon grand-père

Mes chers parents

Mon cher frère

Toutes les grandes familles BELKACEM et BENARBANE

Mes amis

Mon encadrant Monsieur AMOKRANE Mounir

Tous les enseignants qui m'ont accompagné durant mes études

*Toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce
travail*

Toute la promotion 2025

CAMELIA

TABLE DE MATIERE

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Liste des tableaux	vi
Liste des figures	viii
Nomenclature	x
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Aperçu du Dessalement de l'eau de mer par la Technologie d'OI et son Adoption dans la Région MOAN	3
I.1 Introduction	3
I.2 Contexte de la ressource en eau dans la région MOAN face à l'émergence du dessalement comme alternative	3
I.3 Généralités sur le dessalement de l'eau de mer.....	6
I.3.1 Définition du dessalement et ses différents procédés	6
I.4 L'Osmose Inverse	9
II.4.1 Définition et principe physique	9
I.4.2 Description d'une installation de dessalement utilisant la technologie d'OI	12
I.4.2.1 Captage de l'eau de mer.....	12
I.4.2.2 Prétraitement	13
I.4.2.3 Unité d'OI.....	13
I.4.2.4 Système de récupération d'énergie	14
I.4.2.5 Post-traitement (Reminéralisation)	15
I.4.2.6 Stockage et distribution.....	15
I.4.2.7 Traitement des rejets de saumure.....	16
I.5 Généralités sur les rejets de saumure : Définition, dynamique classification des rejets de saumure.....	16
I.6 Conclusion.....	18
Chapitre II : Analyse des Stations de Dessalement au MOAN par Imagerie Satellitaire	19
II.1 Introduction	19
II.2 Etat de l'art	19
II.3 Méthodologie.....	20
II.4 Résultats et discussion	21
II.4.1 Évaluation qualitative des infrastructures de dessalement et leurs rejets par Imagerie satellitaire.....	22

II.4.2 Comparaison quantitative des stations de dessalement étudiées.....	39
II.4.2.1 Surface et périmètre des stations	39
II.4.2.2 Capacité de production et consommation énergétique spécifique.....	40
II.4.2.3 Configuration des stations	41
II.4.2.4 Caractéristiques des systèmes de rejet.....	42
II.5 Conclusion	44
Chapitre III : Analyse Dimensionnelle des Rejets de Saumure issus de l'OI.....	45
III.1 Introduction	45
III.2 Principe de la méthode de l'échelle de longueur pour l'étude des rejets de saumure et principales études	45
III.3 Méthodologie.....	47
III.4 Résultats et discussion	49
III.4.1 Influence de la température ambiante sur les caractéristiques du jet	49
III.4.2 Influence de la salinité ambiante sur les caractéristiques du jet.....	51
III.4.3 Influence de l'angle de décharge sur les caractéristiques du jet.....	53
III.4.4 Influence du diamètre de la buse sur les caractéristiques du jet.....	54
III.5 Conclusion	56
Conclusion générale	57
Références bibliographiques	59
Annexes.....	63
Résumé	

LISTES DES FIGURES

Chapitre I

Aperçu du Dessalement de l'eau de mer par la Technologie d'OI et son Adoption dans la Région MOAN

Figure I.1 : Carte géographique de la région MOAN.....	3
Figure I.2 : Niveaux du stress hydrique selon la ressource et selon les usages.....	4
Figure I.3: Principe du procédé de dessalement de l'eau de mer.....	7
Figure I.4: Procédés de dessalement de l'eau de mer.....	7
Figure I.5: Répartition des technologies utilisées pour le dessalement de l'eau.....	9
Figure I.6: L'osmose et l'osmose inverse.....	10
Figure I.7: Représentation du mécanisme de filtration d'une membrane.....	11
Figure I.8: Schéma descriptif d'une installation de dessalement par OI.....	12
Figure I.9: Emissaires de prise d'eau de mer.....	12
Figure I.10: Cuves de prétraitement des eaux.....	13
Figure I.11: Rack d'OI.....	14
Figure I.12: Procédé d'OI avec récupération d'énergie.....	14
Figure I.13: Post-traitement de l'eau de mer (Usine Al Dur, Bahreïn).....	15
Figure I.14: Back de stockage d'eau dessalée.....	15
Figure I.15: Rejet direct de la saumure d'eau dessalée.....	16
Figure I.16: Champ proche et champ lointain dans la dispersion d'un rejet.....	17
Figure I.17: Caractéristiques du rejet de saumure des usines de dessalement (Flux de la flottabilité).....	18

Chapitre II

Analyse des Stations de Dessalement au MOAN par Imagerie Sattelitaire

Figure II.1 : Schéma de la méthodologie de travail adoptée.....	20
Figure II.2 : Interface utilisateur du logiciel Google Earth Pro.....	21
Figure II.3 : Image satellite de la station de dessalement El Hamma.....	25
Figure II.4 : Image satellite de la station de dessalement Ténès.....	26
Figure II.5 : Image satellite de la station de dessalement Chtouka Ait Baha.....	27

Figure II.6 : Image satellite de la station de dessalement Sadara.....	28
Figure II.7 : Image satellite de la station de dessalement Al Dur.....	29
Figure II.8 : Image satellite de la station de dessalement Fujairah F1.....	30
Figure II.9 : Image satellite de la station de dessalement Fujairah F2.....	31
Figure II.10 : Image satellite de la station de dessalement Az-Zour Sud.....	32
Figure II.11 : Image satellite de la station de dessalement Al Ghubrah.....	33
Figure II.12 : Image satellite de la station de dessalement Barka 2.....	34
Figure II.13 : Image satellite de la station de dessalement Barka 4.....	35
Figure II.14 : Image satellite de la station de dessalement Ras Abu Fontas A3.....	36
Figure II.15 : Image satellite de la station de dessalement Umm Al Houl.....	37
Figure II.16 : Diagrammes à barres représentant : a) la répartition des surfaces ; b) la répartition des périmètres par station de dessalement.....	39
Figure II.17 : Diagrammes à barres représentant : a) la capacité de production ; b) la consommation énergétique spécifique des stations de dessalement.....	40
Figure II.18 : Schéma des différentes configurations des stations de dessalement : a) stations associées ou non à des centrales électriques; b) technologies utilisées par station.....	41
Figure II.19 : Rejets de saumure des stations de dessalement :a) émissaires, b) types de conduits, c) matériaux utilisés.....	43

Chapitre III

Analyse Dimensionnelle des Rejets de Saumure issus de l’OI

Figure III.1 : Représentation schématique du jet d’OI selon le modèle de Bleninger.....	46
Figure III.2 : Schéma de la méthodologie de travail adoptée.....	48
Figure III.3 : Interface utilisateur de l’outil « Discharge Plant Calculator » : a) instructions ; b) débits et propriétés des effluents d’OI ; c) caractéristiques des rejets d’OI ; d) propriétés du jet d’OI.....	48
Figure III.4 : Graphique représentant les caractéristiques géométriques en fonction de la température ambiante.....	49
Figure III.5 : Graphique représentant les caractéristiques géométriques en fonction de la salinité ambiante.....	51
Figure III.6 : Graphique représentant les caractéristiques géométriques en fonction de l’angle de décharge.....	53
Figure III.7 : Graphique représentant les caractéristiques géométriques en fonction du diamètre de la buse.....	55

LISTE DES TABLEAUX
Chapitre I

Aperçu du Dessalement de l'eau de mer par la Technologie d'OI et son Adoption dans la Région MOAN

Tableau I.1 : Répartition de la capacité de dessalement dans le monde en 2015.....5

Tableau I.2 : Répartition des coûts totaux des projets d'usines de dessalement dans la région MOAN 2023.....6

Chapitre II

Analyse des Stations de Dessalement au MOAN par Imagerie Satellite

Tableau II.1 : Aperçu géographique et institutionnel des stations de dessalement au MOAN.....22

Chapitre III

Analyse Dimensionnelle des Rejets de Saumure issus de l'OI

Tableau III.1 : Evolution des longueurs caractéristiques en fonction de la température ambiante.....50

Tableau III.2 : Evolution des longueurs caractéristiques en fonction de la salinité Ambiante.....52

Tableau III.3 : Evolution des longueurs caractéristiques en fonction de l'angle de décharge.....53

Tableau III.4 : Evolution des longueurs caractéristiques en fonction du diamètre de la buse.....55

NOMENCLATURE

Symboles	Désignations	Unités
A_0	Section	m^2
C	Concentration molaire de la solution	g/L
D	Diamètre du port de rejet	m
F_0	Nombre de Froude densimétrique	-
H_{a0}	Profondeur moyenne de l'eau au point de rejet	m
J_0	Flux de flottabilité	m^4/s^3
L_M	Echelle de longueur de quantité de mouvement	m
L_Q	Echelle de longueur de rejet	m
M_0	Flux de quantité de mouvement	m^4/s^2
Q_0	Débit volumique	m^3/s
Q_{effex}	Débit de l'effluent mélangé externe	m^3/s
Q_{drink}	Débit d'eau douce	m^3/s
R	Constante des gaz parfaits	$J/mol.K$
Sal_a	Salinité ambiante de l'eau de mer	<i>ppt</i>
Sal_{effex}	Débit de l'effluent mélangé externe	<i>ppt</i>
T	Température absolue	K
T_a	Température ambiante de l'eau de mer	$^{\circ}C$
T_{effex}	Débit de l'effluent mélangé externe	$^{\circ}C$
U_0	Vitesse initiale de décharge de l'effluent	m/s
X_i	Position horizontale du centre du jet au point d'impact	m
X_{max}	Position maximale horizontale du centre du jet	m
Z_i	Profondeur du centre du jet au point d'impact	m
Z_{max}	Hauteur maximale du centre de rejet	m
$Z_{max}(25\%)$	Limite supérieure du panache	m
g	Accélération gravitationnelle	m/s^2

g'_0	Accélération réduite	m/s^2
h_0	Hauteur du port de rejet au-dessus du fond marin	m
i	Coefficient de Van't Hoff	-
n	nombre d'ouvertures	-
r	Eau d'alimentation convertie en perméat	%
$\sqrt{2b}$	Demi-largeur du jet	m

Symboles grecs

π	Pression osmotique	Pa
ρ_0	Densité initiale de l'effluent rejeté	kg/m^3
ρ_a	Densité de l'eau ambiante	kg/m^3
θ_0	Angle d'inclinaison du port de rejet par rapport à l'horizontale	°
θ_b	Angle de pente du fond marin	°

Acronymes

Désignations

CORMIX	Cornell Mixing Zone Expert System
FAO	Organisatioin des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
IWPP	Independent Water and Power Plant
MED	Multi-Effect Distillation
MESRC	Middle East Desalination Research Center
MOAN	Moyen-Orient et Afrique du Nord
MSF	Multi-Stage Flash
OI	Osiose Inverse
ONEE	Office National de l'Electricité et de l'Eau Potable
PEHD	Polyéthylène Haute Densité
PRFV	Plastique Renforcé de Fibres de Verre
QEWC	Qatar Electricity & Water Company
TAQA	Abu Dhabi National Company
WRI	World Resources Institute
WSI	Water Stress Indicator

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est au cœur de toute forme de vie. Elle façonne les paysages, nourrit les écosystèmes, et accompagne chaque étape de l'existence humaine. Présente dans nos gestes les plus simples comme dans les grands équilibres de la planète, elle est bien plus qu'une ressource: elle est un besoin fondamental, universel, irremplaçable. Bien que l'eau couvre plus de 70 % de la surface terrestre, seule une faible proportion est douce et directement exploitable. Sous l'effet de la croissance démographique, de l'urbanisation accélérée et des changements climatiques, la pression sur les ressources en eau douce s'est considérablement accrue. Ce déséquilibre se manifeste fortement dans certaines régions du monde, notamment dans la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MOAN) où la rareté de l'eau devient une préoccupation majeure.

La région MOAN fait face à une pénurie d'eau douce aggravée par un climat aride, des précipitations rares et une forte pression démographique. Face à cette situation, plusieurs pays ont recours au dessalement de l'eau de mer, une solution devenue essentielle pour compenser l'insuffisance des ressources traditionnelles surexploitées. Ce processus requiert des installations techniques bien étudiées et adaptées aux spécificités locales. Parmi les principales technologies mises en œuvre, on retrouve les procédés thermiques, tels que le Multi-Stage Flash (MSF) et le Multi-Effect Distillation (MED), largement employés dans les pays du Golfe. En parallèle, les procédés membranaires, notamment l'osmose inverse, connaissent un essor marqué dans la région MOAN. Bien qu'efficace, cette technologie reste énergivore en raison des pressions élevées nécessaires à son fonctionnement. L'une des préoccupations centrales dans la conception des usines de dessalement concerne la gestion des rejets de saumures. Composés de fortes concentrations en sels et en produits chimiques, ces rejets, s'ils ne sont pas correctement maîtrisés, peuvent engendrer des effets néfastes sur les écosystèmes marins. Il est donc essentiel de concevoir les systèmes de rejet avec rigueur.

Dans un contexte marqué par la diminution des ressources en eau douce et le recours croissant au dessalement dans la région MOAN, ce mémoire développe deux approches complémentaires. La première s'intéresse à l'étude des stations de dessalement par Osmose Inverse (OI) dans cette région, ainsi qu'aux enjeux environnementaux liés aux rejets de saumure, en s'appuyant sur l'imagerie satellite. La seconde étude porte sur l'analyse dimensionnelle des rejets de saumure.

Le présent manuscrit se décline comme suit :

Le chapitre I sera consacré à l'introduction du dessalement de l'eau de mer par la technologie d'osmose inverse et à son adoption dans la région MOAN. Nous commencerons à présenter le contexte hydrique de cette région, confrontée à une pénurie sévère en eau douce, avant d'introduire le dessalement comme solution. Ensuite, nous décrirons les principales technologies de dessalement en mettant l'accent sur l'OI, largement privilégiée dans les pays de la région. Le fonctionnement d'une station de dessalement par cette méthode sera également détaillé, à travers les différentes étapes du traitement de l'eau. Enfin, nous présenterons des généralités sur les rejets de saumures qui constitueront l'objet de ce mémoire.

Dans le chapitre II, nous nous intéresserons à l'analyse des stations de dessalement implantées dans la région MOAN, en ayant recours à l'imagerie satellite. L'utilisation des fonctionnalités spatio-temporelles de Google Earth Pro nous offrira la possibilité d'examiner l'évolution des sites, d'observer leurs structures, de repérer les systèmes de rejet de saumure, d'évaluer les superficies des usines, ainsi que d'appréhender la dispersion des rejets à la surface de la mer.

Le chapitre III portera sur l'analyse dimensionnelle des rejets de saumure à l'aide de la méthode de l'échelle de longueur, complétée par une approche paramétrique. Quatre simulations y seront réalisées, chacune explorant la variation d'un paramètre spécifique : température et salinité de l'eau de mer, angle de décharge et diamètre de la buse, tandis que les autres resteront constants. Nous analyserons ces résultats afin d'évaluer l'impact de ces paramètres sur le comportement des rejets, et de déterminer si leur conception répond aux exigences environnementales du milieu marin ainsi qu'aux normes adéquates en matière de conception des systèmes de rejet.

Enfin, ce mémoire se clôturera par une conclusion générale ouvrant sur des perspectives permettant de limiter l'impact des rejets de saumure. L'objectif est de concilier la nécessité de préserver l'environnement marin avec l'importance croissante du dessalement par OI, qui demeure aujourd'hui une solution stratégique face au déficit en eau douce.

Chapitre I

Aperçu du Dessalement de l'eau de mer
par la Technologie d'OI et son Adoption
dans la Région MOAN

I.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons le dessalement d'eau de mer dans la région MOAN ainsi que ses perspectives de développement. Nous définirons le processus de dessalement et ses principales caractéristiques. Une attention particulière sera portée au procédé d'OI, avec une description détaillée du fonctionnement d'une usine de dessalement utilisant cette technologie en mettant en évidence les différentes étapes du traitement de l'eau.

I.2 Contexte de la ressource en eau dans la région MOAN face à l'émergence du dessalement comme alternative

La région MOAN, désigne un vaste espace s'étendant de l'océan Atlantique au golfe Persique comme le montre la **Figure I.1**. Bien que cette zone concentre environ 57 % des réserves mondiales de pétrole et 46 % de celles de gaz naturel, elle ne dispose que de 1 % des ressources mondiales en eau douce pour une population dépassant 6 % du total mondial, ce déséquilibre accentue fortement la vulnérabilité hydrique de la région [1].

En effet, les pays de la région affichent désormais la plus faible disponibilité en eau par habitant au monde, avec une moyenne annuelle de seulement 480 mètres cubes par personne en 2023 soit moins de 10 % de la moyenne mondiale, un seuil qui correspond à la définition internationale de la pénurie d'eau. Par ailleurs, près de 25 % des habitants de la région résident actuellement dans des zones où les eaux souterraines sont soumises à un niveau de pression élevé, voire critique [2].



Figure I.1 : Carte géographique de la région MOAN [2].

Dans la région MOAN, la pénurie d'eau est aggravée par diverses pressions liées aux activités humaines. La population qui dépasse désormais les 450 millions d'habitants en 2024, croît rapidement, entraînant une forte demande en eau potable notamment dans les zones urbaines en plein essor. Parallèlement, les besoins en eau dans les secteurs productifs augmentent également, l'agriculture en particulier mobilise une part très importante des ressources hydriques, parfois plus de 70 % dans certains pays, tandis que l'essor des activités industrielles et touristiques intensifie cette pression. À cela s'ajoutent des problèmes de

gestion tel que les pertes dues à des réseaux de distribution vieillissants ou mal entretenus, des systèmes d'irrigation peu performants et des tarifs d'eau peu incitatifs, qui limitent les efforts de rationalisation et favorisent le gaspillage [2].

Selon l'indicateur du stress hydrique développé par « Falkenmark » [3], un pays est considéré en situation de stress hydrique lorsque la disponibilité en eau renouvelable par habitant est inférieure à 1700 m³/an, en pénurie en dessous de 1000 m³/an, et en crise hydrique absolue sous le seuil critique de 500 m³/an. De nombreux pays de la région MOAN, comme la Jordanie ou le Qatar, se situent bien en deçà de ces seuils, traduisant une situation de tension hydrique structurelle. À cela s'ajoute le Water Stress Indicator (WSI) [4], utilisé notamment par des institutions comme le World Resources Institute (WRI), qui mesure la pression exercée sur les ressources en eau. Cet indice indique que certains États de la région exploitent plus de 100 % de leurs ressources renouvelables, en ayant recours massivement à des ressources non renouvelables (comme les nappes fossiles) ou à des sources alternatives, telles que le dessalement. D'après l'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), le stress hydrique se mesure à travers deux critères essentiels : la quantité d'eau disponible par an par habitant et le taux de prélèvement de l'eau, en fonction des usages.

La **Figure I.2** présente la définition du stress hydrique référée à l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO). Elle montre deux dimensions du stress hydrique : Stress selon la ressource et stress selon les usagers [5].

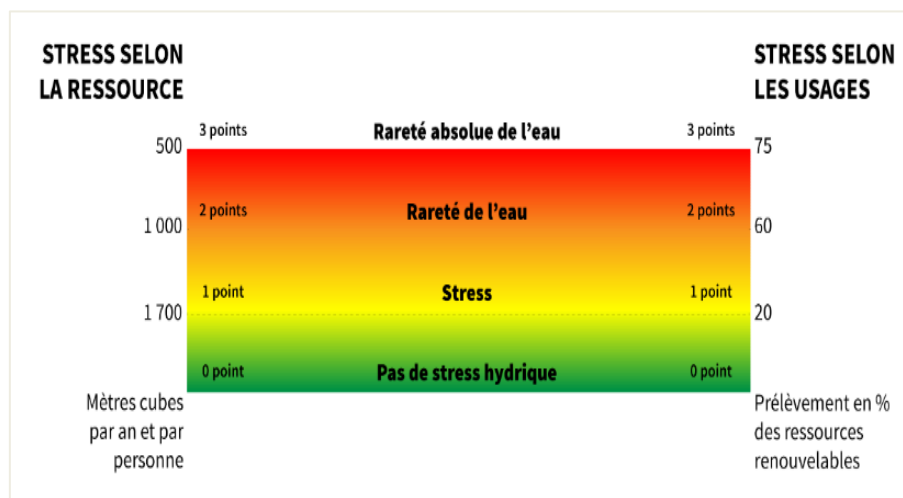


Figure I.2 : Niveaux du stress hydrique selon la ressource et selon les usages [5].

Face à la raréfaction des ressources en eau et à une pression croissante sur les systèmes hydriques [7], de nombreux pays de la région MOAN ont opté pour le dessalement de l'eau de mer, devenu une solution incontournable pour répondre à la demande croissante en eau potable [2]. En effet, la zone MOAN a progressivement fait du dessalement de l'eau de mer une composante essentielle de sa stratégie de résilience hydrique après être confrontée à un déséquilibre croissant entre l'offre et la demande en eau. Ce recours s'est amorcé dès le milieu du 20^e siècle, notamment dans les pays du Golfe où les ressources naturelles sont quasi-inexistantes. Initialement fondé sur des procédés thermiques (MSF et MED), le secteur

Chapitre I Aperçu du Dessalement de l'eau de mer par la Technologie d'OI et son Adoption dans la Région MOAN

s'est tourné au fil des décennies vers l'OI, une technologie à membranes plus souple et moins énergivore [6]. Grâce à l'amélioration de son rendement et à la baisse des coûts de production, cette technique s'est rapidement généralisée. Aujourd'hui, la région MOAN représente environ 50 % de la capacité mondiale de dessalement avec des installations majeures en Arabie saoudite, aux Émirats arabes unis et en Algérie [2].

Sur le **Tableau I.1**, on observe la répartition de la capacité mondiale de dessalement en ligne en 2015, estimée à 74,7 millions de mètres cubes par jour, selon les données de GWI – Desal Data.com. Il illustre clairement que la région MOAN domine largement le secteur avec 46,7 % de la capacité mondiale, reflétant une forte dépendance à cette technologie face à la rareté des ressources en eau douce [7].

Tableau I.1 : Répartition de la capacité de dessalement dans le monde en 2015 [7].

Principales régions du monde	Capacité du dessalement (%)
Amérique du Nord	12.9
Amérique Latine/Caraïbes	4.7
Europe Occidentale	11.2
Europe de l'Est/Asie Centrale	2.6
Asie de l'Est	17.5
Asie du Sud	2.7
Moyen Orient/Afrique du Nord	46.7
Afrique Sub-Saharienne	1.7

Les pays de la région MOAN ont fortement investi dans le dessalement, au point de représenter aujourd'hui plus de 53 % de la capacité mondiale installée. Cette solution désormais incontournable permet de produire de l'eau potable à grande échelle, indépendamment des ressources naturelles. L'Arabie saoudite dépasse les 5,6 millions de m³/jour de capacité, tandis que les Émirats arabes unis approchent les 4 millions de m³/jour. Des projets d'envergure comme l'usine de Rabigh 3 ou celle d'Al Taweelah témoignent de l'ampleur de cette stratégie. En tout, près de 39,3 milliards de dollars ont été mobilisés à l'échelle régionale pour étendre ou construire de nouvelles installations [8]. Les données de répartition des coûts totaux par pays pour l'année 2023 sont présentées dans le **Tableau I.2**.

Tableau I.2 : Répartition des coûts totaux des projets d'usines de dessalement dans la région MOAN 2023[8].

Pays	Cout totale (en milliards USD)
Arabie Saoudite	14.58
Émirats Arabes Unis	10.28
Jordanie	4.20
Egypte	3.26
Oman	3.16
Maroc	2.37
Tunisie	0.95
Algérie	0.21
Koweït	0.13
Autres	0.19

I.3 Généralités sur le dessalement de l'eau de mer

I.3.1 Définition du dessalement et ses différents procédés

Par définition, le dessalement, est une méthode de traitement de l'eau salée visant à en retirer les sels minéraux afin de la rendre propre à la consommation ou à un usage industriel. Cette technique repose sur la séparation des éléments dissous, particulièrement les ions responsables de la forte minéralisation de l'eau. En fonction des procédés employés, différents composants sont extraits de la solution. Le dessalement s'effectue principalement par distillation thermique ou par osmose inverse, cette dernière étant aujourd'hui la technologie la plus répandue en raison de son efficacité sur les plans techniques et économiques. Ce processus reste très énergivore, car il nécessite une quantité importante d'énergie pour briser les liaisons chimiques entre l'eau et les sels que ce soit par évaporation, pression ou filtration avancée, et il est principalement alimenté par des sources de combustibles fossiles à l'heure actuelle (avec environ 76 millions de tonnes de CO₂ émises par an dans le monde) [9]. En outre, il génère un sous-produit appelé saumure, dont la gestion constitue un défi environnemental majeur, notamment lorsqu'elle est rejetée en mer sans traitement adéquat [10]. La **Figure I.3** illustre schématiquement le principe de fonctionnement d'un système de dessalement. On y observe l'alimentation en eau salée, l'apport énergétique nécessaire au procédé, ainsi que la séparation en deux flux distincts: l'un contenant de l'eau douce traitée, l'autre constitué de saumure hautement concentrée.

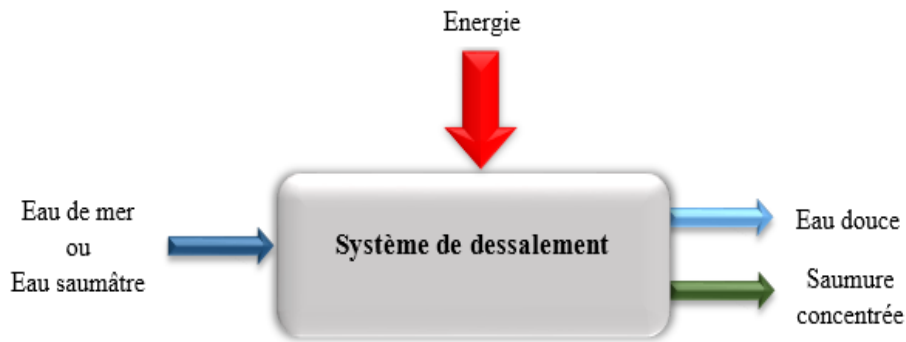


Figure I.3 : Principe du procédé de dessalement de l'eau de mer [9].

Le secteur du dessalement regroupe trois (03) catégories de traitement des eaux salines, classées selon le procédé technique employé [11]:

- Les procédés de distillation (thermiques).
- Les procédés membranaires.
- Les procédés chimiques.

La **Figure I.4** illustre les différentes méthodes utilisées dans le traitement de l'eau salée par dessalement. Deux approches principales y sont représentées : les procédés thermiques, basés sur la distillation et les procédés membranaires, qui reposent sur la séparation par barrière physique [11].

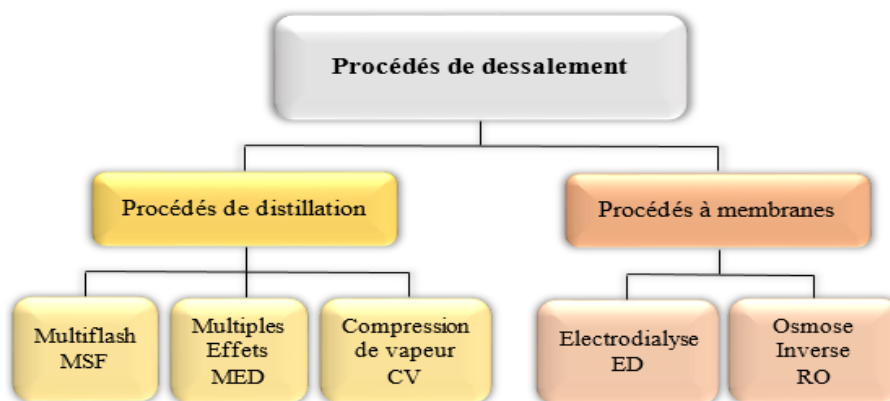


Figure I.4 : Procédés de dessalement de l'eau de mer [11].

La distillation est un procédé thermique de dessalement anciennement utilisé qui chauffe l'eau salée pour en récupérer la vapeur, ensuite condensée en eau douce, séparée des sels. On retrouve [11] :

- **La distillation multi-effets (MED) :** qui enchaîne plusieurs étapes d'évaporation sous pression réduite pour optimiser la consommation d'énergie.
- **La distillation multi-stage flash (MSF) :** qui repose sur une succession de chambres à pression décroissante provoquant une évaporation instantanée de l'eau chaude.
- **Compression de vapeur :** où la vapeur produite est recyclée via un compresseur pour chauffer l'eau à nouveau.

Les procédés membranaires sont des techniques de séparation utilisant des membranes semi-perméables pour filtrer l'eau des sels et impuretés, sans changement d'état. Couramment utilisés pour dessaler l'eau de mer ou saumâtre, ils incluent plusieurs méthodes selon le niveau de filtration souhaité [12]. On distingue:

- **L'électrodialyse:** basé sur l'utilisation d'un champ électrique pour séparer les ions dissous (comme le sodium, le calcium, le chlorure, etc.) de l'eau [12].
- **L'osmose inverse:** est basée sur l'application d'une pression élevée pour forcer l'eau à travers une membrane semi-perméable, retenant ainsi les sels et impuretés. Il s'agit de la méthode la plus largement utilisée pour le dessalement pour ses nombreux avantages [12].

L'OI connaît une adoption croissante à l'échelle mondiale et s'est imposée comme la méthode privilégiée pour le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre. Elle représente aujourd'hui près de 60 % des procédés utilisés dans les installations de dessalement, en raison de son efficacité énergétique et de sa capacité à produire une eau de haute qualité. On estime que cette technologie permet la production de plus de 80 millions de mètres cubes d'eau douce par jour dans le monde, avec une consommation énergétique moyenne comprise entre 3 et 4 kWh par m³ d'eau produite, selon les performances des membranes et les systèmes de récupération d'énergie intégrés [12]. Dans la région MOAN, où la rareté de l'eau est accentuée par un climat sec et des ressources limitées, l'OI s'impose comme une solution essentielle [2]. La **Figure I.5** met en évidence la répartition des différentes technologies appliquées au dessalement de l'eau de mer et révèle clairement une nette prédominance de l'OI, qui s'impose comme la technologie la plus largement utilisée à l'échelle mondiale.

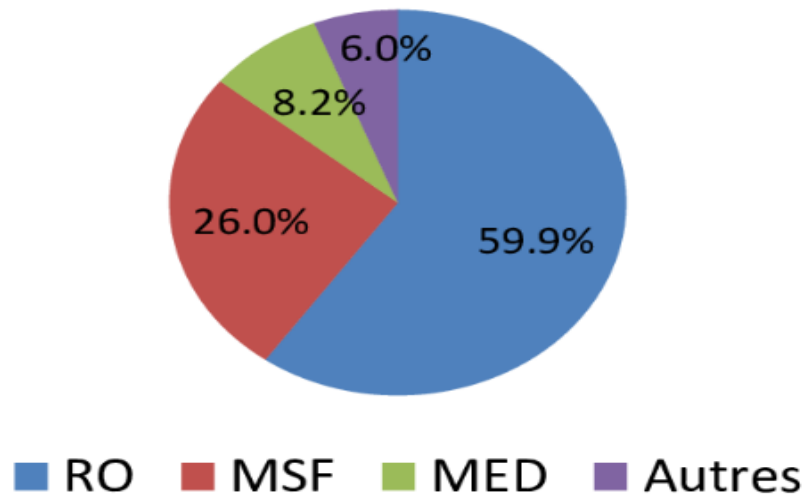


Figure I.5 : Répartition des technologies utilisées pour le dessalement de l'eau [13].

I.4 L'Osmose Inverse

II.4.1 Définition et principe physique

L'OI, qui fait l'objet de notre étude, est une technique de séparation consistant à extraire les sels dissous de l'eau à l'aide des membranes semi-perméables soumises à une forte pression (comprise entre 54 et 80 bars pour l'eau de mer). Ce procédé s'opère à température ambiante sans provoquer de changement d'état de l'eau. Les membranes polymères employées permettent uniquement le passage des molécules d'eau tout en bloquant les particules, les sels et les molécules organiques de taille supérieure à 10^{-7} mm. Il s'agit d'un procédé qui nécessite principalement une consommation d'énergie électrique, utilisée essentiellement pour alimenter les pompes à haute pression. L'eau obtenue par ce procédé contient généralement une faible concentration en sels, avoisinant $0,5 \text{ g/L}$ [14].

L'osmose repose sur le principe fondamental de l'équilibre des concentrations. Lorsqu'on met en contact deux liquides ayant des concentrations différentes en solutés dissous, ceux-ci tendent à se répartir uniformément. Si ces liquides sont séparés par une membrane semi-perméable, l'eau se déplace naturellement du côté où la concentration en solutés est la plus faible vers celui où elle est la plus élevée. Avec le temps, ce transfert d'eau provoque une élévation du niveau d'un côté de la membrane, créant ainsi une différence de pression appelée « pression osmotique » [12].

Tandis que l'OI, repose sur l'application d'une pression importante exercée sur une eau salée ou saumâtre, afin de la faire traverser par une membrane semi-perméable. Celle-ci agit comme un filtre sélectif, retenant les sels et les impuretés tout en laissant passer uniquement les molécules d'eau. Contrairement au processus d'osmose naturelle, où l'eau migre vers la zone la plus concentrée en sels, ici le mouvement est inversé par la pression, permettant de produire de l'eau douce à partir d'eau salée. Le taux d'élimination correspond

au pourcentage de réduction de la salinité totale: il dépasse 92 % pour l'eau saumâtre et atteint plus de 98,5 % pour l'eau de mer [12].

L'écoulement se fait de manière continue et parallèle à la surface de la membrane. Le flux initial de la solution à traiter (débit Q_i) se sépare au contact de la membrane en deux fractions distinctes présentant des concentrations différentes [12]:

- Une fraction de la solution traverse la membrane, appelée perméat, correspondant au débit Q_p .
- Une portion de la solution appelée concentrât (débit Q_c), ne franchit pas la membrane, elle renferme les particules ou molécules retenues lors du processus de séparation.

La **Figure I.6** représente de manière schématique les phénomènes d'osmose et d'osmose inverse, à travers des compartiments contenant de l'eau douce et de l'eau salée séparés par une membrane semi-perméable, où l'on distingue clairement les mouvements d'eau entre les deux milieux en fonction des différences de concentration et de pression.

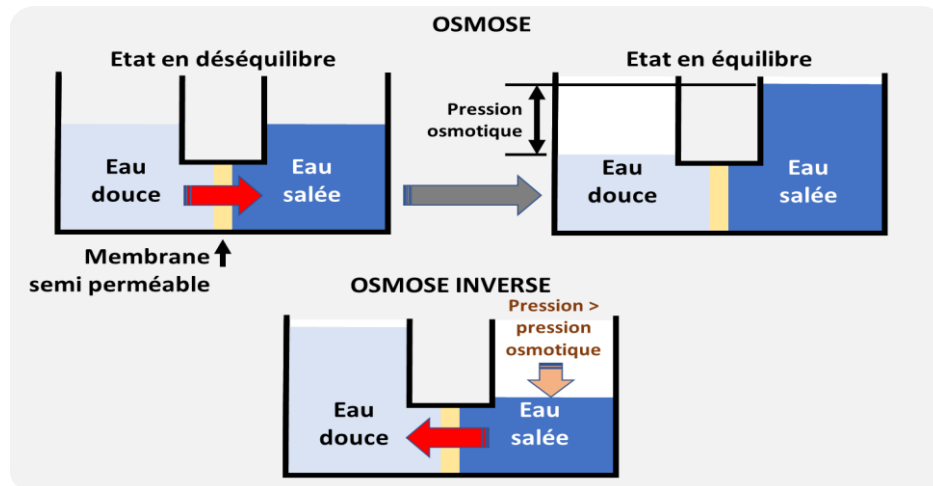


Figure I.6 : L'osmose et l'osmose inverse [15].

La pression osmotique qui rentre dans le principe d'OI, représente la force minimale qu'il faut exercer sur une solution pour empêcher le passage spontané du solvant pur à travers une membrane semi-perméable. Elle traduit l'équilibre entre les mouvements de diffusion du solvant et la concentration des solutés dissous [15].

La pression osmotique, selon la loi de Van't Hoff, est comparable à la pression qu'un soluté exercerait s'il était à l'état de gaz parfait dans les mêmes conditions de volume et de température. Si le soluté se dissocie en plusieurs ions, cette pression augmente proportionnellement au nombre de particules libérées, soit un facteur « i » [15]:

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

Où :

- π est la pression osmotique (en pascal/bar).
- i est le coefficient de Van't Hoff (qui dépend du nombre de particules générées en solution).
- C est la concentration molaire de la solution (mol/L).
- R est la constante des gaz parfaits (8,314 J/mol·K).
- T est la température absolue en kelvins (K).

Pour une solution salée, on peut approximativement estimer la pression osmotique à raison de 0,7 bar par gramme de sel dissous par litre, selon la relation :

$$\pi = 0,7 \times C \quad [\text{bar}] \quad (\text{I.2})$$

La membrane semi-perméable utilisée dans l'OI est un matériau synthétique microporeux dont la structure permet le passage sélectif des molécules d'eau tout en bloquant les sels dissous, les ions, les particules en suspension et certains contaminants organiques. Elle agit comme une barrière physique à l'échelle moléculaire **Figure I.7**, généralement constituée de polymères tels que le polyamide [9]. Ses principales caractéristiques techniques incluent [12]:

- Une taille de pores extrêmement fine de l'ordre de 0,0001 micron permettant une rétention efficace des éléments dissous.
- Une résistance à des pressions élevées souvent supérieures à 50 bars nécessaires pour inverser le flux osmotique naturel.
- Une capacité de rejet des sels allant de 95% à plus de 99,8 % en fonction de la qualité de la membrane et du type d'eau traitée (saumâtre ou de mer).

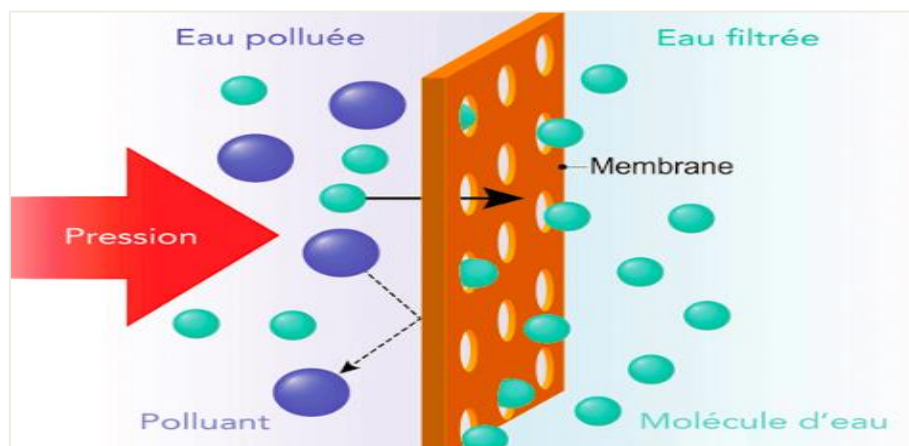


Figure I.7 : Représentation du mécanisme de filtration d'une membrane [9].

I.4.2 Description d'une installation de dessalement utilisant la technologie d'OI

Une station de dessalement par OI suit un fonctionnement structuré qui passe par sept (07) étapes clés comme représentée sur la **Figure I.8**, garantissant une transformation efficace de l'eau de mer en une ressource douce essentielle à la vie [11]:

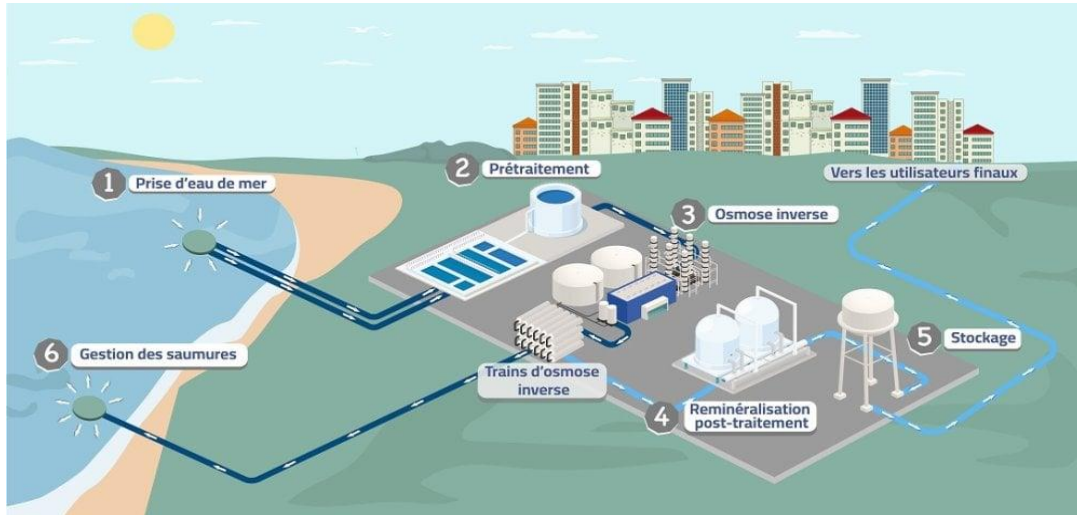


Figure I.8 : Schéma descriptif d'une installation de dessalement par OI [16].

I.4.2.1 Captage de l'eau de mer

Le processus démarre par le captage de l'eau salée, le plus souvent effectué à proximité immédiate du littoral. Ce prélèvement s'effectue via des systèmes d'aspiration immergés ou des puits côtiers, conçus pour minimiser l'entrée des matières en suspension et préserver l'intégrité écologique de l'environnement marin. L'eau collectée représente la matière première essentielle à tout le cycle de dessalement, car elle alimente les différentes étapes de traitement menant à l'obtention d'une eau douce utilisable. [11].



Figure I.9 : Emissaires de prise d'eau de mer [17].

I.4.2.2 Prétraitement

La phase de prétraitement constitue une étape critique dans le processus de dessalement par OI, visant à protéger les membranes en aval. Elle débute par un dégrillage grossier, suivi d'une clarification destinée à éliminer les matières en suspension telles que le sable, les débris organiques ou les sédiments lourds présents dans l'eau de mer brute. Cette étape est souvent complétée par une coagulation-floculation, permettant d'agglomérer les fines particules en floccs plus faciles à filtrer. Ensuite, une microfiltration ou une ultrafiltration est mise en œuvre pour capter les contaminants de plus petite taille, notamment les micro-algues, les colloïdes et les micro-organismes pathogènes. Ce traitement en amont est indispensable pour éviter le colmatage des membranes d'osmose inverse, garantir leur performance à long terme et prolonger leur durée de vie. [11].



Figure I.10 : Cuves de prétraitement des eaux [18].

I.4.2.3 Unité d'OI

Cette étape repose sur l'utilisation des membranes semi-perméables spécialement conçues pour ne laisser passer que les molécules d'eau, ces membranes agissent comme une barrière physique extrêmement fine, dont les pores de l'ordre de 0,1 nanomètre empêchent le passage des ions (Na^+ , Cl^-), des matières organiques, des micro-organismes et d'autres contaminants dissous. Pour inverser le flux osmotique naturel, l'eau de mer est soumise à une pression mécanique élevée généralement comprise entre 55 et 80 bars, bien au-dessus de la pression osmotique moyenne de l'eau de mer (environ 27 bars). Ce différentiel de pression force l'eau pure à traverser la membrane, tandis que les substances indésirables sont retenues du côté opposé.

Le liquide purifié obtenu devient de l'eau potable ou s'approche des normes de qualité requises après un éventuel post-traitement, quant à la solution résiduelle appelée saumure, est fortement concentrée en sels et représente entre 40 à 60 % du volume initial d'eau. Cette

saumure est ensuite isolée pour être soit rejetée, soit réutilisée ou traitée selon les réglementations environnementales [12].



Figure I.11 : Rack d'OI [19].

I.4.2.4 Système de récupération d'énergie

Les systèmes de récupération d'énergie sont intégrés directement à la phase membranaire du dessalement par OI. Ils récupèrent l'énergie du concentrât sous pression après son passage à travers les membranes, afin de la réinjecter dans le flux d'alimentation. Grâce à des dispositifs comme les échangeurs isobares ou les convertisseurs hydrauliques, ces systèmes permettent de réduire la consommation énergétique spécifique à environ 2,5–3,5 kWh/m³, contre plus de 6 kWh/m³ sans récupération. Cette optimisation est essentielle pour améliorer la performance énergétique globale du procédé [13]. 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 % [30].

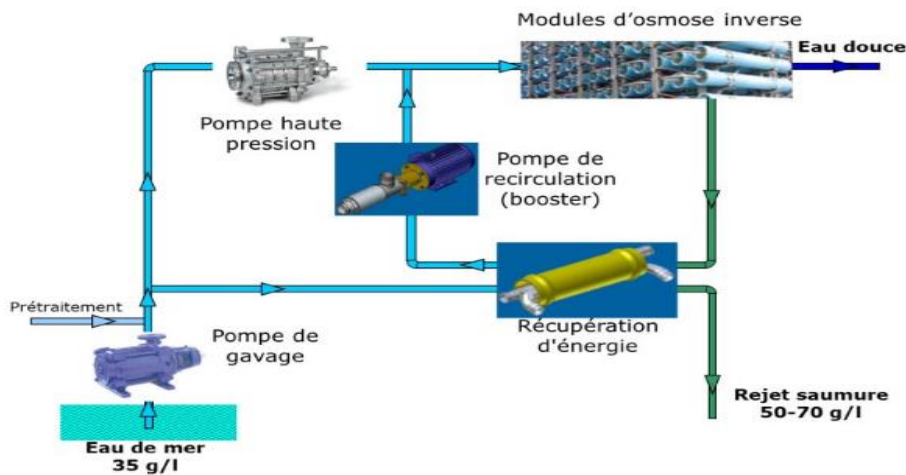


Figure I.12 : Procédé d'OI avec récupération d'énergie [20].

I.4.2.5 Post-traitement (Reminéralisation)

Après le processus d'OI, l'eau filtrée bien que potable peut manquer de certains minéraux nécessaires à l'équilibre de son PH et à sa qualité globale, le post-traitement a donc pour but d'ajuster le PH, généralement acide après osmose, en le stabilisant à des niveaux optimaux (environ 7,5 à 8). Ce processus élimine aussi les traces de produits chimiques résiduels qui pourraient subsister, assurant ainsi une eau sûre et agréable à consommer. La phase clé de la reminéralisation consiste à réintroduire des minéraux essentiels tels que le calcium et le magnésium, afin d'améliorer la valeur nutritive de l'eau. Ces minéraux, souvent ajoutés sous forme de sels dissous ne se contentent pas d'enrichir l'eau d'un goût plus naturel, mais apportent également des bienfaits pour la santé cardiovasculaire et osseuse [11].



Figure I.13 : Post-traitement de l'eau de mer (Usine Al Dur, Bahreïn) [18].

I.4.2.6 Stockage et distribution

L'eau rendue potable par dessalement ne peut être consommée directement après traitement, elle est donc stockée dans des réservoirs conçus spécialement à cet effet. Ces installations jouent un rôle important en régulant l'approvisionnement selon les variations de la demande, assurant ainsi une distribution continue à la population. En définitive, ce système de stockage et de distribution permet de garantir l'accès permanent à l'eau douce via des réseaux hydrauliques et des systèmes de pompage [11].



Figure I.14 : Back de stockage d'eau dessalée [21].

I.4.2.7 Traitement des rejets de saumure

Cette étape essentielle dans le dessalement concerne le traitement du concentrât salin rejeté après OI. Cette solution hautement concentrée en sels dissous et en agents chimiques utilisés durant le traitement doit être évacuée avec rigueur afin de minimiser son impact sur les écosystèmes marins. Le rejet s'effectue le plus souvent en mer via des systèmes de diffuseurs multiports, installés en bout de conduite sous-marine. Ces dispositifs mécaniques sont spécialement conçus pour favoriser une dispersion rapide et homogène de la saumure dans la colonne d'eau, réduisant ainsi sa salinité à un niveau tolérable dès sa sortie. Alternativement, dans les zones arides, le concentrât peut être dirigé vers des bassins d'évaporation solaire, où l'eau s'évapore naturellement, laissant place à des résidus solides potentiellement valorisables. Certaines installations plus avancées exploitent également des procédés de récupération pour extraire du lithium, du magnésium ou d'autres éléments présents à l'état dissous [22].



a) Emissaire marin avec diffuseur multiports



b) Emissaire marin avec buse simple

Figure I.15 : Rejet direct de la saumure d'eau dessalée [24].

I.5 Généralités sur les rejets de saumure : Définition, dynamique classification des rejets de saumure

Les rejets de saumure correspondent à l'eau résiduelle fortement salée issue du dessalement de l'eau de mer. Ce sous-produit liquide, principalement généré par les systèmes à OI, est riche en sels et en minéraux dissous. En moyenne, La saumure rejetée représente 50 à 60 % de l'eau d'alimentation avec une proportion variant selon la technologie, pour le cas de l'osmose inverse elle se situe entre 45 et 60 %. Ainsi, pour chaque mètre cube d'eau douce produite, entre 0,5 et 1,5 m³ de saumure sont évacués. Sa salinité peut atteindre de 65 à 85 g/L, soit près du double de celle de l'eau de mer naturelle estimée à 35 g/L [8].

L'analyse du comportement de la saumure en mer permet de mieux comprendre ses impacts environnementaux et d'adapter les mesures de gestion. Elle s'appuie principalement sur l'étude de deux zones: le champ proche et le champ lointain autour du point de rejet. Le champ proche représente la zone proche du rejet est située juste à l'endroit où la saumure est

déversée. Elle se distingue par un mélange rapide et intense, dû à la turbulence générée par le jet de saumure, influencée par la conception du système, les caractéristiques de l'effluent et les conditions locales. Ce mélange se produit à petite échelle, facilitant une dilution efficace dans l'eau de mer. En s'éloignant du point de rejet, la saumure entre dans la zone dite du champ lointain où elle s'écoule lentement vers le fond marin sous l'effet de la gravité. Dans cette région, le mélange dépend surtout des facteurs naturels comme la topographie sous-marine, les courants, les vagues et la différence de densité avec l'eau environnante. Contrairement au champ proche, la dilution y est plus lente et se produit à plus grande échelle [23], la **Figure I.16** illustre la modélisation combinée du champ proche et du champ lointain dans le cadre de la dispersion d'un rejet de saumure en mer.

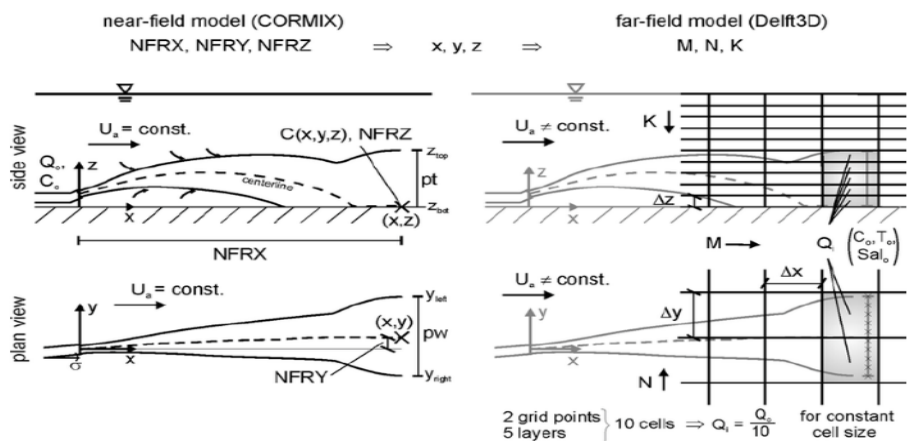


Figure I.16 : Champ proche et champ lointain dans la dispersion d'un rejet [23].

La dispersion de la saumure en mer dépend principalement de la flottabilité du rejet et des courants marins, ces derniers influencent sa dilution ou son accumulation selon leur force et leur direction. Quant à la flottabilité, elle détermine si la saumure s'enfonce ou remonte partiellement, selon sa densité, la température et la dynamique du jet. On distingue alors les rejets à flottabilité négative et rejets à flottabilité positive comme montré sur la **Figure I.17**.

- **Un rejet à flottabilité négative:** désigne une situation où la saumure rejetée en mer est plus dense que l'eau environnante, en raison de sa forte salinité. Cette différence de densité provoque la descente du panache vers le fond marin, ce qui peut accentuer ses effets sur les écosystèmes benthiques. Ce type de rejet est généralement observé dans le cas des technologies de dessalement par OI [14].
- **Un rejet à flottabilité positive:** Un rejet à flottabilité positive se produit lorsque la saumure, en raison de sa température plus élevée ou d'une densité plus faible que celle de l'eau environnante a tendance à remonter vers la surface après son déversement en mer. Ce comportement influence la manière dont elle se mélange avec l'eau de mer et peut étendre son impact à des zones plus larges en surface [14].

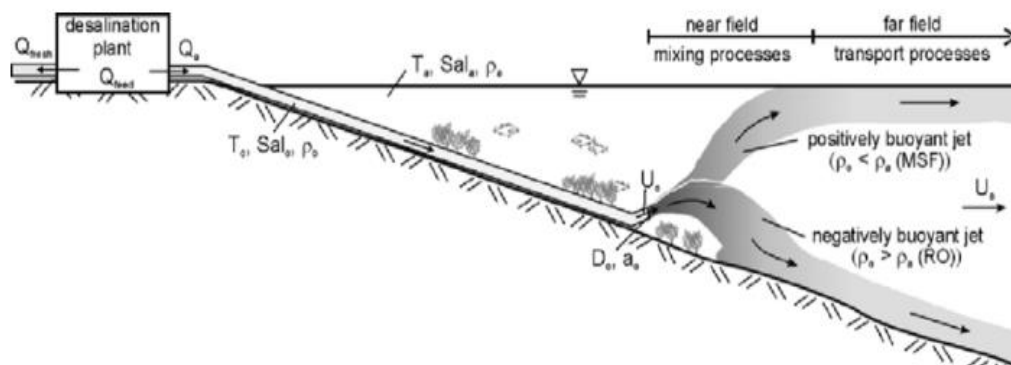


Figure I.17 : Caractéristiques du rejet de saumure des usines de dessalement (Flux de la flottabilité) [14].

I.6 Conclusion

Ce chapitre a mis en lumière la gravité de la crise hydrique dans la région MOAN, où le déficit structurel en ressources en eau impose un recours massif à des technologies alternatives. Dans ce contexte, l'OI s'affirme comme une réponse stratégique, en particulier pour les pays aux littoraux étendus mais aux ressources douces limitées. Cette technologie s'est imposée comme une solution de référence grâce à sa capacité à produire de grandes quantités d'eau potable à partir d'eau de mer, avec une efficacité de séparation élevée et une adaptabilité aux différents types d'eau salée.

En conclusion, le dessalement par OI constitue aujourd'hui une solution efficace qui combine disponibilité technologique, qualité de l'eau produite et optimisation des coûts énergétiques, grâce aux progrès en récupération d'énergie et en performances membranaires. Son succès repose sur une approche intégrée, mêlant innovation et efficacité énergétique, pour garantir une production d'eau durable dans les régions arides.

Chapitre II

Analyse des Stations de Dessalement au
MOAN par Imagerie Satellitaire

II.1 Introduction

Ce chapitre aura pour objectif d'exploiter l'imagerie satellitaire, ce qui permettra d'étudier avec précision les treize (13) stations de dessalement d'eau de mer visées dans notre projet, dont : dix (10) au Moyen Orient et trois (03) en Afrique du Nord. A travers le traitement d'images et l'analyse comparative, nous viserons à évaluer les caractéristiques et la performance de ces installations.

II.2 Etat de l'art

Comme expliqué précédemment, la région MOAN doit recourir au dessalement de l'eau de mer pour répondre à ses besoins en eau potable.

L'OI y est largement utilisée en raison de son efficacité énergétique et de sa capacité de production élevée [26]. Parallèlement, les progrès dans le domaine de la télédétection et de l'imagerie satellite permettent aujourd'hui de surveiller à distance les infrastructures, y compris les stations de dessalement. Ces outils offrent une vision globale et actualisée, utile pour la cartographie, le suivi de l'urbanisation côtière ou encore l'évaluation des impacts environnementaux.

La région MOAN concentre un grand nombre de stations de dessalement, notamment dans les pays du Golfe (Arabie Saoudite, Émirats Arabes Unis), mais aussi en Afrique du Nord, avec des infrastructures importantes en Algérie et au Maroc. Ces stations sont souvent situées sur les littoraux, et leur expansion est liée à la pression croissante sur les ressources hydriques [26].

L'imagerie satellitaire permet d'identifier ces stations, d'observer leur évolution au fil du temps et d'analyser leur environnement immédiat (zones, décharges de saumures, infrastructures...).

Dans ce sens, plusieurs études antérieures ont été consacrées à l'analyse des stations de dessalement à l'aide de l'imagerie satellitaire. Parmi elles, nous citons quelques travaux récents, que nous présentons ci-dessous.

La dispersion des panaches de saumure issus de la station de dessalement d'El Hamma (Algérie) a été étudiée par *Amokrane et Salmi* à l'aide de l'imagerie satellitaire fournie par Google Earth Pro[27]. Leur étude a permis de visualiser et d'analyser la dynamique de dispersion des rejets en mer, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des effets environnementaux des rejets de saumure. *Naimi et al.* [28] ont élargi cette approche à l'échelle nationale, en combinant données techniques et imagerie satellite pour étudier les impacts environnementaux du dessalement de l'eau de mer. Leur travail propose des mesures d'atténuation pour limiter les effets des rejets de saumure sur les écosystèmes marins.

De manière similaire, *Remini et Amitouche* [29] ont exploré la durabilité de dessalement en Algérie en utilisant Google Earth Pro pour analyser la sélection stratégique des sites de captage et de rejet, montrant qu'il est important de bien choisir où installer les stations et rejeter la saumure pour protéger l'environnement.

Récemment, *Yousfi et Chedik* [30] ont travaillé sur l'identification et l'analyse des stations de dessalement par osmose inverse en Algérie à partir des données satellitaires. Ce travail a permis de mettre en évidence la faisabilité et l'intérêt d'une telle approche pour le suivi des installations hydrauliques.

S'inscrivant dans la continuité des travaux précédents, notre travail élargit le champ d'analyse aux stations de la région MOAN, où nous allons identifier et comparer plusieurs stations de dessalement, en gardant pour l'Afrique du Nord deux stations algériennes déjà étudiées, ainsi qu'une station marocaine nouvellement intégrée à l'analyse.

II.3 Méthodologie

Notre travail consiste à l'identification et à la comparaison de plusieurs stations de dessalement situées dans la région MOAN.

Dans un premier temps, nous avons mené une recherche approfondie pour collecter des informations sur différentes stations, en nous basant sur des sources variées telles que des articles scientifiques, des rapports techniques et des sites officiels. Cette étape s'est révélée particulièrement difficile en raison du manque d'accès à des données complètes, récentes et fiables, ainsi qu'à la dispersion des informations entre plusieurs sources. Une fois les données collectées, nous les avons analysées selon plusieurs critères tels que la technologie utilisée, la capacité de production et l'impact environnemental notamment le rejet de saumure.

L'analyse a été enrichie par l'exploitation d'images satellites, qui nous a permis d'identifier visuellement les principales installations de chaque station avant de les comparer.

Pour compléter cette description, la **Figure II.1** récapitule les principales étapes du travail.

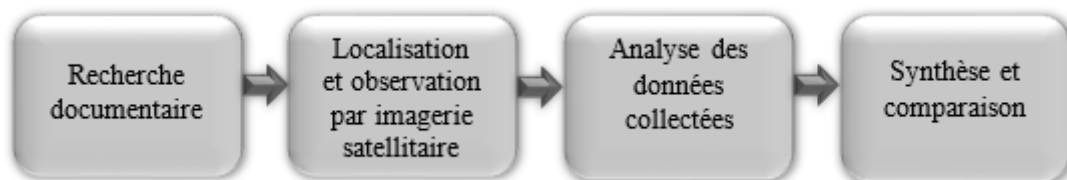


Figure II.1 : Schéma de la méthodologie du travail adoptée.

Dans le but de compléter notre analyse, un traitement d'images a également été réalisé, visant à améliorer la détection des rejets de saumure en mer en mettant en évidence les zones de dispersion à partir des sorties visibles des stations.

L'échantillon étudié comprend plusieurs stations de dessalement par OI situées dans différentes parties de la région MOAN. Le principal critère de sélection a été la capacité de production, en ciblant les stations dont la production soit proche de 200 000 m³/jour. Afin d'assurer une cohérence dans l'échelle d'analyse. Nous avons retenu pour notre analyse, les stations suivantes :

- En Afrique du Nord : El Hamma (Algérie), Ténès (Algérie) et Chtouka Ait Baha (Maroc) ;
- Au Moyen-Orient : Sadara (Arabie Saoudite), Al Dur (Bahreïn), Fujairah F1 (Emirats Arabes Unis), Fujairah F2 (Emirats Arabes Unis), Az-Zour Sud (Koweït), Al Ghubrah (Oman), Barka 2 (Oman), Barka 4 (Oman), Ras Abu Fontas A3 (Qatar) et Umm Al Houl (Qatar).

Pour pouvoir réaliser notre travail, nous avons utilisé l'outil Google Earth pro [31] qui est un logiciel de géocartographie. C'est une mappemonde virtuelle qui permet de visualiser la totalité de la surface de la terre à un degré de précision plus ou moins élevé selon le lieu géographique, à partir d'images satellites et de photographies aériennes [32]. Grâce à ses images satellites, nous étions en mesure de localiser précisément chaque station, de visualiser leur environnement immédiat et d'identifier les différentes installations présentes sur les sites telles que les unités de dessalement, les zones de rejet des saumures.

La **Figure II.2** présente l'interface de Google Earth Pro, telle qu'utilisée lors de notre étude.

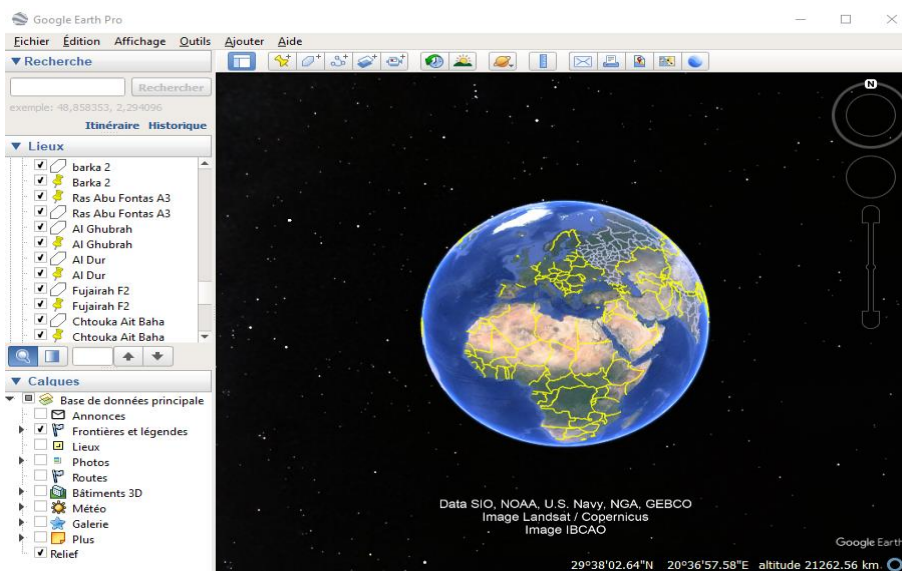


Figure II.2 : Interface utilisateur du logiciel Google Earth Pro [31].

II.4 Résultats et discussion

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de cette étude. En premier lieu on commence par présenter les détails des stations de dessalement sélectionnées, en nous appuyant sur les images satellites annotées pour identifier les principales composantes de chaque station (prétraitement, unités d'OI, post-traitement, rejets de saumure).

En second lieu, nous allons présenter les résultats sous formes de graphiques pour effectuer une comparaison technique entre les stations, en prenant compte des éléments dimensionnels, la capacité de production, la consommation énergétique, ainsi que la configuration des stations et les systèmes de rejet.

II.4.1 Évaluation qualitative des infrastructures de Dessalement et leurs rejets par Imagerie satellitaire

Le **Tableau II.1** présente les principales caractéristiques techniques, géographiques et partenariales de plusieurs stations de Dessalement situées dans la région MOAN.

Tableau II.1 : Aperçu géographique et institutionnel des stations de Dessalement au MOAN.

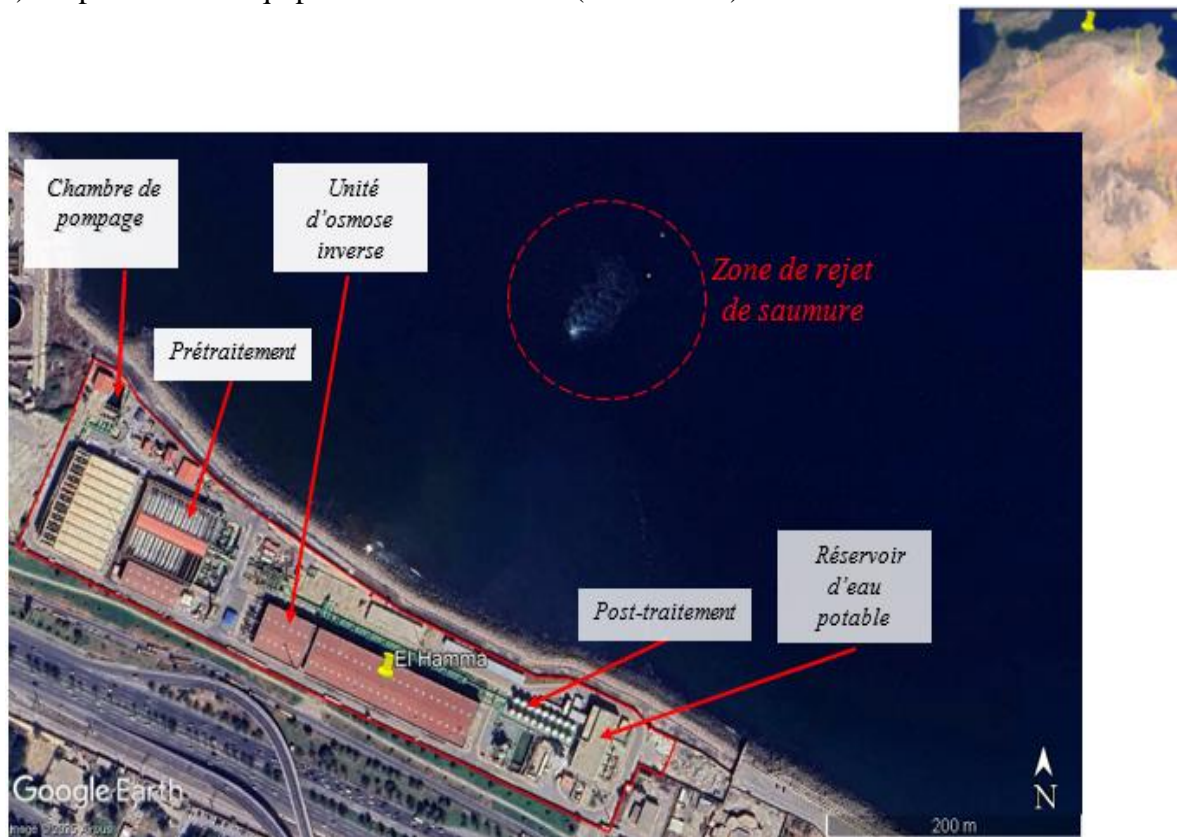
Stations	Caractéristiques des stations
El Hamma (Algérie)	<p>Capacité de production : 200 000 m³/jour d'eau potable [27].</p> <p>Localisation : Hamma, Hussein-Dey, Alger, Algérie 36°45'5.47''N, 3°4'46.52''E [31].</p> <p>Partenariat : GE Ionics « General Electric » (70%), Algerian Energy Company « AEC formée par Sonatrach et Sonelgaz » (30%) [33].</p>
Ténès (Algérie)	<p>Capacité de production : 200 000 m³/jour d'eau potable [30].</p> <p>Localisation : Ténès, Chlef, Algérie, 36°30'13.74''N, 1°13'39.90''E [31].</p> <p>Partenariat : Sonatrach et Sonelgaz (49%), Abengoa (Espagne) (51%) [30].</p>
Chtouka Ait Baha (Maroc)	<p>Capacité de production : 275 000 m³/jour d'eau potable et d'irrigation [34].</p> <p>Localisation : Chtouka Ait Baha, Agadir, Maroc, 30°8'11.60''N, 9°38'55.84''O [31].</p> <p>Partenariat : Partenariat public (49%), partenariat privé (51%). - Public : Office National de l'Electricité et de l'Eau potable « ONEE », Ministère de l'Agriculture. - Privé : Abengoa (Espagne), IfraMaroc et Aman El Baraka [35].</p>
Sadara (Arabie Saoudite)	<p>Capacité de production : 178 650 m³/jour d'eau industrielle [36].</p> <p>Localisation : Sadara, Jubail, Ash Sharqiyah, Arabie Saoudite,</p>

	<p>26°56'39.53''N, 49°28'36.33''E [31].</p> <p>Partenariat : SADARA Chemical Company, Marafiq, Veolia Water Technology [36].</p>
Al Dur (Bahreïn)	<p>Capacité de production : 218 000 m³/ jour d'eau potable [37].</p> <p>Localisation : Près de la ville de Zallaq, sur la côte Sud-Est du Royaume de Bahreïn,</p> <p>25°58'16.55''N, 50°36'24.20''E [31].</p> <p>Partenariat : International Power GDF SUEZ (100%) [37].</p>
Fujairah F1 (Emirats Arabes Unis)	<p>Capacité de production : 171 000 m³/ jour d'eau potable [38].</p> <p>Localisation : Qidfa, Fujairah, Abu Dhabi, Emirats Arabes Unis, 25°18'51.27''N, 56°22'17.34''E [31].</p> <p>Partenariat : TAQA (60%), Sembcorp (40%) [38].</p>
Fujairah F2 (Emirats Arabes Unis)	<p>Capacité de production : 136 500 d'eau potable [39].</p> <p>Localisation : Qidfa, Fujairah, Abu Dhabi, Emirats Arabes Unis, 25°18'5.59°N, 56°22'13.00°E [31].</p> <p>Partenariat : TAQA (60%), ENGIE (20%), MARUBENI (20%) [39].</p>
Az-Zour Sud (Koweït)	<p>Capacité de production : 136 450 m³/jour d'eau potable [40].</p> <p>Localisation : Zour, Al Ahmadi, Koweït, 28°42'47.17''N, 48°22'50.53''E [31].</p> <p>Partenariat :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Partenariat public (60 %) : Kuwait Investment Authority (KIA) (5%), Public Institution for Social Security (5%), Kuwait Authority for Partnership Projects (50%). -Partenariat privé (40%): [40] ENGIE (17.5%), Sumitomo Corporation (17.5%), Abdullah Hamad Al-Sager (5%).

Al Ghubrah (Oman)	<p>Capacité de production : 191 932 m³/ jour d'eau potable [41].</p> <p>Localisation : Al Ghubrah, Mascate, Oman, 23°35'59.87''N, 58°24'43.14''E [31].</p> <p>Partenariat : Malakoff Corporation Berhard (45%), Sumitomo Corporation (Japon) (45%), Cadagua (Espagne) (10%) [42].</p>
Barka 2 (Oman)	<p>Capacité de production : 120 000 m³/ jour d'eau potable [43].</p> <p>Localisation : Barka, Mascate, Oman, 23°42'27.85N, 57°58'54.83°E [31].</p> <p>Partenariat : Degremont (filiale de Suez) (100%) [43].</p>
Barka 4 (Oman)	<p>Capacité de production : 281 000 m³/ jour d'eau potable [44].</p> <p>Localisation : Barka, Al Batinah Sud, Mascate, Oman, 23°42'28.61''N, 57°58'27.83''E [31].</p> <p>Partenariat : Itochu (36%), SUEZ (27%), ENGIE (27%), WJ Towell (10%) [44].</p>
Ras Abu Fontas A3 (Qatar)	<p>Capacité de production : 165 000 m³/jour d'eau potable [45-46].</p> <p>Localisation : Près d'Al Wakrah ville, Doha, Qatar, 25°12'44.82''N, 51°36'44.37''E [31].</p> <p>Partenariat : QEWC (100%) [47].</p>
Umm Al Houl (Qatar)	<p>Capacité de production : 284 000 m³/jour d'eau potable [48].</p> <p>Localisation : Umm Al Houl, Sud Doha, Qatar, 25°6'52.02''N, 51°36'18.05''E [31].</p> <p>Partenariat : QEWC (60%), Société étrangère K1 (30%), Consortium d'investisseurs Japonais (10%) dont : Mitsubishi (20%), JERA (10%), Qatar Fondation (5%), Qatar Energy (5%) [47].</p>

La **Figure II.3** illustre l'emplacement et l'organisation des installations de la station.

a) Disposition des équipements de la station (30/09/2023)



b) Zone de rejet(30/09/2023) (à gauche : image d'origine ; à droite : image post traitée)



Figure II.3 : Image satellite de la station de dessalement El Hamma [31], [50].

La **Figure II.4** illustre l'emplacement et l'organisation des installations de la station.

a) Disposition des équipements de la station (29/10/2023)



b) Zone de rejet(29/10/2023) (à gauche : image d'origine ; à droite : image post traitée)



Figure II.4 : Image satellite de la station de dessalement Ténès [31], [50].

La **Figure II.5** illustre l'emplacement et l'organisation des installations de la station.

a) Disposition des équipements de la station (29/03/2023)



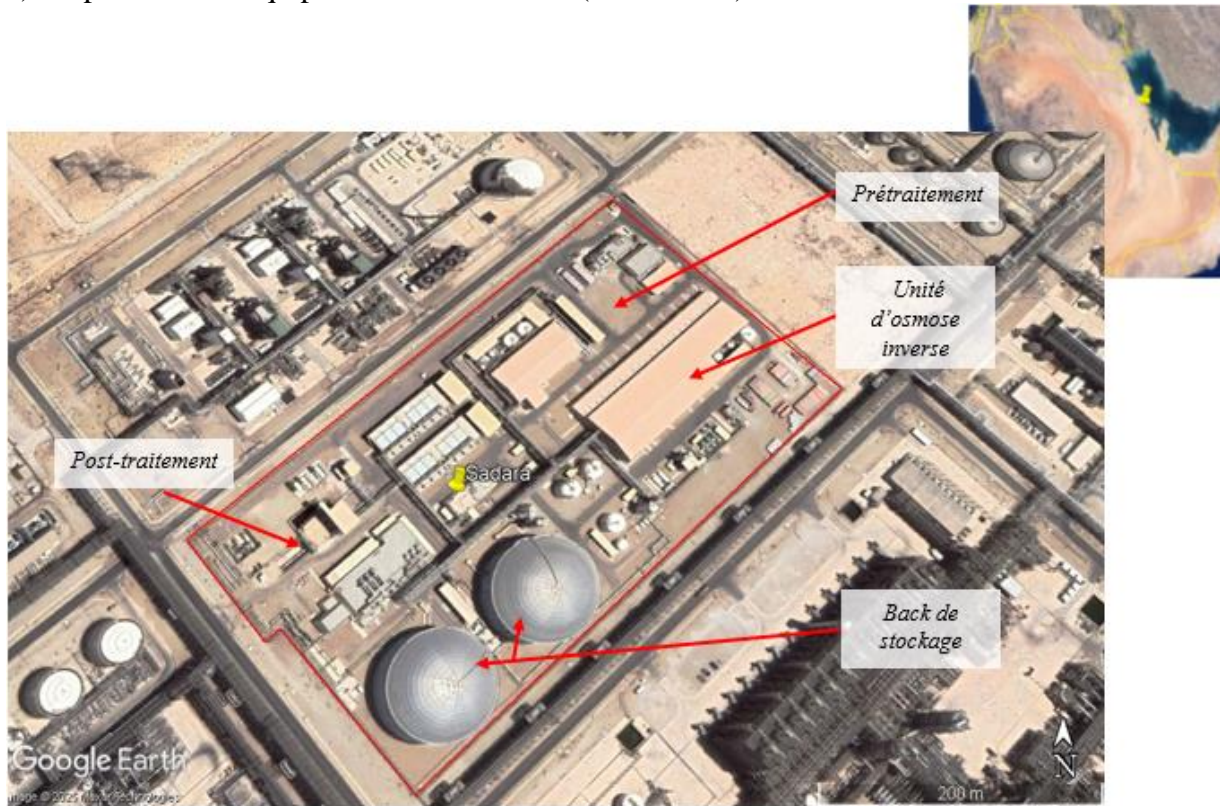
b) Zone de rejet(29/03/2023)



Figure II.5 : Image satellite de la station de dessalement Chtouka Ait Baha [31], [50].

La **Figure II.6** illustre l'emplacement et l'organisation des installations de la station.

a) Disposition des équipements de la station (01/06/2021)



b) Zone de rejet(01/06/2021)



Figure II.6 : Image satellite de la station de dessalement Sadara [31], [50].

La **Figure II.7** illustre l'emplacement et l'organisation des installations de la station.

a) Disposition des équipements de la station (03/03/2022)



b) Zone de rejet(03/03/2022)



Figure II.7 : Image satellite de la station de dessalement Al Dur [31], [50].

La **Figure II.8** illustre l'emplacement et l'organisation des installations de la station.

a) Disposition des équipements de la station (02/08/2022)



b) Zone de rejet(02/08/2022) (à gauche : image d'origine ; à droite : image post traitée)

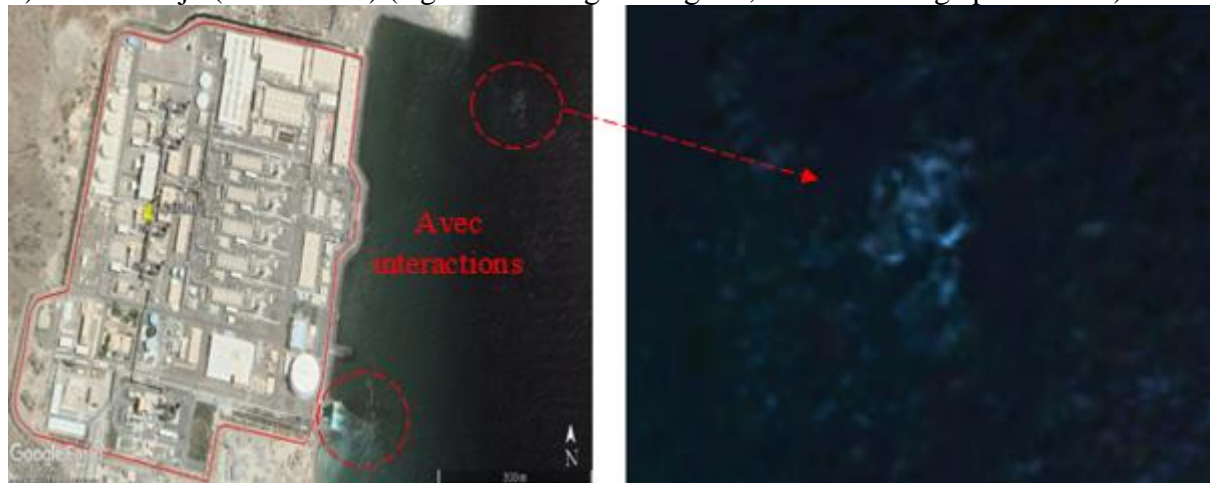
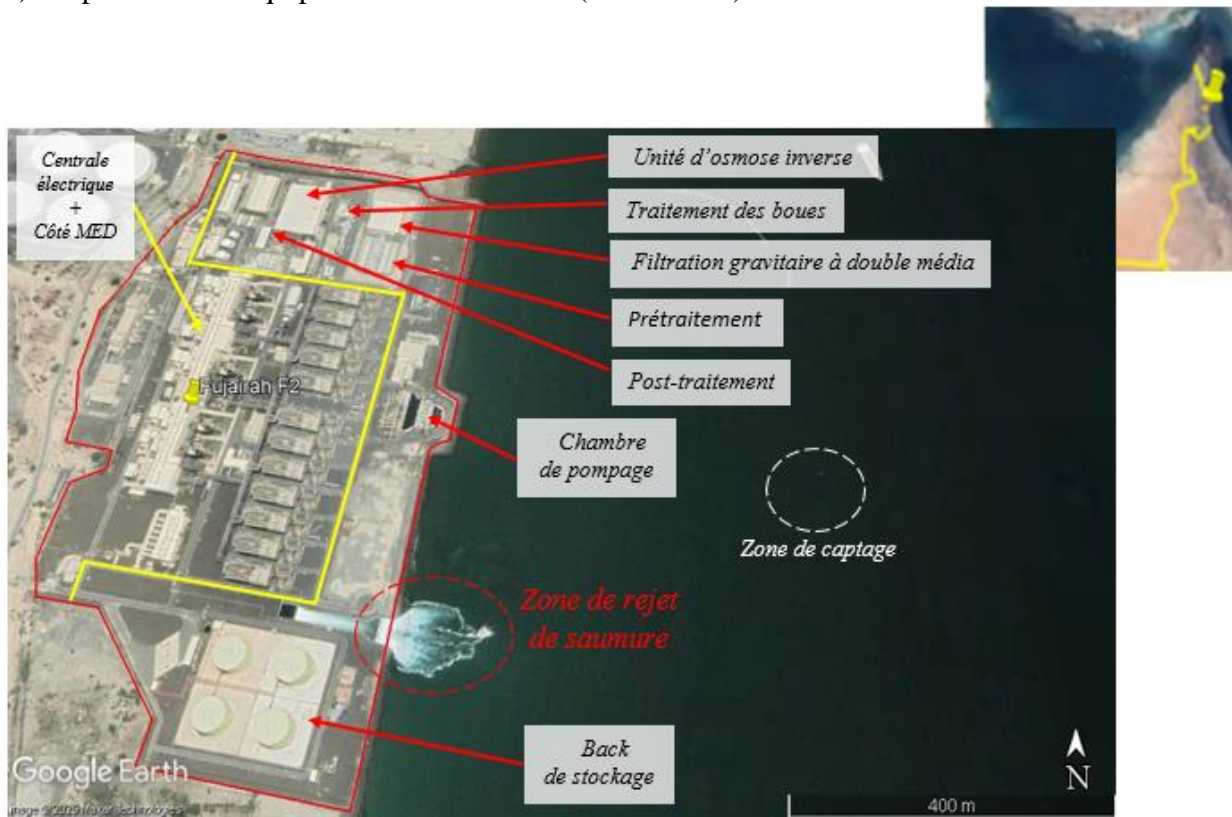


Figure II.8 : Image satellite de la station de dessalement Fujairah F1 [31], [50].

La **Figure II.9** illustre l'emplacement et l'organisation des installations de la station.

a) Disposition des équipements de la station (10/06/2021)



b) Zone de rejet(10/06/2021)



Figure II.9 : Image satellite de la station de dessalement Fujairah F2 [31], [50].

La **Figure II.10** illustre l'emplacement et l'organisation des installations de la station.

a) Disposition des équipements de la station (13/11/2022)



b) Zone de rejet(13/11/2022)

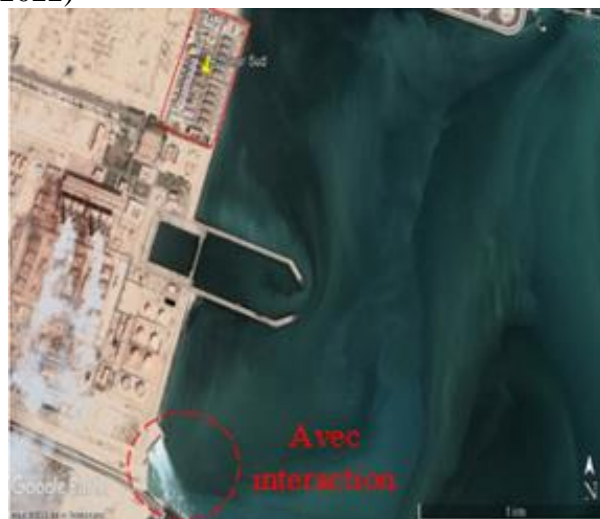


Figure II.10 : Image satellite de la station de dessalement Az-Zour Sud [31], [50].

La **Figure II.11** illustre l'emplacement et l'organisation des installations de la station.

a) Disposition des équipements de la station (15/03/2024)



b) Zone de rejet (15/03/2025)



Figure II.11 : Image satellite de la station de dessalement Al Ghubrah [31], [50].

La **Figure II.12** illustre l'emplacement et l'organisation des installations de la station.

a) Disposition des équipements de la station (22/09/2020)



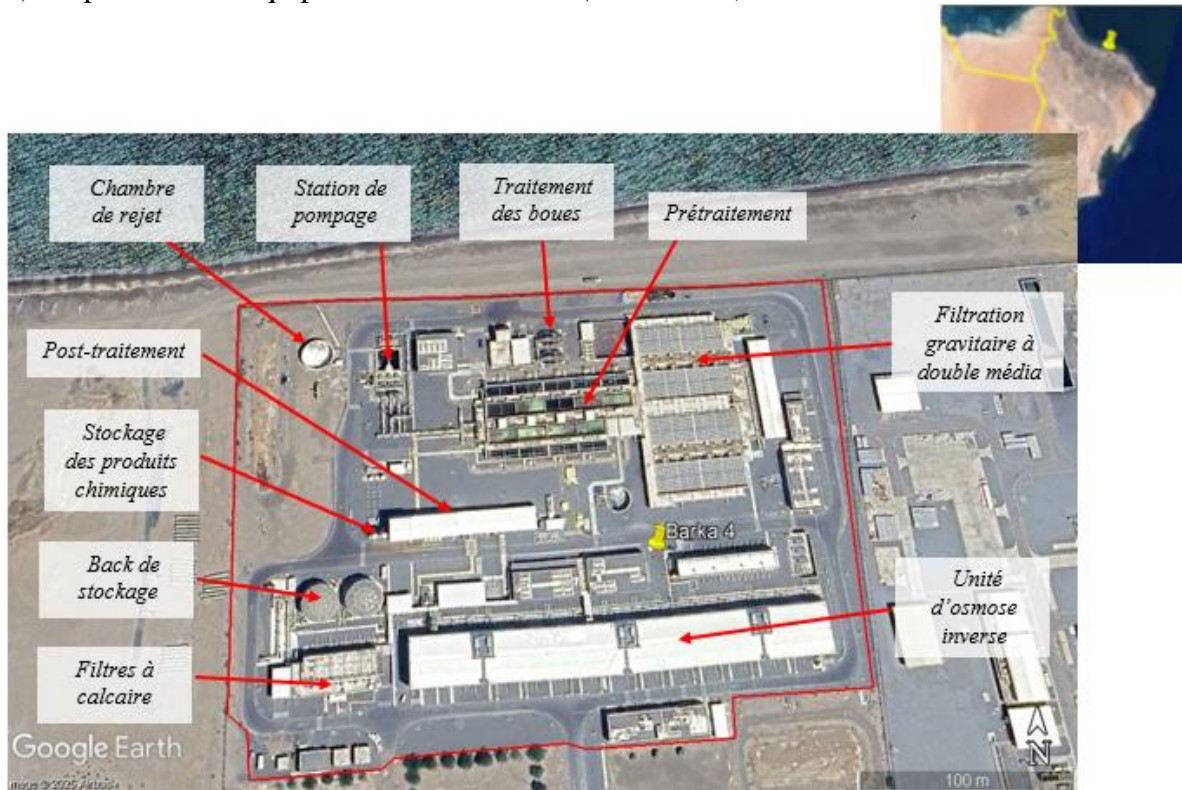
b) Zone de rejet (20/09/2020)



Figure II.12 : Image satellite de la station de dessalement Barka 2 [31], [50].

La **Figure II.13** illustre l'emplacement et l'organisation des installations de la station.

a) Disposition des équipements de la station (26/02/2025)



b) Zone de rejet(22/09/2020)

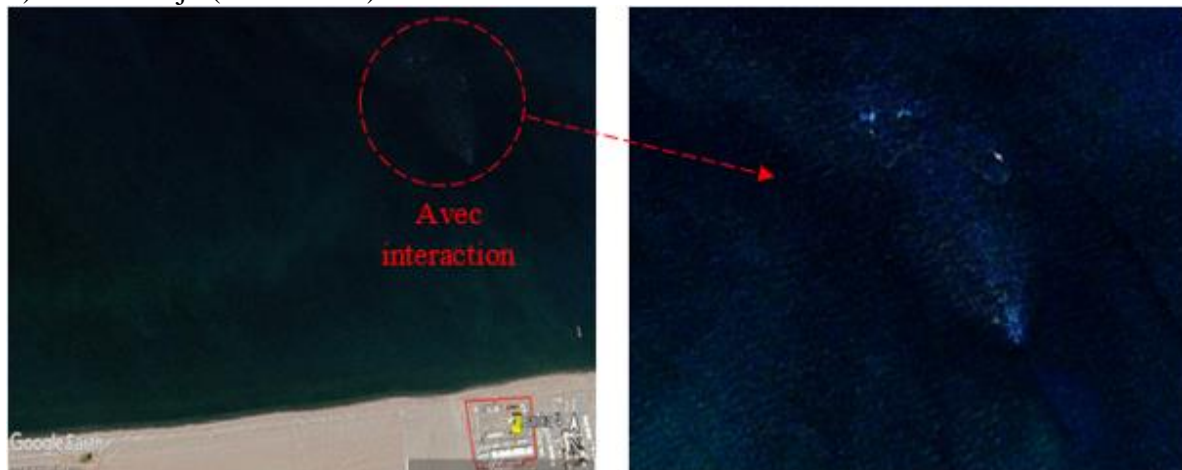
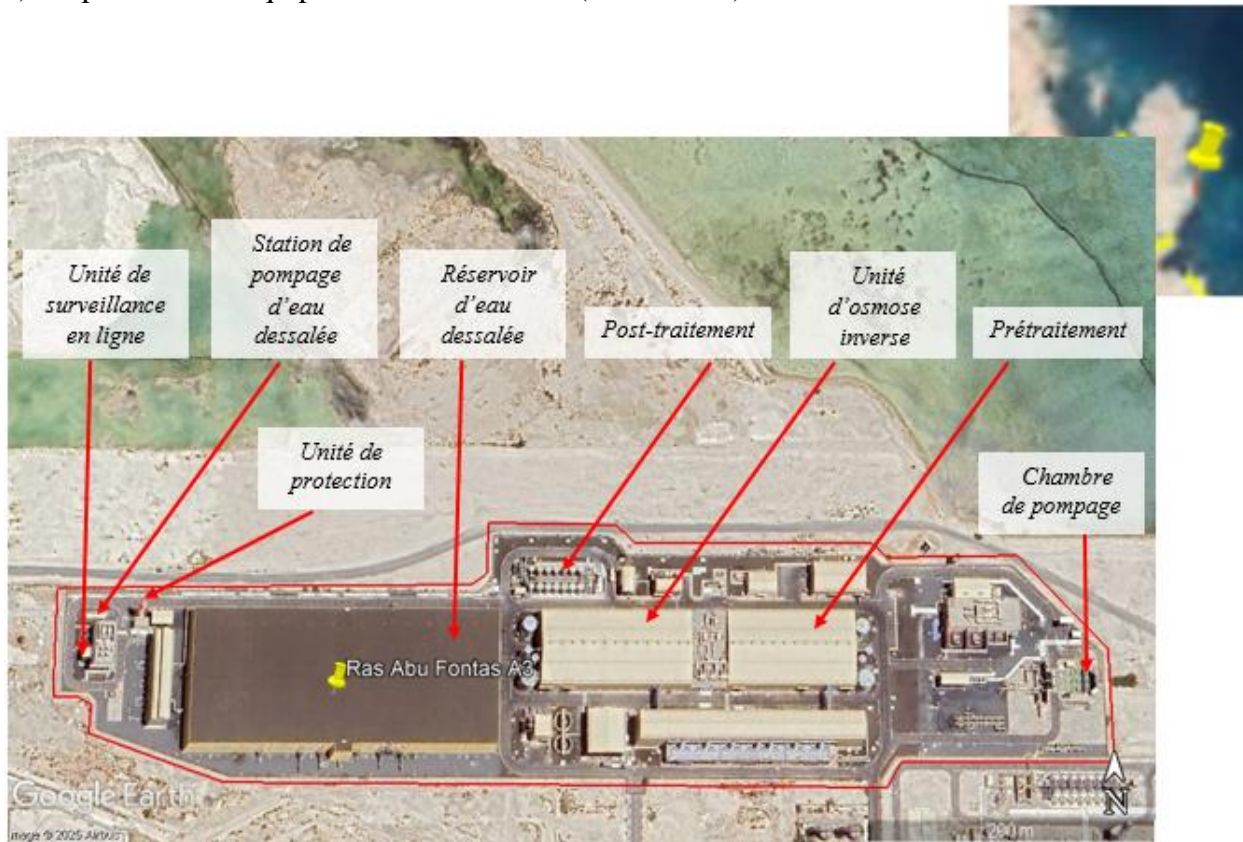


Figure II.13 : Image satellite de la station de dessalement Barka 4 [31], [50].

La **Figure II.14** illustre l'emplacement et l'organisation des installations de la station.

a) Disposition des équipements de la station (02/05/2023)



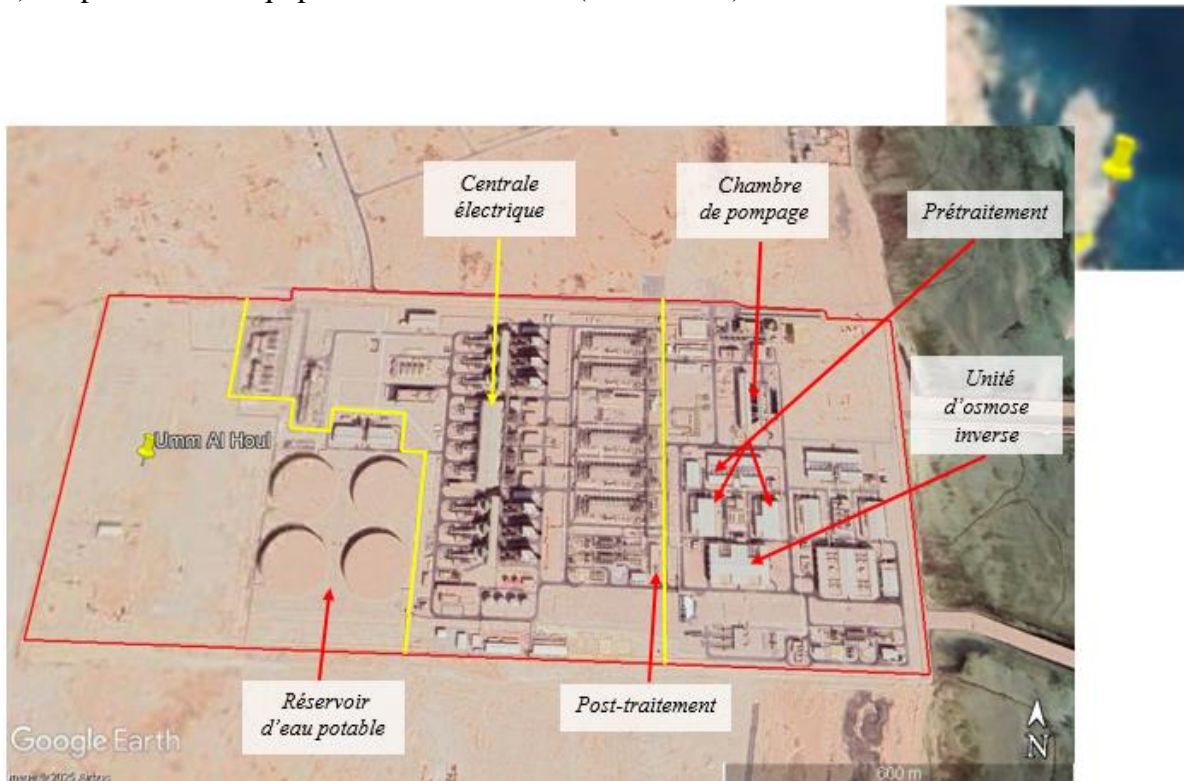
b) Zone de rejet (24/05/2020) (à gauche : image d'origine ; à droite : image post traitée)



Figure II.14 : Image satellite de la station de dessalement Ras Abu Fontas A3 [31], [50].

La **Figure II.15** illustre l'emplacement et l'organisation des installations de la station.

a) Disposition des équipements de la station (23/02/2025)



b) Zone de rejet (23/02/2025) (à gauche : image d'origine ; à droite : image post traitée)



Figure II.15 : Image satellite de la station de dessalement Umm Al Houli [31], [50].

L'analyse des informations collectées et présentées plus haut (**Figures II.3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13,14 ,15; Tableaux II.1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13**) met en évidence plusieurs éléments caractéristiques, à savoir :

- Les stations nord-africaines utilisent uniquement la technologie d'OI, tandis que les stations du Moyen-Orient combinent deux procédés. En effet, elles utilisent les technologies thermiques, telles que MSF ou MED, en plus de l'OI. Cette différence s'explique par le fait que les technologies thermiques, bien que plus énergivores, permettent de traiter des volumes d'eau plus importants.
- La plupart des stations du Moyen-Orient sont intégrées à des centrales électriques, ce qui traduit une stratégie d'optimisation énergétique.
- Les stations nord-africaines telles qu'El Hamma et Ténès en Algérie sont construites en milieux urbains, tandis que celle de Chtouka Ait Baha au Maroc, se trouve dans une région agricole. Cependant celles du Moyen-Orient sont établies dans des zones industrielles.
- Les stations étudiées présentent des différences notables en termes de taille et de disposition des composants, reflétant des choix d'ingénierie adaptés aux contextes locaux.
- Certaines entreprises participent à plusieurs projets de dessalement dans la région, ce qui souligne leur rôle central dans ce secteur. En Afrique du Nord, il s'agit notamment d'Abengoa, Sonatrach et Sonelgaz ; au Moyen-Orient ENGIE, Qatar Water & Electricity Company (QEWEC), Suez et Abu Dhabi National Energy Company (TAQA). Cela montre que le marché du dessalement est dominé par un nombre limité d'acteurs spécialisés, capables d'intervenir sur des projets complexes dans différentes régions.
- Les figures présentent une vue d'ensemble des stations étudiées, mettant en évidence les modalités de rejet mises en œuvre ainsi que la dispersion apparente des panaches. On y observe que, dans la majorité des cas, les rejets s'effectuent par des émissaires sous-marins (conduits).
- Dans la majorité des cas, les rejets s'effectuent par des émissaires sous-marins (conduits). Toutefois, une exception notable concerne les trois stations du Moyen-Orient Al Dur, Fujairah F2 et Az-Zour Sud qui rejettent leurs saumures directement en mer (via des canaux ouverts), configuration absente dans les stations d'Afrique du Nord. La station de Fujairah F1 constitue un cas particulier en combinant les deux types de rejet : canal ouvert et conduits
- Certaines stations présentent une interaction clairement observable entre les rejets et la surface de l'eau de mer. C'est notamment le cas des stations d'El Hamma, de Ténès et de Fujairah F1, où des indices visuels de remontées ou d'expansion de panaches en surface ont été identifiés. A l'inverse, aucune interaction n'est visible pour les stations telles que Chtouka Ait Baha, Sadara et Al Ghubrah, ce qui confirme la dispersion en profondeur de la saumure dans ces cas.

II.4.2 Comparaison quantitative des stations de dessalement étudiées

II.4.2.1 Surface et périmètre des stations

Ci-dessous sont présentés deux diagrammes illustrant la répartition des dimensions des stations étudiées.

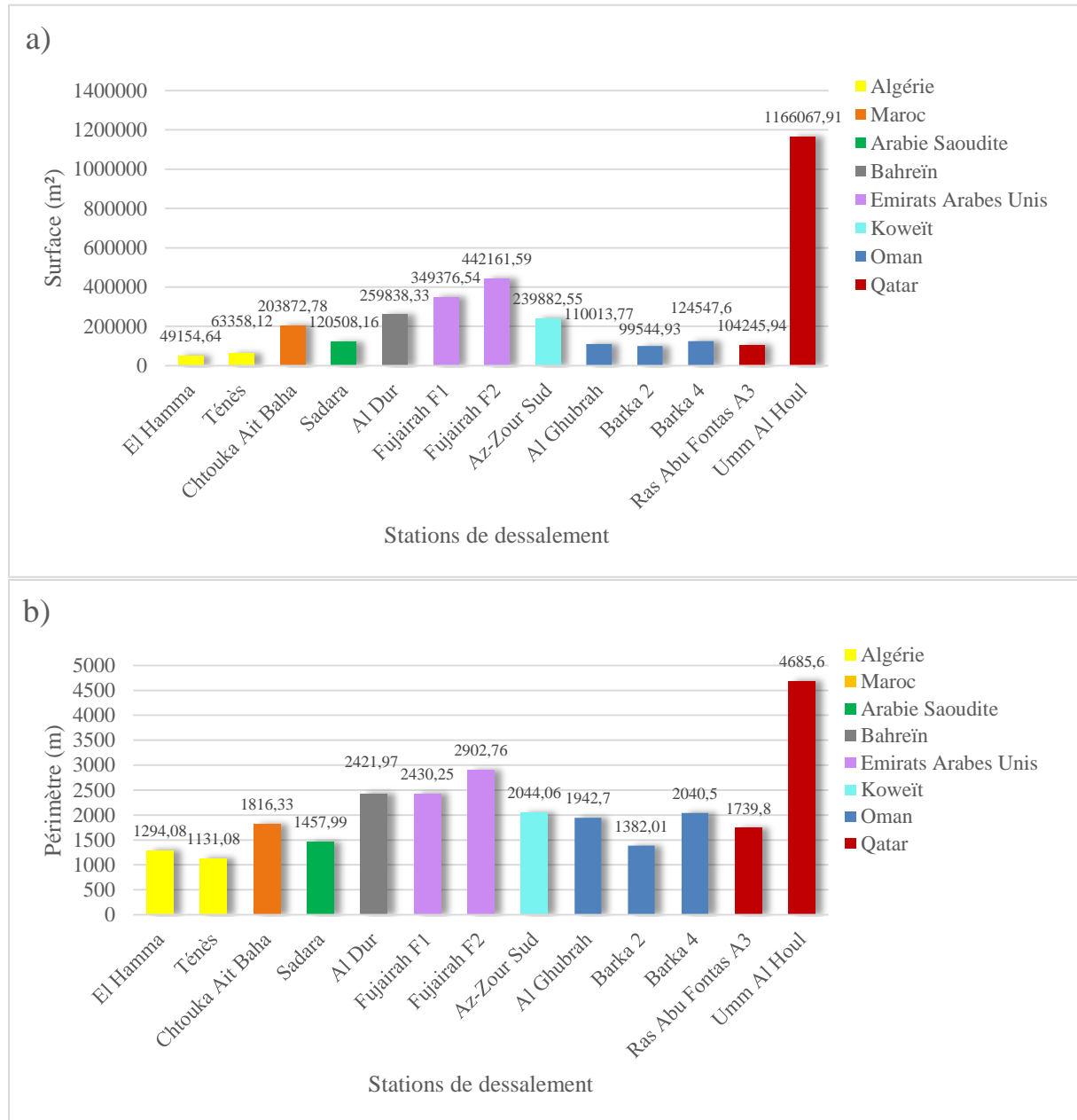


Figure II.16 : Diagrammes à barres représentant : a) la répartition des surfaces ; b) la répartition des périmètres par station de dessalement [31].

D'après la **Figure II.16**, les stations de dessalement du Moyen-Orient présentent des surfaces et périmètres nettement supérieurs à celles d'Afrique du Nord.

Cette différence s'explique par le fait que les pays du Golfe intègrent souvent leurs stations de dessalement à des centrales électriques et utilisent des technologies thermiques comme OI + MSF ou OI + MED, alors qu'en Afrique du Nord seule l'OI est généralement utilisée.

II.4.2.2 Capacité de production et consommation énergétique spécifique

Ci-dessous sont présentés deux diagrammes illustrant la répartition des performances des stations étudiées en termes de capacité de production et de consommation énergétique spécifique.

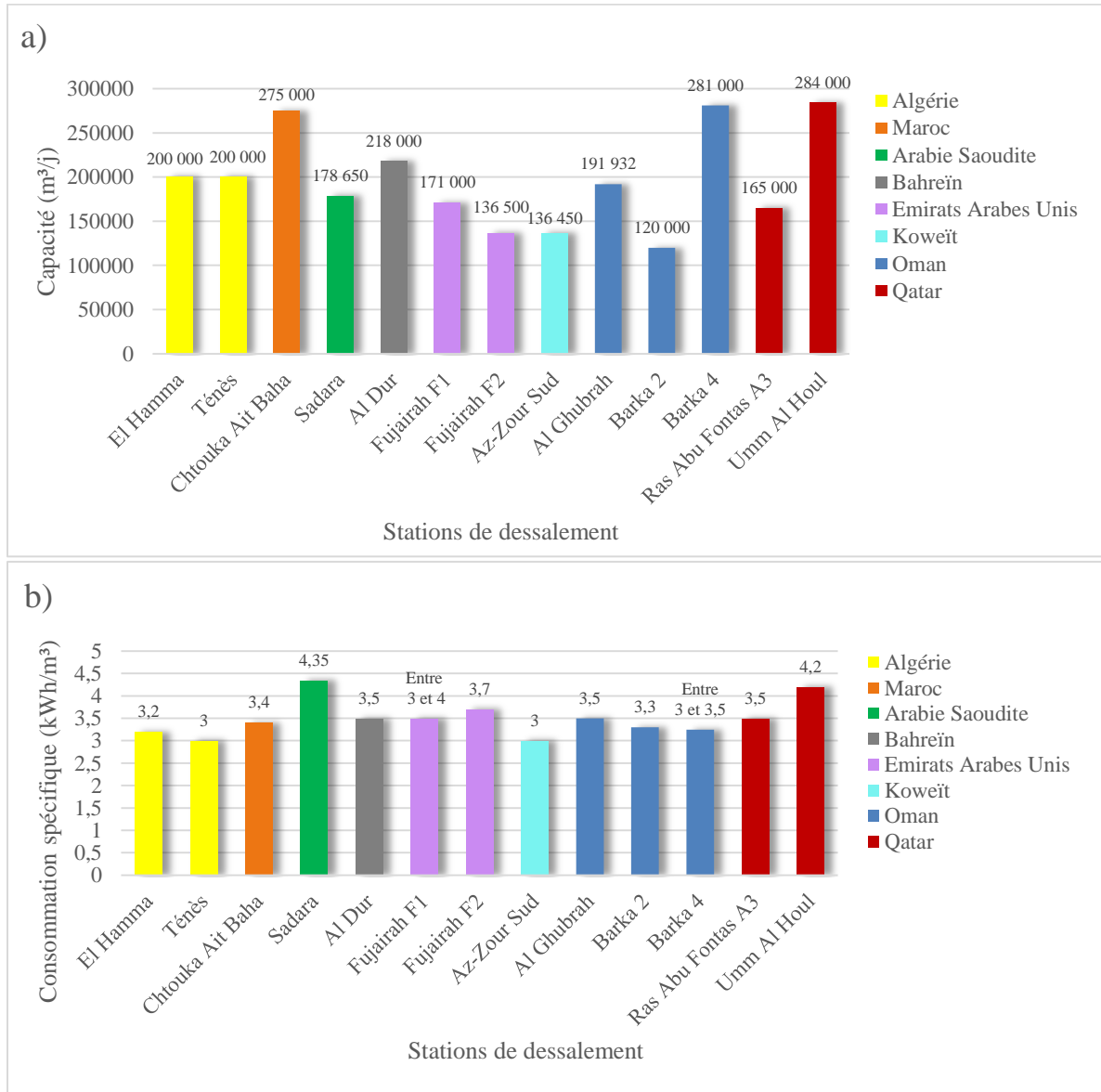


Figure II.17 : Diagrammes à barres représentant : a) la capacité de production ; b) la consommation énergétique spécifique des stations de dessalement [27], [30], [34], [36], [37], [38],[39],[40], [43],[44],[45],[48].

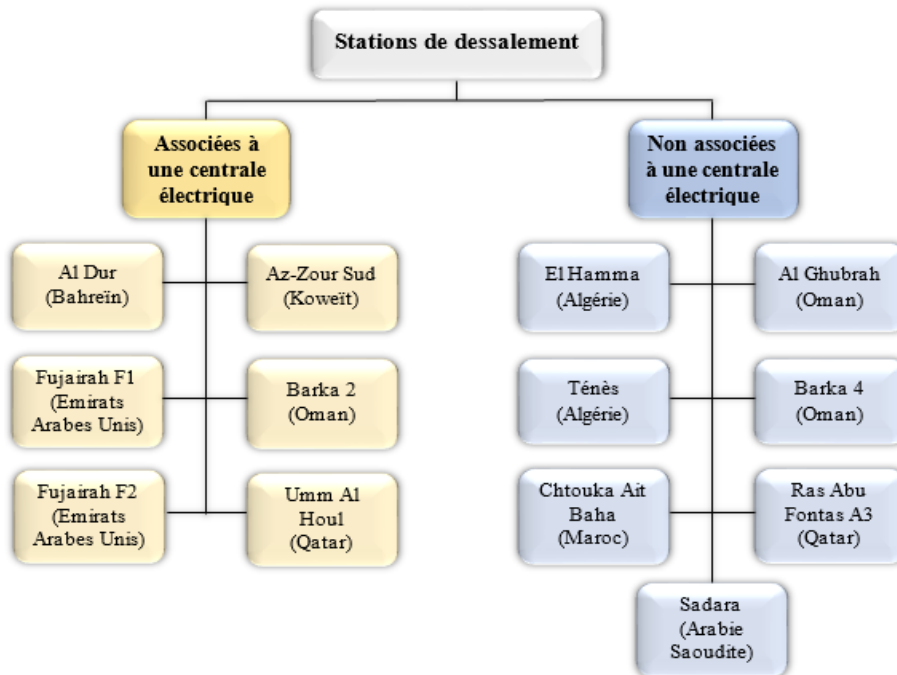
La **Figure II.17** montre que les stations du Moyen-Orient affichent une capacité de production plus élevée. Cette différence s'explique par l'utilisation de technologies hybrides, par l'association des centrales électriques comme Umm Al Houll et Al Dur. Ce qui améliore

leurs performances mais augmente leur consommation énergétique spécifique. En revanche, les stations en Afrique du Nord, qui utilisent uniquement l'OI, consomment moins d'énergie avec une capacité moyenne de production plus faible.

II.4.2.3 Configuration des stations

Ci-dessous est présentée la configuration des stations étudiées selon les technologies de dessalement employées et leur association éventuelle à une centrale électrique.

a)



b)

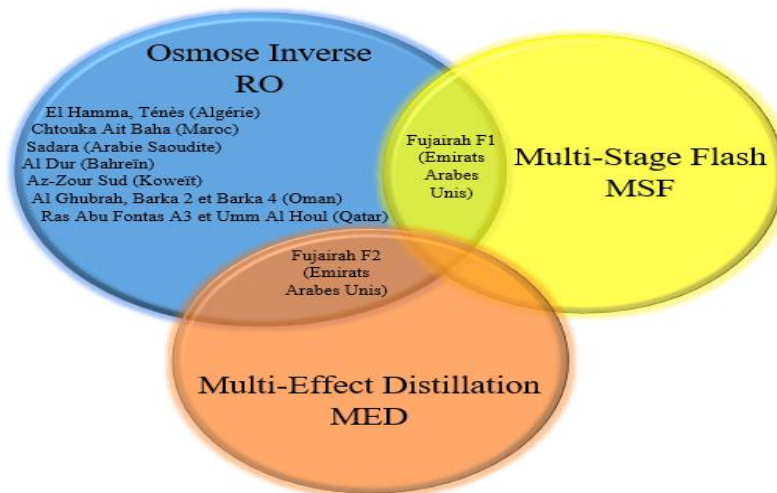
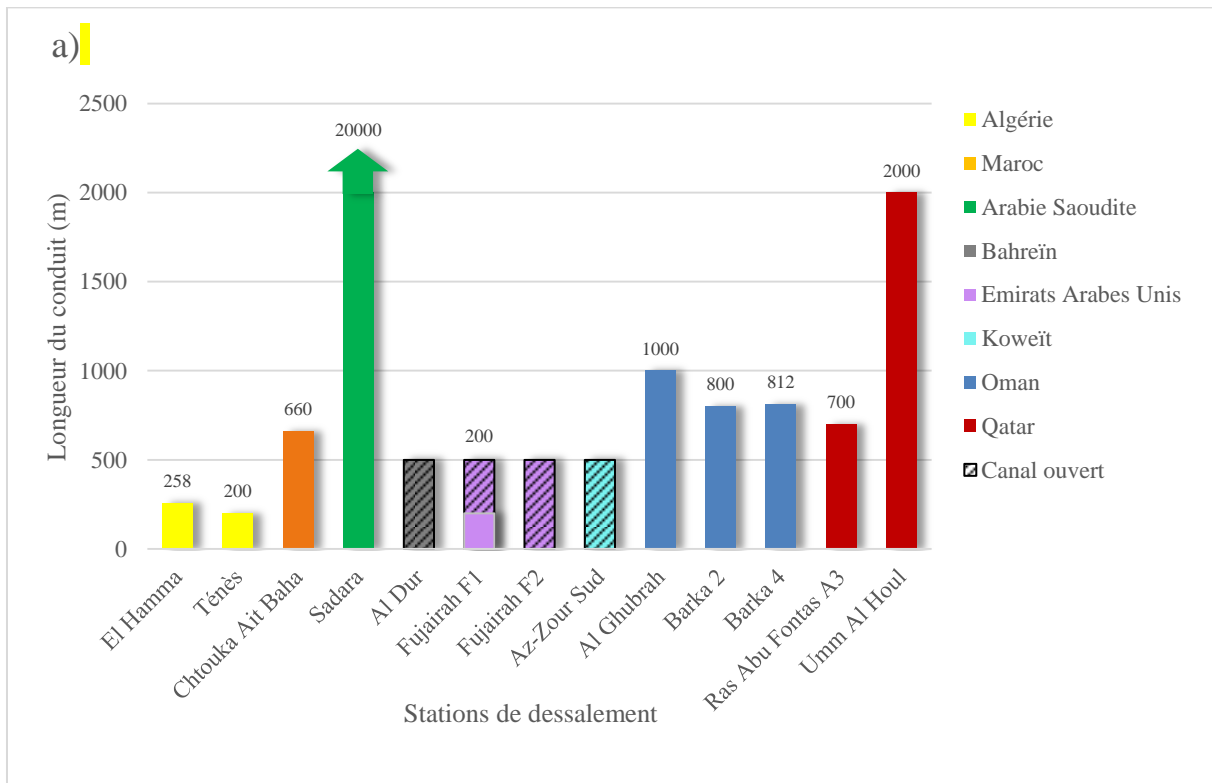


Figure II.18 : Schéma des différentes configurations des stations de dessalement : a) stations associées ou non à des centrales électriques; b) technologies utilisées par station[27], [30],[34],[36],[37],[38],[39],[40],[43],[44],[45],[48].

Les résultats présentés sur la **Figure II.18** indiquent que seuls les pays du Moyen-Orient intègrent certaines stations de dessalement à des centrales électriques. Cette configuration permet pour les technologies thermiques comme MSF et MED d'utiliser la chaleur résiduelle des centrales afin de produire l'eau douce, limitant ainsi les pertes d'énergie. Même lorsque l'OI est utilisée, certaines stations restent associées pour avoir de l'électricité de façon stable et directe car cette technologie en consomme beaucoup [48]. Cela rend l'ensemble du système plus efficace et plus économique.

II.4.2.4 Caractéristiques des systèmes de rejet

Ci-dessous sont présentés les principaux éléments caractérisant les systèmes de rejet, regroupés dans la **Figure II.19**.



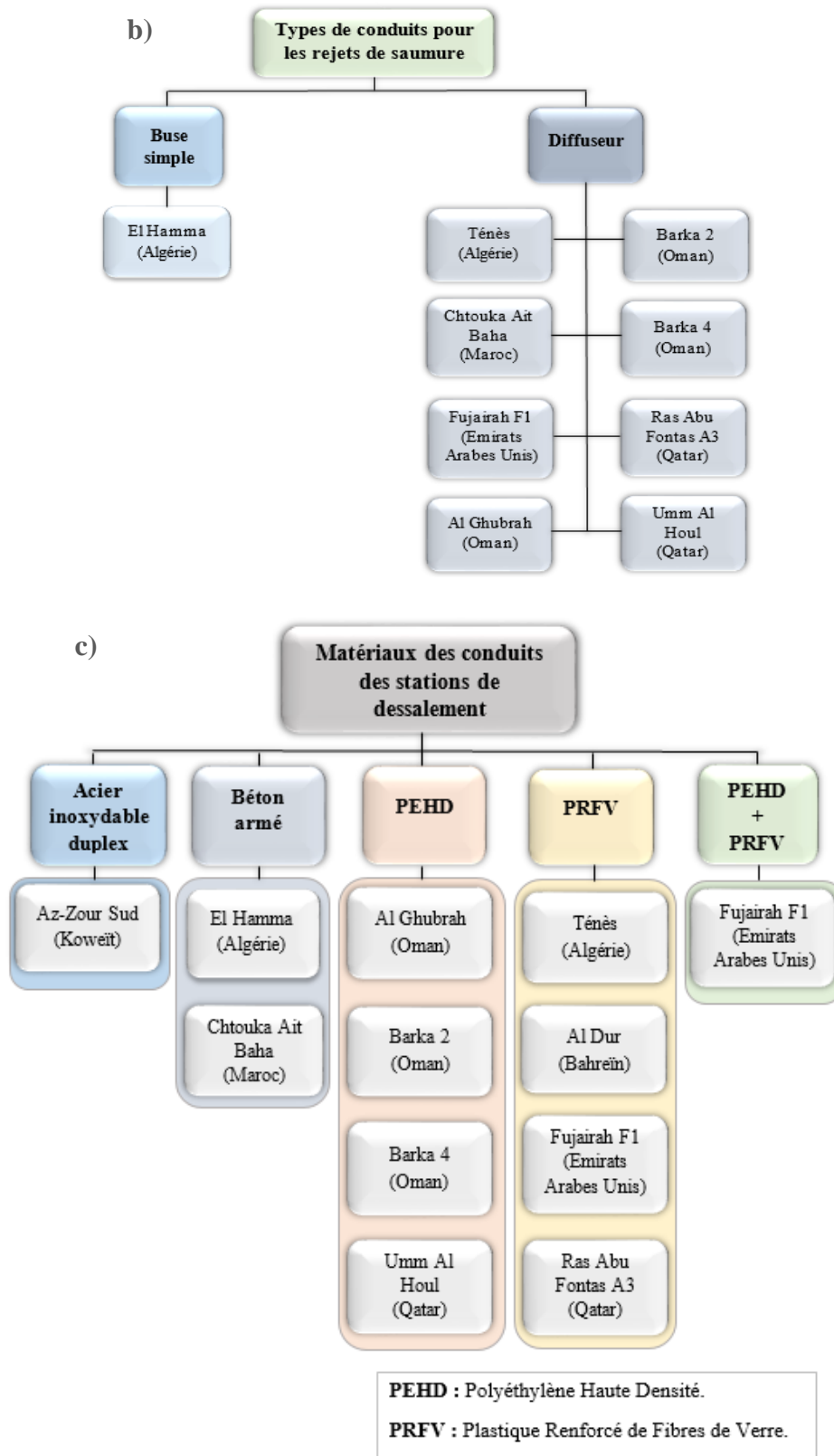


Figure II.19 : Rejets de saumure des stations de dessalement : a) émissaires, b) types de conduits, c) matériaux utilisés [27], [30], [34], [36], [37], [38], [39], [40], [43], [44], [45], [48].

La **Figure II.19** montre que les stations du Moyen-Orient rejettent la saumure à ciel ouvert ou via de longues conduites parfois en combinant les deux méthodes comme à Fujairah F1, ce qui permet une large dispersion dans des zones peu urbanisées. En Afrique du Nord, les stations utilisent des conduits sous-marins fermés et plus courts. Globalement les différences observées peuvent s'expliquer par la disponibilité d'espace, le type de côte ou les choix d'aménagement.

Les stations du Moyen-Orient disposent majoritairement des diffuseurs pour le rejet de saumure, un choix reflétant leur volonté de limiter l'impact environnemental et de respecter des normes strictes, ce qui n'est pas le cas pour des stations comme El Hamma.

Les matériaux utilisés pour les conduits varient selon les régions. En Afrique du Nord, le béton armé est couramment utilisé, ce choix est peut-être dû au coût abordable et la bonne résistance à la corrosion. Au Moyen-Orient, les stations utilisent des matériaux plus avancés comme le PEHD ou le PRFV afin de répondre à des contraintes plus élevées liées à la pression, à la température et à la durabilité en milieu marin [51].

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les stations de dessalement situées dans la région MOAN à travers l'imagerie satellite disponible sur Google Earth Pro. Cette analyse nous a permis d'identifier les différents composants des stations ainsi que les zones de rejet de saumure. Nous avons également pu observer la dispersion des panaches de saumure et leur interaction avec les surfaces marines, ce qui constitue une première étape vers une meilleure compréhension de l'impact environnemental de ces stations.

Cette étude a fait l'objet d'une communication intitulée : « Analyse des rejets de saumure des stations de dessalement par imagerie satellite », présentée le 23 avril 2025, lors du Premier Séminaire National : Eau, Santé et Développement Durable (ESDD1), organisé par l'Université Batna 2, les 7 et 8 avril 2025.



Analyse des rejets de saumure des stations de dessalement par imagerie satellitaire

L2ME

Ryma HAMMAD ¹, Camelia BELKACEM ¹, Mounir AMOKRANE ^{1,2,*}

¹ Département de Génie Mécanique, Faculté du Génie de la Construction, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie

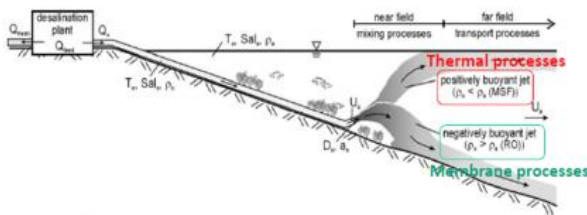
² Laboratoire de Mécanique Matériaux et Energétique (L2ME), Université de Bejaia, Bejaia, Algérie

* mounir.amokrane@ummto.dz

Introduction

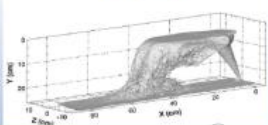
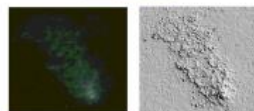
Avec la croissance de la demande en eau potable, le dessalement de l'eau de mer s'impose comme une solution stratégique, en particulier dans les régions arides. Toutefois, cette solution soulève des préoccupations environnementales, notamment liées aux rejets de saumure.

Cette étude vise à analyser la visibilité et l'impact des rejets de saumure à l'aide de l'imagerie satellitaire, notamment à travers l'outil Google Earth. Plusieurs stations de dessalement situées dans la région de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient ont été surveillées afin de détecter et d'étudier la dispersion de leurs rejets en mer. La classification et les principales caractéristiques des rejets de saumure sont présentées à la figure ci-dessous, permettant ainsi une meilleure compréhension des types de rejets observés et de leurs effets potentiels sur l'environnement marin.



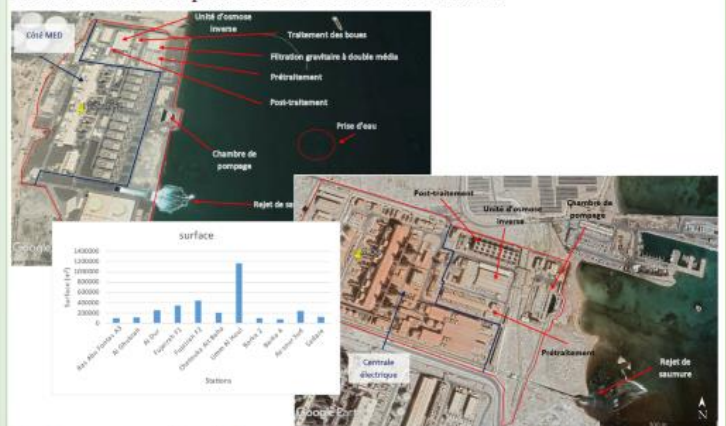
Matériel et méthodes

La méthodologie suivie dans cette étude se compose de trois étapes principales. La première consiste en la collecte d'images satellitaires à l'aide de l'outil Google Earth. Ensuite, ces images sont analysées à travers un traitement d'images adapté afin d'identifier les rejets visibles. Enfin, l'interprétation des résultats se fait en s'appuyant sur des travaux antérieurs comme référence, permettant ainsi de valider les observations et d'enrichir l'analyse.

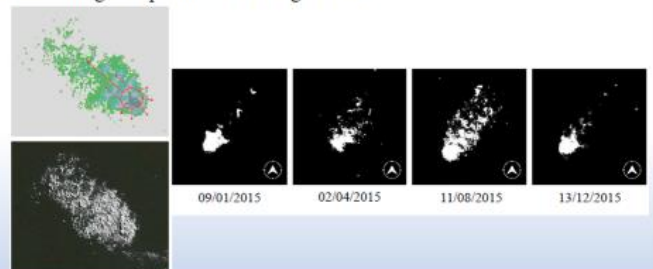


Résultats et discussion

Des images satellitaires des stations Fujairah F1 et Al Dur permettent d'observer les différentes méthodes d'éjection des rejets. Les outils de Google Earth offrent également des données telles que la surface, le périmètre et d'autres caractéristiques, facilitant ainsi la comparaison entre les différentes stations.



Ci-dessous est représentée la zone de rejet de la station de dessalement d'eau de mer de Hamma, à Alger. Après traitement, l'image met clairement en évidence la présence d'un panache en mer, témoignant de l'impact des rejets au niveau de l'exutoire. L'évolution de ce panache peut être suivie dans le temps à l'aide des outils de chronologie disponibles sur Google Earth.



Conclusion

L'utilisation de l'imagerie satellitaire permet d'étudier efficacement les rejets des usines de dessalement, en offrant une vue d'ensemble de leur dispersion en mer et de leur évolution dans le temps. Cette approche facilite la détection des interactions entre les rejets et l'environnement marin. Elle constitue un outil précieux pour évaluer l'impact potentiel des rejets, et souligne l'importance de mettre en place un programme de surveillance environnementale afin de suivre leur comportement et d'adopter des mesures adaptées pour limiter les effets négatifs sur l'écosystème côtier.

Bibliographie

O. Abessi and P.J.W. Roberts, Dense jet discharges in shallow water, *J. Hydraul. Eng.* 142 (2016) 04015033.
 P. Angelidis, D. Kalpakis, V. Gyrikis and N. Kotsovinos, 2D brine sewage after impinging on a shallow sea free surface, *Environ. Fluid Mech.*, 17 (2017) 615–628.
 M. Amokrane, A. Salmi, Surface spreading of the brine discharge from the SWRO plants: Hamma Water Desalination plant in Algeria, *Desalination and Water Treatment* 222 (2021) 81-91.

Chapitre III

Analyse Dimensionnelle des Rejets de
Saumure issus de l'OI

III.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif d'appliquer la méthode d'analyse dimensionnelle à l'étude des rejets de saumure issus des stations de dessalement par OI. Cette méthode permet de mieux comprendre les relations entre les différentes grandeurs physiques et aussi de prévoir le comportement des rejets dans différentes conditions.

III.2 Principe de la méthode de l'échelle de longueur pour l'étude des rejets de saumure et principales études

La méthode de l'échelle de longueur est une méthode utilisée pour étudier la dispersion des rejets de saumure dans le milieu marin, elle consiste à représenter le comportement du jet à une échelle réduite, afin de prédire ses effets à l'échelle réelle. Cette approche permet d'évaluer la dilution, la propagation et l'impact environnemental des rejets sans avoir à recourir directement à des expérimentations en milieu naturel [49].

La **Figure III.1** illustre la configuration schématique d'un jet tel qu'utilisé dans la section d'OI. Cette représentation permet de mieux comprendre les paramètres géométriques d'un rejet de saumure à flottabilité négative se déversant dans une eau stagnante, de densité constante notée (ρ_a). Le rejet s'effectue à partir d'un port de diamètre (D), situé à une hauteur (h_0) au-dessus du fond marin et incliné selon un angle (θ_0) par rapport à l'horizontale, orienté vers le large. Le fond marin est caractérisé par une pente d'inclinaison (θ_b) et la profondeur moyenne au point de rejet est désignée par (H_{a0}).

L'effluent rejeté possède une densité initiale (ρ_0) supérieure à celle de l'eau ambiante, traduisant une flottabilité négative et une vitesse de décharge (U_0). L'environnement étant considéré comme stagnant, aucun courant n'est pris en compte dans cette configuration de modélisation [30].

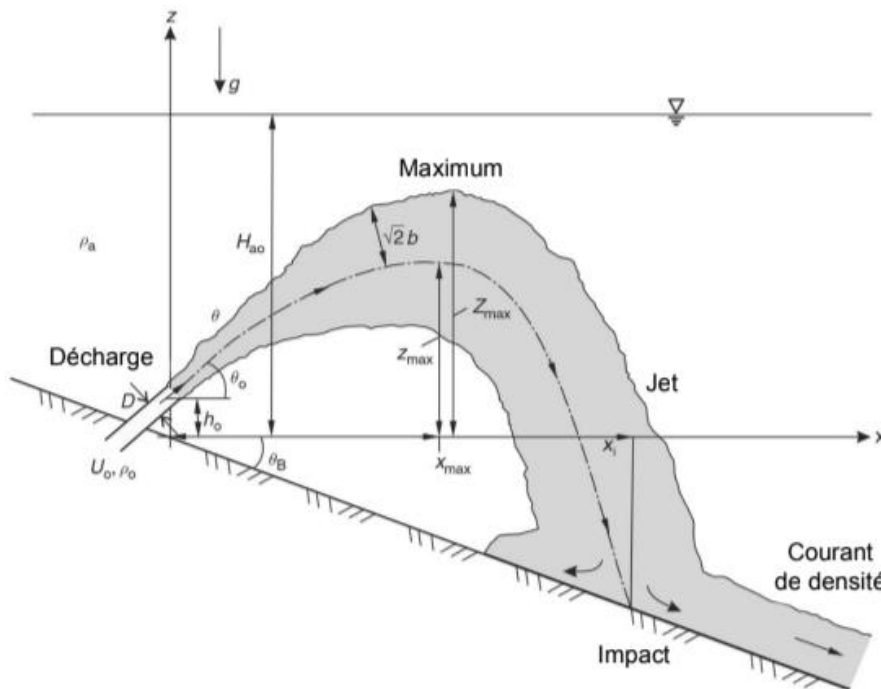


Figure III.1 : Représentation schématique du jet d'OI selon le modèle de *Bleninger* [49].

En complément des caractéristiques mentionnées précédemment, la **Figure III.1** illustre également les paramètres suivants :

Z_{max} : Hauteur maximale du centre de rejet [m].

X_{max} : Position maximale horizontale du centre du jet [m].

X_i : Position horizontale du centre du jet au point d'impact [m].

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

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

Plusieurs grandeurs caractéristiques permettent de décrire le comportement du jet et son interaction avec le fluide ambiant, parmi ces grandeurs :

Le débit volumique, noté Q_0 , représente le volume de fluide qui s'écoule par unité de temps à travers une section donnée. Il est déterminé par la relation suivante :

$$\boxed{Q_0 = U_0 \cdot A_0} \quad [m^3/s] \quad \text{(III.1)}$$

Avec $\boxed{A_0 = \frac{D^2 \cdot \pi}{4}} \quad [m^2] \quad \text{(III.2)}$

Le flux de quantité de mouvement, noté M_0 , représente la quantité de mouvement transférée par le jet de saumure par unité de temps à travers la section de rejet. Il est donné par :

$$\boxed{M_0 = U_0 \cdot Q_0} \quad [m^4/s^2] \quad \text{(III.3)}$$

Le flux de flottabilité, noté J_0 , est une grandeur qui caractérise la capacité d'un fluide à monter ou descendre dans un autre fluide en raison d'une différence de densité. Dans le cas de l'OI ce flux est négatif. La saumure rejetée est plus salée que l'eau de mer, ce qui confère au rejet une flottabilité négative. Il s'exprime selon l'équation suivante :

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

Avec $\boxed{g'_0 = g(\rho_a - \rho_0)/\rho_a} \quad [m/s^2] \quad \text{(III.5)}$

L'échelle de longueur de rejet, notée L_Q , représente la distance parcourue par le rejet avant qu'il ne se dilue fortement dans l'eau de mer. Elle est déterminée par la relation suivante :

$$\boxed{L_Q = \frac{Q_0}{\sqrt{M_0}}} \quad [m] \quad \text{(III.6)}$$

L'échelle de longueur de quantité de mouvement, notée L_M , est la distance à partir laquelle la flottabilité commence à influencer le rejet, qui se transforme alors en panache. Elle est donnée par :

$$L_M = \frac{M_0^{3/4}}{\sqrt{|J_0|}} \quad [m] \quad (III.7)$$

Le nombre de Froude densimétrique, noté F_0 , est un paramètre adimensionnel utilisé pour étudier le mouvement d'un jet lorsqu'il entre dans un autre fluide de densité différente. Il tient compte de la vitesse du jet ainsi que de la différence de densité entre les deux fluides. Il s'exprime à l'aide de la formule suivante :

$$F_0 = \frac{U_0}{\sqrt{|g'_0| \cdot D}} \quad (III.8)$$

La gestion des rejets de saumure issus des stations de dessalement représente un défi environnemental majeur. Les rejets plus salés et parfois plus chauds que l'eau de mer ambiante, modifient localement les conditions physico-chimiques du milieu marin et peuvent affecter la biodiversité [53]. Plusieurs approches ont été développées pour comprendre et prédire le comportement des panaches de saumure. Parmi celles-ci, la modélisation des rejets à l'aide de logiciels spécialisés ou de méthodes analytiques est particulièrement répandue. Dans ce sens, *Bouthiba et al* [54] ont simulé l'interaction entre les rejets de saumure d'une station de dessalement située à Ténès et le milieu récepteur, sous différentes conditions hydrodynamiques. Les auteurs ont utilisé le modèle CORMIX, basé sur la théorie des jets turbulents et les équations de conservation, pour évaluer la dispersion et la dilution des rejets.

Le rapport de *Bleninger et Jirka* [55] publié par le Middle East Desalination Research Center (MESRC) propose une méthodologie complète de planification, de prédiction et de gestion environnementale des rejets de saumure. Il décrit en détail les mécanismes de dispersion, les types de panaches (submergés, flottants...) et met en avant l'importance des paramètres hydrodynamiques.

Bashitialshaaer et al [56] apportent une contribution significative à la compréhension des rejets de saumure, notamment sous l'angle de l'analyse dimensionnelle. Leur recherche porte sur le comportement des jets inclinés à flottabilité négative, une situation fréquemment rencontrée lors des rejets de saumure en mer.

III.3 Méthodologie

La méthodologie que nous avons adoptée dans cette étude repose sur une analyse dimensionnelle appuyée par une approche paramétrique, visant à analyser l'influence de différents facteurs sur la dispersion des rejets de saumure en mer. Le principe consiste à faire varier un seul paramètre, tout en maintenant les autres constants, afin d'évaluer l'effet spécifique de chaque variable.

Les paramètres que nous avons étudiés sont : la température ambiante de l'eau de mer (T_a), sa salinité ambiante (Sal_a), l'angle de décharge (θ_0) et le diamètre de la buse (D).

Pour chaque cas, nous avons réalisé une simulation indépendante, ce qui nous a permis de comparer directement l'évolution du panache de rejet selon les scénarios testés.

Enfin, nous avons analysé les résultats afin de dégager les tendances observées et d'apprécier l'efficacité de dilution ainsi que l'étendue de la dispersion dans le milieu marin.

La **Figure III.2** récapitule les principales étapes de la méthodologie appliquée dans cette étude.

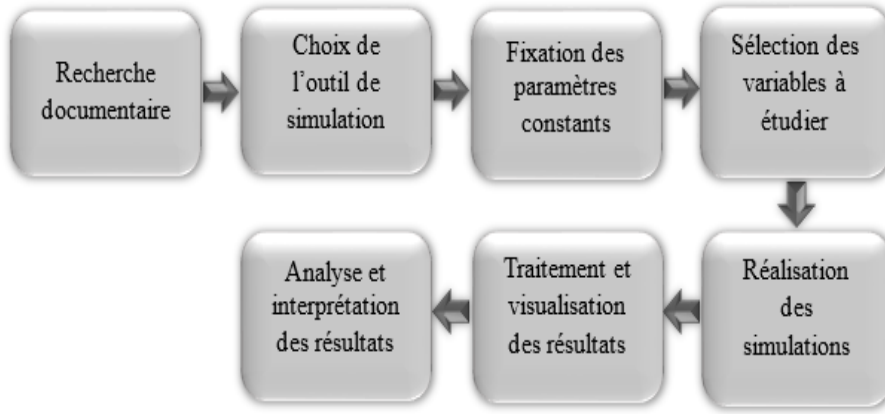


Figure III.2 : Schéma de la méthodologie de travail adoptée.

Pour cette étude, notre choix s'est porté sur l'outil « Desalination Plant Discharge Calculator » développé par *Bleninger, Niepelt et Jirka* [49]. Ce calculateur permet de réaliser des simulations basées sur l'approche de la modélisation simplifiée des panaches de rejet, en utilisant des formules issues de la mécanique des fluides. Il est conçu pour fournir une estimation rapide des principales caractéristiques des panaches de saumure à partir de paramètres d'entrée tels que le débit, la salinité, la densité relative, la géométrie du diffuseur, ainsi que les conditions environnementales (la profondeur, vitesse du courant...).

La **Figure III.3** illustre son interface, ainsi que les principales fonctionnalités utilisées dans le cadre de cette étude.

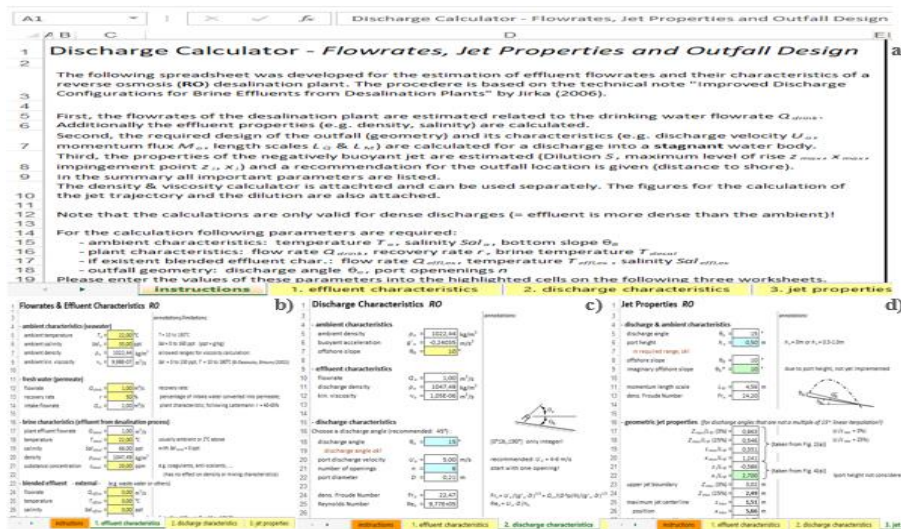


Figure III.3 : Interface utilisateur de l'outil « Discharge Plant Calculator » : a) instructions ; b) débits et propriétés des effluents d'OI ; c) caractéristiques des rejets d'OI ; d) propriétés du jet d'OI [49].

III.4 Résultats et discussion

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats obtenus dans le cadre de cette étude. Nous avons effectué quatre simulations en utilisant l'outil choisi. Dans un premier temps, nous allons expliquer la démarche suivie pour chaque simulation. Ensuite, les résultats des caractéristiques géométriques du jet, à savoir $Z_{max}(25\%)$, Z_{max} , X_{max} , Z_i et X_i , seront présentés à l'aide des graphiques, un pour chaque simulation. Chacun de ces graphiques est suivi d'un tableau présentant les valeurs des paramètres de modélisation (longueurs caractéristiques) du jet correspondantes, à savoir M_0 , J_0 , L_Q et L_M .

III.4.1 Influence de la température ambiante sur les caractéristiques du jet

Pour étudier l'effet de la température ambiante sur les caractéristiques géométriques du jet, nous avons fait varier la température ambiante de 13°C à 40°C avec un pas de 3 °C. La salinité ambiante a été fixée à **35 ppt**, le débit d'eau douce à $Q_{drink} = 1 \text{ m}^3/\text{s}$ et le pourcentage d'eau d'alimentation convertie en perméat à $r = 50\%$. Concernant les paramètres des effluents mélangés externes (Q_{effex} , T_{effex} et Sal_{effex}), nous les avons tous fixés à zéro.

De plus, nous avons défini un angle de décharge de **45°**, un nombre d'ouvertures $n = 1$ (correspondant à une buse simple) et un diamètre de buse de **0,5 m**.

La figure ci-dessous illustre l'évolution des caractéristiques géométriques du jet en fonction de (T_a), suivie d'un tableau récapitulatif présentant les principales longueurs caractéristiques du jet lors de cette simulation.

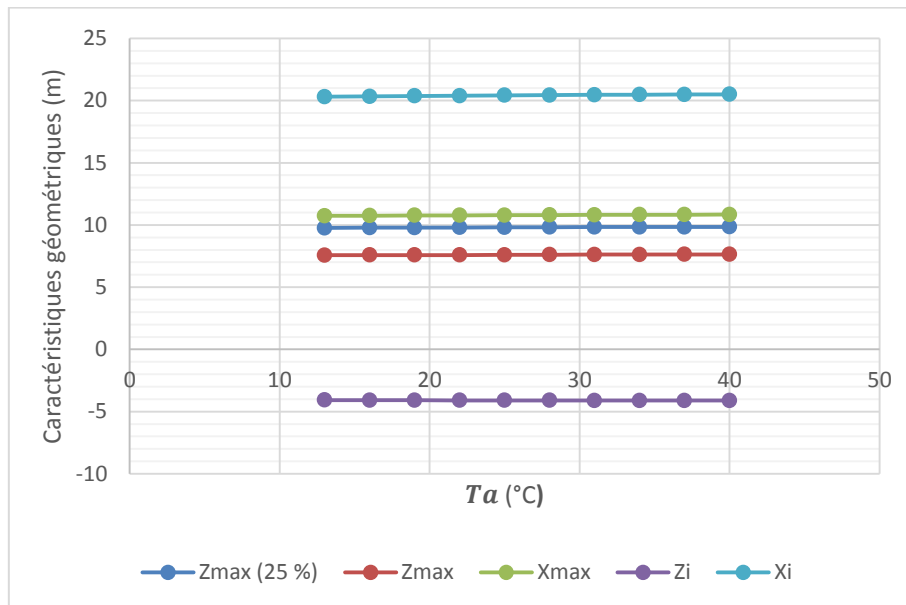


Figure III.4 : Graphique représentant les caractéristiques géométriques en fonction de la température ambiante [49].

Tableau III.1 : Evolution des longueurs caractéristiques en fonction de la température ambiante [49].

$T_a(^{\circ}C)$	Longueurs caractéristiques			
	$M_0(m^4/s^2)$	$J_0(m^4/s^3)$	$L_Q(m)$	$L_M(m)$
13	5.09	-0.26	0.44	6.69
16	5.09	-0.26	0.44	6.70
19	5.09	-0.26	0.44	6.71
22	5.09	-0.25	0.44	6.71
25	5.09	-0.25	0.44	6.72
28	5.09	-0.25	0.44	6.73
31	5.09	-0.25	0.44	6.73
34	5.09	-0.25	0.44	6.74
37	5.09	-0.25	0.44	6.74
40	5.09	-0.25	0.44	6.75

La **Figure III.4** montre que la température ambiante de l'eau de mer influence légèrement le comportement du panache. La limite supérieure du panache ($Z_{max}(25\%)$) et la hauteur maximale du centre du jet (Z_{max}) augmentent légèrement avec la température, en raison d'un contraste de densité réduit entre la saumure et l'eau chaude. Toutefois, cette variation reste modérée, les paramètres d'injection (vitesse, angle, diamètre) conservant un rôle prédominant.

La distance horizontale maximale atteinte par le centre du jet (X_{max}) croît aussi légèrement avec la température, en lien avec la baisse de viscosité et une meilleure conservation de la vitesse du jet. En revanche, la profondeur du centre du jet au point d'impact (Z_i) reste quasi-stable, principalement dictée par les conditions d'injection. Enfin, la position horizontale du centre du jet au point d'impact (X_i) augmente faiblement. Cette évolution est liée à une diminution de la viscosité de l'eau chaude, qui réduit la résistance au déplacement du panache, confirmant l'influence secondaire de la température sur la trajectoire horizontale du rejet.

D'après les résultats du **Tableau III.1**, on constate que le flux de quantité de mouvement (M_0) reste constant tout au long des simulations. Cela est attendu, car ce paramètre dépend principalement du débit et des caractéristiques géométriques du rejet, qui n'ont pas été modifiés.

On observe une légère augmentation du flux de flottabilité (J_0) lorsque la température ambiante augmente. Cette évolution indique une diminution du contraste de densité entre l'effluent et le milieu récepteur. Elle est physiquement cohérente, car l'augmentation de la température entraîne une réduction de la densité de l'eau ambiante, atténuant ainsi l'effet de flottabilité.

L'échelle de longueur du rejet (L_Q) reste stable quelle que soit la température ambiante. Cette stabilité s'explique par le fait que ce paramètre dépend essentiellement du débit et de la géométrie de la buse et non des propriétés thermiques du milieu ambiant.

On remarque une légère augmentation de l'échelle de longueur de quantité de mouvement (L_M) avec la température ambiante. Cette tendance, bien que modérée, reflète une influence indirecte de la température sur la dynamique du jet.

III.4.2 Influence de la salinité ambiante sur les caractéristiques du jet

Pour étudier l'effet de la salinité ambiante, nous avons fait varier sa valeur de 15ppt à 60ppt, avec un pas de 5 ppt. Tous les autres paramètres ont été conservés identiques à ceux de l'étude précédente, à l'exception de la température ambiante, qui a été ici fixée à 22°C, cette dernière étant considérée constante dans cette analyse.

La figure III.5 montre l'évolution des caractéristiques géométriques du jet en fonction de (Sal_a) suivie du tableau qui regroupe les longueurs caractéristiques obtenus.

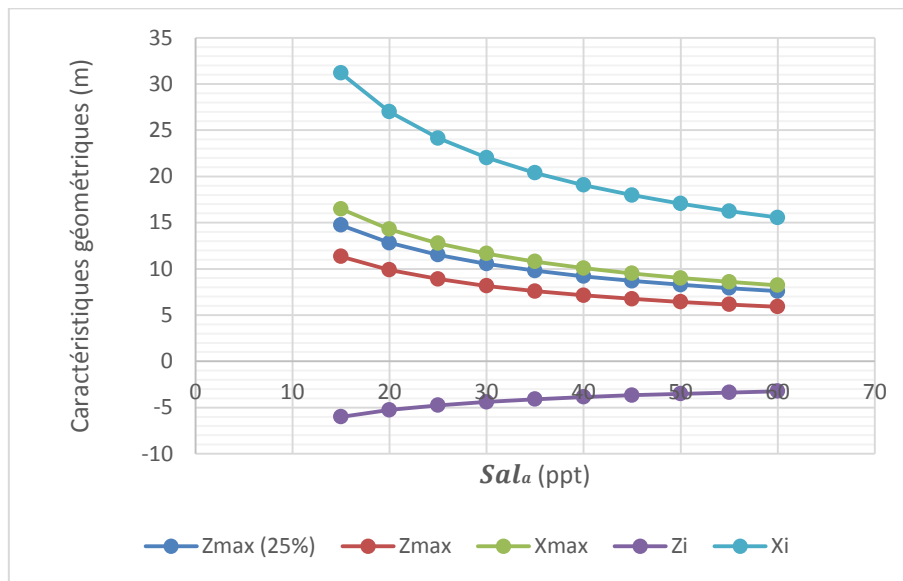


Figure III.5 : Graphique représentant les caractéristiques géométriques en fonction de la salinité ambiante [49].

Tableau III.2 : Evolution des longueurs caractéristiques en fonction de la salinité ambiante [49].

Sal_a (ppt)	Longueurs caractéristiques			
	$M_0(m^4/s^2)$	$J_0(m^4/s^3)$	$L_Q(m)$	$L_M(m)$
15	5.09	-0.11	0.44	10.17
20	5.09	-0.15	0.44	8.89
25	5.09	-0.18	0.44	7.95
30	5.09	-0.22	0.44	7.25
35	5.09	-0.25	0.44	6.71
40	5.09	-0.29	0.44	6.28
45	5.09	-0.33	0.44	5.92
50	5.09	-0.36	0.44	5.61
55	5.09	-0.40	0.44	5.35
60	5.09	-0.44	0.44	5.12

D'après la **Figure III.5**, l'augmentation de la salinité ambiante entraîne une baisse progressive de la limite supérieure du panache ($Z_{max}(25\%)$) et la hauteur maximale du centre du jet (Z_{max}), en raison d'un affaiblissement du contraste de densité entre la saumure et l'eau environnante, ce qui réduit la capacité du jet à s'élever. Le panache reste ainsi davantage confiné en profondeur, limitant sa dilution en surface.

La distance horizontale maximale atteinte par le centre du jet (X_{max}) diminue également avec la salinité, traduisant une portée latérale réduite du panache, causée par une flottabilité négative renforcée. En revanche, la profondeur du centre du jet au point d'impact (Z_i) montre une remontée progressive, indiquant un impact un peu moins profond, car le jet tend à se stabiliser plus tôt. Enfin, la position horizontale du centre du jet au point d'impact (X_i) diminue aussi, du fait d'un élan affaibli lié à la réduction du contraste de densité.

Selon les données présentées dans le **Tableau III.2**, on constate que le flux de quantité de mouvement (M_0) reste constant sur l'ensemble des simulations. Cette stabilité est attendue car ce paramètre dépend uniquement du débit et des dimensions de la buse, qui n'ont pas été modifiés.

On observe une augmentation progressive (en valeur absolue) du flux de flottabilité (J_0) lorsque la salinité ambiante augmente. Cette évolution traduit un renforcement du contraste de densité entre le rejet et le milieu ambiant plus salé. Ainsi, les forces de flottabilité deviennent de plus en plus marquées, ce qui accentue la dynamique verticale du jet.

L'échelle de longueur du rejet (L_Q) demeure inchangée, quelle que soit la salinité ambiante. Cela confirme que ce paramètre dépend essentiellement du débit et la section de sortie, qui restent constantes.

On remarque une diminution continue de l'échelle de longueur de quantité de mouvement (L_M) à mesure que la salinité ambiante augmente. Cette tendance illustre une transition progressive vers un régime d'écoulement dominé par la flottabilité. En effet, plus la salinité

ambiante augmente, plus le jet est influencé par les forces de flottabilité, ce qui réduit la distance sur laquelle le mouvement initial du jet domine.

III.4.3 Influence de l'angle de décharge sur les caractéristiques du jet

Pour étudier l'effet de l'angle de décharge, nous avons fait varier cet angle de 10° jusqu'à 55°, avec un pas de 5°. La salinité ambiante a été fixée à **35 ppt**, et tous les autres paramètres ont été conservés identiques à ceux utilisés dans les études précédentes.

La figure ci-dessous illustre l'évolution des caractéristiques géométriques du jet en fonction de (θ_0), suivie d'un tableau récapitulatif présentant les principales longueurs caractéristiques du jet lors de cette troisième simulation.

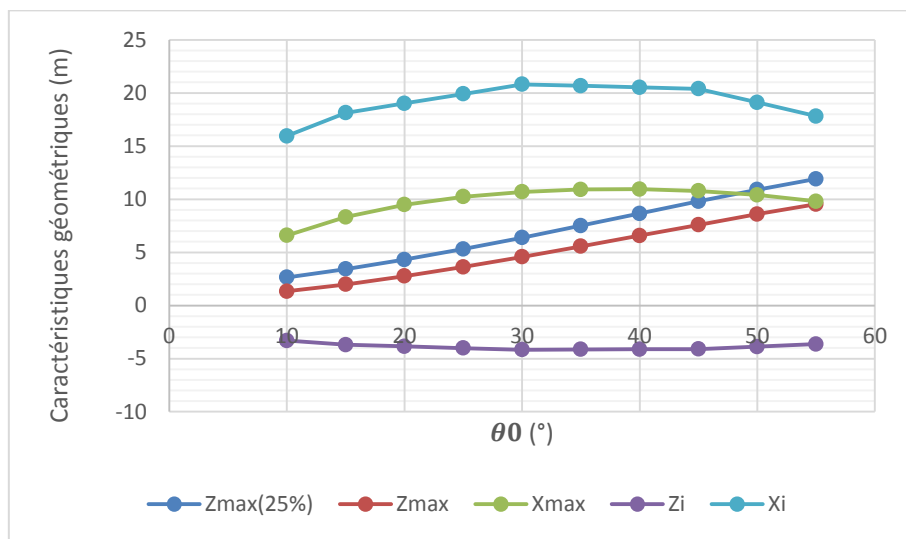


Figure III.6 : Graphique représentant les caractéristiques géométriques en fonction de l'angle de décharge [49].

Tableau III.3 : Evolution des longueurs caractéristiques en fonction de l'angle de décharge [49].

θ_0 (degré)	Longueurs caractéristiques			
	$M_0(m^4/s^2)$	$J_0(m^4/s^3)$	$L_Q(m)$	$L_M(m)$
10	5.09	-0.25	0.44	6.71
15	5.09	-0.25	0.44	6.71
20	5.09	-0.25	0.44	6.71
25	5.09	-0.25	0.44	6.71
30	5.09	-0.25	0.44	6.71
35	5.09	-0.25	0.44	6.71
40	5.09	-0.25	0.44	6.71
45	5.09	-0.25	0.44	6.71
50	5.09	-0.25	0.44	6.71
55	5.09	-0.25	0.44	6.71

La **Figure III.6** montre que l'augmentation de l'angle de décharge entraîne une élévation progressive de la limite supérieure du panache ($Z_{max}(25\%)$) et la hauteur maximale du centre du jet (Z_{max}), traduisant une meilleure répartition verticale de l'énergie du jet. Cela favorise la dilution mais peut aussi accroître les risques d'interaction avec les zones sensibles en surface, d'où l'importance de bien ajuster l'angle.

La distance horizontale maximale atteinte par le centre du jet (X_{max}) diminue avec un angle plus élevé, car l'énergie du jet est alors orientée davantage vers le haut. À l'inverse, un angle faible favorise un étalement horizontal plus important.

La profondeur du centre du jet au point d'impact (Z_i) varie selon l'angle : elle est maximale autour de 30–40°, ce qui suggère qu'un angle intermédiaire assure une immersion optimale du rejet.

Enfin, la position horizontale du centre du jet au point d'impact (X_i) augmente jusqu'au maximum, puis diminue, confirmant qu'un angle intermédiaire équilibre la portée et l'immersion, améliorant ainsi l'efficacité du rejet.

Il ressort de **Tableau III.3** que le flux de quantité de mouvement (M_0) reste constant tout au long des simulations. Cela s'explique par le fait que les paramètres influençant (M_0), tels que le débit et la géométrie de la buse, n'ont pas été modifiés.

Le flux de flottabilité (J_0) est stable, ce qui est logique puisque la différence de densité entre le rejet et le milieu ambiant, ainsi que le débit sont restés inchangés.

L'échelle de longueur du rejet (L_Q) ne varie pas selon l'angle de décharge. Ce comportement suggère que ce paramètre dépend principalement des caractéristiques hydrauliques et non de l'orientation du jet.

L'échelle de longueur de quantité de mouvement (L_M) reste inchangée, quel que soit l'angle de rejet. Cela indique une indépendance de cette grandeur vis-à-vis de l'inclinaison du jet, dans les conditions de simulation étudiées.

III.4.4 Influence du diamètre de la buse sur les caractéristiques du jet

Pour étudier l'effet du diamètre de la buse, nous avons fait varier cette valeur de 0,1 m à 1 m, avec un pas de 0,1 m. L'angle de décharge a été fixé à 45°, et tous les autres paramètres ont été maintenus constants, identiques à ceux des études précédentes.

La figure ci-dessous illustre l'évolution des caractéristiques géométriques du jet en fonction du (D). Le tableau associé présente les valeurs des longueurs caractéristiques obtenues.

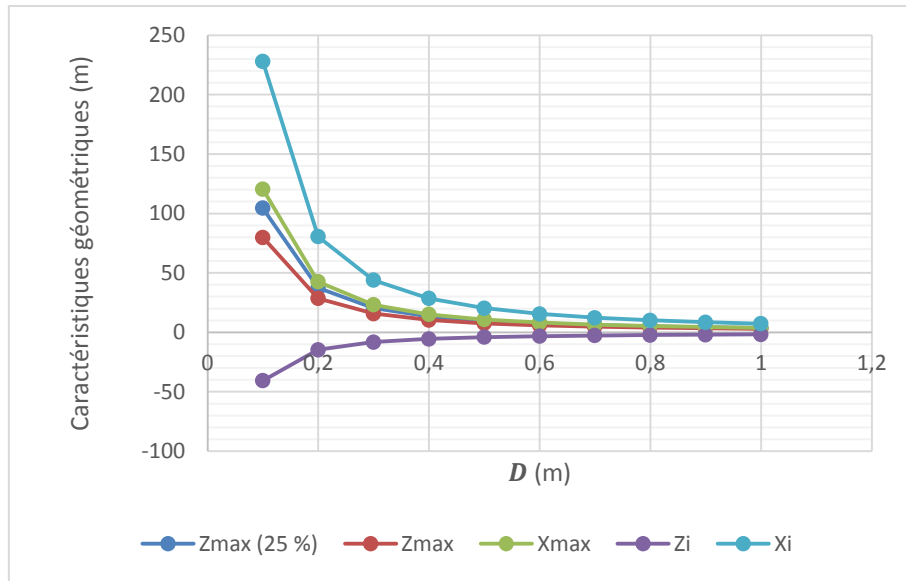


Figure III.7 : Graphique représentant les caractéristiques géométriques en fonction du diamètre de la buse [49].

Tableau III.4 : Evolution des longueurs caractéristiques en fonction du diamètre de la buse [49].

D (m)	Longueurs caractéristiques			
	$M_0(m^4/s^2)$	$J_0(m^4/s^3)$	$L_Q(m)$	$L_M(m)$
0.1	127.32	-0.26	0.09	75.06
0.2	31.83	-0.26	0.18	26.54
0.3	14.15	-0.26	0.27	14.45
0.4	7.96	-0.25	0.35	9.38
0.5	5.09	-0.25	0.44	6.71
0.6	3.54	-0.25	0.53	5.11
0.7	2.60	-0.25	0.62	4.05
0.8	1.99	-0.25	0.71	3.32
0.9	1.57	-0.25	0.80	2.78
1	1.27	-0.25	0.89	2.73

La Figure III.7 montre que l'augmentation du diamètre de la buse entraîne une baisse progressive de la limite supérieure du panache ($Z_{max}(25\%)$) et de la hauteur maximale du centre du jet (Z_{max}). En effet, un jet issu d'une petite buse est plus concentré et rapide, ce qui lui permet de mieux s'élever. À l'inverse, une buse plus large produit un jet plus lent, qui se dilue rapidement et reste proche du fond.

De la même manière, La distance horizontale maximale atteinte par le centre du jet (X_{max}) diminue avec le diamètre. Un petit diamètre donne un jet plus fin et plus rapide, capable de conserver son impulsion horizontale plus longtemps, tandis qu'un jet large perd de l'énergie plus vite. La profondeur du centre du jet au point d'impact (Z_i) diminue également, car les jets plus larges manquent d'inertie verticale pour s'enfoncer profondément.

Enfin, la position horizontale du centre du jet au point d'impact (X_i) se raccourcit à mesure que le diamètre augmente, confirmant une réduction de la portée horizontale. Ainsi, un diamètre plus important limite à la fois la pénétration verticale et la dispersion horizontale, ce qui affecte l'efficacité de dilution du rejet.

A partir du **Tableau III.4**, on note une diminution marquée du flux de quantité de mouvement (M_0) à mesure que le diamètre de la buse augmente. Ce comportement s'explique par la réduction progressive de la vitesse de sortie du jet, pour un débit constant une ouverture plus large entraîne une moindre vitesse, ce qui diminue fortement l'intensité du mouvement initial.

Le flux de flottabilité (J_0) reste parfaitement stable tout au long des simulations, cela est cohérent car cette grandeur dépend principalement de la différence de densité entre le rejet et le milieu ambiant, ainsi que le débit, deux paramètres qui n'ont pas été modifiés.

L'échelle de longueur du rejet (L_Q) croît régulièrement avec l'augmentation du diamètre. Cela indique qu'un diamètre plus grand génère un jet initial plus large et plus étalé.

On observe une réduction significative de l'échelle de longueur de quantité de mouvement (L_M) lorsque le diamètre augmente. Un jet issu d'une buse plus large tend à s'épuiser plus rapidement, car la vitesse initiale plus faible limite sa capacité de pénétration dans le milieu récepteur.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mené une analyse dimensionnelle des rejets de saumures issus du procédé d'OI, en nous appuyant sur l'outil « Desalination Plant Discharge Calculator » à travers une série de simulations, nous avons pu évaluer l'influence de différents paramètres physiques et hydrodynamiques sur le comportement du jet de saumure.

Les résultats obtenus montrent que les caractéristiques géométriques du jet sont principalement influencées par la salinité ambiante, l'angle de décharge et le diamètre de la buse, tandis que les longueurs caractéristiques dépendent surtout de la salinité ambiante et du diamètre de la buse. La température ambiante et l'angle de décharge modifient peu ces longueurs, mais influencent la forme du jet. Le diamètre de la buse reste le paramètre ayant l'impact le plus marqué sur l'ensemble du comportement du jet.

Cependant, l'outil bidimensionnel n'autorise que l'insertion de valeurs d'entrée comprises dans une plage prédéfinie. Il n'est donc pas possible de simuler des conditions extrêmes ou hors cadre, ce qui limite l'étendue de l'analyse.

Conclusion générale

Et

Perspectives

Conclusion générale et perspectives

Ce travail de fin de cycle a porté sur l'analyse des stations de dessalement par osmose inverse, en mettant particulièrement l'accent sur leurs rejets de saumure en milieu marin. À travers deux approches complémentaires l'une basée sur l'imagerie satellitaire, l'autre sur la simulation numérique, nous avons pu explorer aussi bien la configuration physique des stations que le comportement dynamique des effluents rejetés.

L'observation des installations via Google Earth Pro a permis de localiser précisément les unités de dessalement et d'identifier leurs zones de rejet. Cette méthode géospatiale, bien qu'indirecte, s'est révélée efficace pour effectuer des mesures telles que les surfaces des stations ou l'extension des panaches de saumure. Elle offre ainsi une alternative précieuse, notamment dans les situations où les contraintes logistiques ou géographiques rendent l'accès au terrain difficile, voire impossible.

Par la suite, des simulations hydrodynamiques ont été réalisées à l'aide de l'outil « Desalination Plant Discharge Calculator », afin de mieux comprendre la dispersion des rejets dans le milieu marin. Ces simulations ont permis de tester l'effet de plusieurs paramètres, notamment la salinité ambiante, la température ambiante, le diamètre de la buse et l'angle de décharge. Ces deux études complémentaires ont permis d'élargir la compréhension du fonctionnement des stations de dessalement et de leurs systèmes de rejets en mer. Les conclusions principales qui en ressortent sont les suivantes:

- Les stations de dessalement au Moyen-Orient se caractérisent par une conception centralisée, souvent intégrée à des centrales électriques, avec des infrastructures de grande taille. À l'inverse, en Afrique du Nord, les installations sont généralement plus modestes, construites selon une approche plus simple et modulaire.
- Une différence marquée entre les approches adoptées dans la région MOAN : Les pays du Moyen-Orient tendent à privilégier des rejets structurés à l'aide de diffuseurs multiports, tandis que les installations d'Afrique du Nord recourent plus souvent à des buses simples, ce qui peut limiter l'efficacité de la dispersion.
- Les systèmes de rejet dotés de diffuseurs multiports assurent une dispersion plus homogène de la saumure dans le milieu marin, contrairement aux installations équipées de buses uniques, où la dilution reste plus limitée.
- Le rejet en zones marines profondes favorise une meilleure diffusion du panache et limite davantage les effets environnementaux que les rejets effectués en eaux peu profondes.
- L'étude a permis de cerner les facteurs clés influençant la dynamique des rejets de saumure, en particulier ceux liés aux conditions du milieu et à la géométrie du système.
- Le diamètre de la buse joue un rôle prépondérant sur la structure et le comportement global du jet.
- La salinité de l'eau de mer est un paramètre déterminant dans la variation des longueurs caractéristiques du rejet.

- L'angle de décharge et la température ambiante agissent surtout sur la morphologie du jet, sans modifier profondément ses dimensions.
- L'efficacité du système de rejet se mesure souvent par la longueur du champ proche (zone de mélange initial) et l'évolution du champ lointain (zone de dilution progressive).
- Les résultats permettent de guider les choix techniques pour améliorer l'efficacité et la compatibilité environnementale des dispositifs de rejet.

Ce travail a permis de mieux comprendre les enjeux et les performances du dessalement d'eau de mer par osmose inverse dans la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord. Toutefois, de nombreuses pistes d'approfondissement peuvent être envisagées pour compléter cette étude.

- Une première perspective serait de réaliser une analyse similaire dans d'autres zones géographiques, par exemple en Afrique sub-saharienne, en Amérique latine ou dans les petits États insulaires, afin d'identifier les contraintes spécifiques et les solutions adaptées à ces contextes. Cela permettrait de comparer les choix technologiques et les modèles économiques en fonction des conditions locales.
- Une deuxième piste pourrait consister à étudier d'autres procédés de dessalement, notamment les technologies thermiques comme la distillation multi-étagée (MSF), la distillation multi-effet (MED) ou encore les systèmes hybrides associant plusieurs techniques. Une telle approche offrirait une vision comparative des avantages et limites de chaque technologie selon les paramètres environnementaux, énergétiques et économiques.
- Enfin, il serait intéressant de se pencher sur l'intégration des énergies renouvelables dans les projets de dessalement, en particulier dans les zones fortement ensoleillées et ventées. L'évaluation des performances des unités alimentées par l'énergie solaire, éolienne ou des systèmes hybrides pourrait contribuer à réduire les coûts énergétiques et l'impact environnemental des installations de dessalement.

Ces perspectives ouvrent la voie à des recherches futures qui pourraient favoriser la mise en œuvre de solutions de dessalement plus durables et résilientes face aux défis liés à la rareté des ressources en eau.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Dione, O., & Al Saad, B. (2025, janvier 21). Moyen-Orient et Afrique du Nord : Chaque goutte d'eau compte !World Bank Blogs.
<https://blogs.worldbank.org/fr/voices/moyen-orient-afrique-du-nord-chaque-goutte-d-eau-compte>
- [2] Menon, M. R. (2024, août 8). Seawater desalination: Better choice for MENA. Ecomena.
<https://www.ecomena.org/desalination-mena/>
- [3] Blanchon, D. (2019). Des indicateurs pertinents pour comprendre la pénurie ? Géopolitique de l'eau. Cairn.info.
<https://shs.cairn.info/geopolitique-de-l-eau--9791031803746-page-29?lang=fr>
- [4] Buchs, A. (2012, mars). Comprendre la pénurie en eau comme un phénomène social, un panorama des approches. Économie du développement durable et de l'énergie. HAL-SHS.
- [5] Ernoult, M., & Rigaux, L. (2010, Janvier). L'eau sous très haute tension en état de manque. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Aquastat.
https://www.cuej.info/mini-sites/data/data_032018/eau/html/1_stress.html
- [6] Ouahib, S. (2023, janvier 30). La sécurité hydrique passe par le dessalement de l'eau de mer : Comment mettre à profit l'osmose inverse ? El Watan.
- [7] Badelier, P. (2016, novembre 29). Le dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres. Encyclopédie de l'énergie.
<https://www.encyclopedie-energie.org/le-dessalement-deau-de-mer-et-des-eaux-saumatres/>
- [8] Mori, C. (2023, mai 1). Le dessalement d'eau, bénéfices et impact environnemental.Satista.
- [9] Maurel, A. (2006, juin 2). Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce (2e éd.).
- [10] Ibrahim, H. D., & Eltahir, A. B. (2019). Impact of brine discharge from seawater desalination plants on Persian/Arabian Gulf salinity. Journal of Environmental Engineering, 145(12).
- [11] Connaissance des Énergies. Dessalement de l'eau : Comment, quand l'utiliser et à quel prix ?
<https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/combien-denergie-faut-il-pour-dessaler-de-leau-de-mer>
- [12] Reanudin, V. (2003, novembre 18). Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres.CultureSciences-Chimie.
<https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-physique/thermodynamique-chimique/le-dessalement-de-l-eau-de-mer-et-des-eaux>
- [13] Danis, P. (2003, juin). Dessalement de l'eau de mer. Techniques de l'ingénieur, traité génie des procédés J 2700.
- [14] Niepelt, A., Bleninger, T., & Jirka, G. (2008, janvier). Desalination brine discharge modelling: Coupling of hydrodynamic models for brine discharge analysis.
- [15] RédactionFutura. (2020, novembre 20). Pression osmotique : qu'est-ce que c'est ? Futura-Sciences.
<https://www.futura-sciences.com/sante/definitions/medecine-pression-osmotique-800/>
- [16] SUEZ. Desalination: From seawater to drinking water, a solution to water stress[Brochure].

- <https://www.suez.com/en/water/water-distribution/water-resources/water-desalination>
- [17] Agence France-Presse. (2025, mai). Énergies renouvelables : OKwind va entrer au capital d’OsmoSun, spécialiste des solutions de dessalement. Ouest-France (Agence API).
<https://fr.hach.com/industries/desalination/water-desalination-solutions>
- [18] Moussou, C. (2025, 19 mai). Dessalement au Maghreb : le renforcement des capacités annoncé dans un pays. La Nouvelle Tribune.
<https://lanouvelletribune.info/2024/10/dessalement-au-maghreb-reception-de-nouveaux-equipements/>
- [19] QT Water Tech. (2025, avril 26). Système de dessalement par osmose inverse. QT Water Tech. <https://www.qt-water.ma/systeme-dessalement-osmose-inverse/>
- [20] Moussa, R. (2022, novembre 17). Le dessalement d’eau de mer et des eaux saumâtres. Encyclopédie de l’Énergie.
<https://www.encyclopedie-energie.org/le-dessalement-deau-de-mer-et-des-eaux-saumatres/>
- [21] Société Bouzguenda Frères (SBF). (2016). Station de dessalement des eaux de mer à Djerba.SBF.
- [22] CondorchemEnviro Solutions. Gestion des saumures dans le traitement des eaux usées.Condorchem Envitech Evidest-Evaporators-Desalt-Crystallizers.
[Energies renouvelables. Okwind va entrer au capital d’Osmosun, spécialiste des solutions de dessalement](#)
- [23] Palomar, P., &Losada, I. J. (2013). Impact of brine discharges on the marine environment: Modelling as a predictive tool. Environment Hydraulics Institute "IH Cantabria", Universidad de Cantabria.
- [24] Blesing, J. E., &Pelekeni, C. (2016). Seawater desalination: A sustainable solution to world water shortage – Planning, design, construction and operation of the Adelaide Desalination Plant. In Desalination: Seawater desalination – A sustainable solution to world water shortage (Vol. 1).
- [25] Ahmouda, I., &Biaa, H. (2016). Traitement des rejets de dessalement de l’eau de mer : Cas de « Les Dunes », Oran (Mémoire de master, Université Larbi Tebessi).
- [26] Marc-Antoine, D., &Eyl-Mazzega, M. (2022, septembre). Géopolitique du dessalement d’eau de mer. Institut français des relations internationales (Ifri).
- [27] Amokrane, M., & Salmi, A. (2021). Surface spreading of the brine discharge from the seawater reverse osmosis plants :Hamma Water Desalination plant in Algeria. Desalination and Water Treatment, 222, 81-91.
- [28] Naimi, O., Abdelkader, L., Abdelkader, F., Bouabdesselam, H., Ezzine, M. C., Abdelmalek, B., Mokhtari, M., &Elhouda, S. N. (2024). On the seawater desalination environmental impacts and brine treatment based challenges and mitigation measures in Algeria. Studies in Engineering and Exact Sciences, 5(1), 562-584.
- [29] Remini, B., &Amitouche, M. (2023). Is sustainable desalination the safe way for achieving water security ?Larhyss Journal (n° 54), 239-267.
- [30] Yousfi, A., &Chedik, L. (2024). Etude des rejets de saumures des usines de dessalement de l’eau de mer en utilisant l’imagerie satellite (Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri Tizi-ouzou). DSpace UMMTO.
- [31] Google Earth Pro software.
- [32] Futura Sciences. (2015, 12 Avril). Google Earth: définition.

<https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/internet-google-earth-3988/>

- [33] HWDHammaWaterDesalination Spa. A propos de HWD.
- [34] Arab Fund for Economic and Social Development. (2025, 12 mai). Irrigation of the ChtoukaAïtBaha region with desalinated water. ArabFund for Economic and Social Development.
- [35] Médias24. (2024, 7 mai). Dessalement: visite guidée au cœur de la station de Chtouka. Médias24. <https://youtu.be/vk3WVSPW510?feature=shared>
- [36] SIDEM – Smart Desalination. (2021, janvier). Wave 16 – IDA Dubai [Brochure PDF]. Veolia Water Technologies. [https://www.sidem-desalination.com/sites/g/files/dvc2856/files/document/2021/01/190276_SIDEM_Wave_16_IDA_Dubai_HR%20\(3\).pdf](https://www.sidem-desalination.com/sites/g/files/dvc2856/files/document/2021/01/190276_SIDEM_Wave_16_IDA_Dubai_HR%20(3).pdf)
- [37] SUEZ. (2015, mars). Al Dur:Seawater reverse osmosisdesalination plant [Fiche de projet]. SUEZ Water Handbook https://www.suezwaterhandbook.com/content/download/5689/91232/version/5/file/AL_DUR_EN_A4.pdf
- [38] Fujairah Fresh Water Production Company. (2014, Juin). Seawater desalination plant for Fujairah Fresh Water Production Company at Fujairah Port – UAE.
- [39] Veolia. (2016). Reverse osmosis desalination: Our global expertise to address scarcity. Desalination – An alternative solution to increase available water resources. Veolia Water.
- [40] Veolia. (2017). AzZour nord et sud – Koweït [Étude de cas]. Veolia.
- [41] Voutchkov, N. (2018). Pretreatment for reverse osmosisdesalination. DEStech Publications. ISBN: 9781605950714
- [42] KRAH. (2014, 22 septembre). PE100 solidwallKrah pipes for marine intake and outfall pipeline [Article de presse en ligne]. KRAH.
- [43] Urnama, S., Al Barwani, H. H., Beleninger, T., &Doneker, R. L. (2011). CORMIX simulations of brine discharges from Barka plants, Oman. Desalination, 273(1), 329–338.
- [44] La Tribune. (2020). Eaux alternatives : comment Suez tente de s’imposer au Moyen-Orient. La Tribune.
- [45] The Economics of Reverse Osmosis Desalination Projects (2016). CORE.
- [46] Zaidi, S. J., &Saleem, H. (2021). Reverse osmosis systems: Design, optimization and troubleshooting guide. Springer.
- [47] Mounir, E. (2025, 9 janvier). Rising salinity and carbone emissions: Who bears the cost of water security in Qatar ? Pulitzer Center. <https://pulitzercenter.org/stories/rising-salinity-and-carbon-emissions-who-bears-cost-water-security-qatar>
- [48] Umm Al HouL. (2015, septembre). Recirculation & thermal dispersion studies(Rapport n° DKR5430-R001-R02-00).
- [49]Bleninger, T., Niepelt, A., &Jirka, G. (2009, May 17-20). Desalination plant discharge calculator (Paper BD 180, EDS Congress, Baden-Baden, Germany).
- [50] Microsoft Corporation Photos [Application Windows]. Inclus dans Windows 10 Professionnel.

- [51] Le Roux, M. (2010, mars). Investigation of marine components of large direct seawater intake & brine discharge systems for desalination plants: Towards development of a general design approach (Mémoire de master, Department of Civil Engineering, University of Stellenbosch).
- [52] Agence Nationale Des Eaux et Assainissement. (2024, 04 May). Une visite à l'intérieur de la station de dessalement de Chtouka (Souss Massa) [vidéo]. YouTube.
- [53] Jenkins, S., Paduan, J., Roberts, P. (chair), Schlenk, D., & Weis, J. (2012, mars). Management of Brine Discharges to Coastal Waters : Recommendations of a Science Advisory Panel (Technical Report 694). Southern California Coastal Water Research Project.
- [54] 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*, 279, 16-28.
- [55] Bleninger, T., & Jirka, G. H. (2010). Environmental planning, prediction and management of brine discharges from desalination plants : Final report (2nd Periodic Report). Middle East Desalination Research Center (MEDRC), Muscat, Sultanate of Oman ; Institute for Hydromechanics, Karlsruhe Institute of Technology, Germany.
- [56] Bashitialshaaer, R., Larson, M., & Persson, K. M. (2012). An Experimental Investigation on Inclined Negatively Buoyant Jets. *Water*, 4(3), 720-738.

Annexe

Détails techniques supplémentaires des stations étudiées

El Hamma, Alger, Algérie

Technologie	Osmose inverse
Capacité de production (m^3/j)	200 000
Consommation énergétique spécifique (kWh/m^3)	3.2
Emissaire de captation	Deux (02) conduites d'admission de 550 mm de long, chacun alimentant une pompe dédiée et prélevée à 10 m de profondeur.
Emissaire de rejet	Un canal de 258 m de long, 1.6 m de diamètre intérieur, 8 m de profondeur avec une buse de sortie à port unique sans diffuseur.
Matériaux des pipelines	Béton armé.

Ténès, Chlef, Algérie

Technologie	Osmose inverse
Capacité de production (m^3/j)	200 000
Consommation énergétique spécifique (kWh/m^3)	3
Emissaire de captation	Deux (02) tuyaux de 600 m de longueur, 1800 mm de diamètre, 8 à 10 m de profondeur.
Emissaire de rejet	Un tuyau sous-marin de 200 m de longueur, 5 m de profondeur avec diffuseur multi-port système double alternative.
Matériaux des pipelines	Plastique Renforcé de Fibres de Verre (PRFV).

Chtouka Ait Baha, Maroc

Technologie	Osmose inverse
Capacité de production (m^3/j)	275 000
Consommation énergétique spécifique (kWh/m^3)	3.4
Emissaire de captation	Deux (02) conduites sous-marines de 1100 m de long, 2400 mm de diamètre.
Emissaire de rejet	Une canalisation sous-marine de 660 m de long, 1800 mm de diamètre avec un diffuseur intégré.
Matériaux des pipelines	Béton armé.

Al Ghubrah, Oman

Technologie	Osmose inverse
Capacité de production (m^3/j)	191 932
Consommation énergétique spécifique (kWh/m^3)	3.5
Emissaire de captation	Deux (02) canalisation de 1550 m de longueur, 1700 mm de diamètre intérieur, épaisseur de la paroi 71 mm.
Emissaire de rejet	Un tuyau de 1000 m de longueur, 1900 mm de diamètre intérieur, 2058 de diamètre extérieur, 79 mm d'épaisseur de la paroi, pression nominal PN 6 avec un diffuseur unidirectionnel multi-ports de 65 m de longueur, 30 ports dont 24 fonctionnels et 6 en veille.
Matériaux des pipelines	Polyéthylène Haute Densité (PEHD).

Al Dur, Bahreïn

Technologie	Osmose inverse
Capacité de production (m^3/j)	218 000
Consommation énergétique spécifique (kWh/m^3)	3.5
Emissaire de captation	Quatre (04) conduites indépendantes équipées de trappes d'entretien tous les 200 m à des fins de maintenance et 6 à 8 m de profondeur. Le réservoir de prise d'eau de mer commun aux centrales électriques et à la station.
Emissaire de rejet	Rejet direct (Rejet en canal ouvert).
Matériaux des pipelines	Plastique Renforcé de Fibres de Verre (PRFV).

Fujairah F1, Emirats Arabes Unis

Technologie	Osmose inverse et MSF
Capacité de production (m^3/j)	455 00
Consommation énergétique spécifique (kWh/m^3)	Système MSF entre 80 et 120 Système RO entre 3 et 4
Emissaire de captation	Trois (03) conduites de solution chlorée, de 400 m de longueur, 710 mm de diamètre extérieur, 10 m de profondeur (6 m au-dessus du fond marin).
Emissaire de rejet	Deux (02) rejets différents: -Rejet en canal ouvert (IWPP outfall) -Rejet RO (SWRO outfall): une conduite de 200m de longueur, 355mm de diamètre extérieur, 1m de profondeur, diffuseur de 45 m de long avec 10 orifices de décharge orientés chaque orifice a un diamètre de 0.75 m orienté à 30° verticalement vers le haut.
Matériaux des pipelines	-Captation d'eau: Plastique Renforcé de Fibres de verre (PRFV). -Rejet de saumure: Polyéthylène Haute Densité (PEHD).

Fujairah F2, Emirats Arabes Unis

Technologie	Osmose inverse et MED
Capacité de production (m^3/j)	591 000
Consommation énergétique spécifique (kWh/m^3)	Système MED entre 80 et 100 kwh/mcubes Système RO 3.7 kwh/mcubes
Emissaire de captation	Trois (03) conduites parallèles de 500 m de long, de 4 m de diamètre, 2 m de profondeur avec une conduite de dosage de chloration de 300 mm de diamètre. La prise d'eau est équipée de quatre (04) pompes à turbine à arbre vertical (Trois en service et une en veille).
Emissaire de rejet	Rejet en canal ouvert (Rejet direct).
Matériaux des pipelines	Plastique Renforcé de Fibres de Verre (PRFV).

Ras Abu Fontas A3, Qatar

Technologie	Osmose inverse
Capacité de production (m^3/j)	165 000
Consommation énergétique spécifique (kWh/m^3)	3.5
Emissaire de captation	Deux (02) canalisations de 2500 m de longueur, 2.5 m de diamètre
Emissaire de rejet	Une canalisation de 700 m de longueur, 23 m de diamètre, 6.7 m de profondeur via un diffuseur multi-ports unidirectionnel.
Matériaux des pipelines	Plastique Renforcé de Fibres de Verre (PRFV).

Barka 2, Oman

Technologie	Osмосe inverse
Capacité de production (m^3/j)	120 000
Consommation énergétique spécifique (kWh/m^3)	3.3
Emissaire de captation	Quatre (04) conduites parallèles en de 1.2 Km de longueur, chacune 2.2 m de diamètre, espacées de manière égale de 2 m, enterrées sous le fond marin (non visibles à la surface) et la structure de prise d'eau s'ouvre à 1.5 m au dessus du fond marin.
Emissaire de rejet	Quatre (04) conduites parallèles de 800 m de long, 2,5 m de diamètre, inclinées à 62°, enterrées à 5 m sous le fond marin, espacées de 4,8 m. Un diffuseur multiport pour chaque conduite de 62,4 m dont neuf orifices espacés de 7,5 m. Les diffuseurs agencés en deux « V » imbriqués, divergeant à 30° de part. Chaque orifice de 0,7 m est situé à 1 m au-dessus du fond marin et rejette la saumure à un angle de 10° au-dessus de l'horizontale.
Matériaux des pipelines	Polyéthylène Haute Densité (PEHD).

Barka 4, Oman

Technologie	Osмосe inverse
Capacité de production (m^3/j)	281 000
Consommation énergétique spécifique (kWh/m^3)	3 à 3.5
Emissaire de captation	Deux (02) conduites d'admission sous-marines chacune de 1525 m de longueur, de 2200 mm de diamètre.
Emissaire de rejet	Deux (02) conduites chacune 812 m de long, 1400 mm de diamètre, 5 m de profondeur. Chaque conduite est équipée d'un diffuseur multiport à son extrémité.
Matériaux des pipelines	Polyéthylène Haute Densité (PEHD).

Sadara, Arabie Saoudite

Technologie	Osmose inverse
Capacité de production (m^3/j)	178 650
Consommation énergétique spécifique (kWh/m^3)	4.35
Emissaire de captation	Les conduites souterraines du système de refroidissement de Marafiq à Jubail, acheminent l'eau de mer captée dans le golfe Persique après filtration et traitement au chlore, depuis une station de pompage jusqu'à l'usine.
Emissaire de rejet	Canalisation situé à environ 20 Km de la station. La saumure est renvoyée vers la ligne de retour d'eau de mer par gravité grâce à de grands réservoirs de saumures.

Az-Zour Sud, Koweït

Technologie	Osmose inverse
Capacité de production (m^3/j)	136 450
Consommation énergétique spécifique (kWh/m^3)	3
Emissaire de captation	Conduite située à environ 260 m de la cote, l'eau est d'abord utilisée pour le refroidissement de la centrale électrique puis pompée vers l'unité d'osmose inverse pour le dessalement.
Emissaire de rejet	Système de rejet intégré à celui de la centrale électrique utilisant une conduite souterraine.
Matériaux des pipelines	Acier inoxydable Duplex.

Résumé

Face aux enjeux liés à la disponibilité limitée des ressources en eau douce et à la croissance des besoins en eau potable dans la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord, le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse constitue l'axe principal de ce mémoire. L'étude porte sur plusieurs stations de dessalement sélectionnées en fonction de leur capacité de production qui varie de 120 000 m³/jour jusqu'à 290 000 m³/jour, ce qui permet de maintenir une échelle d'analyse homogène entre les différents cas. Elle s'appuie d'une part sur l'exploitation d'images satellites pour repérer et caractériser les principales infrastructures des stations et sur un traitement des images visant à identifier et à suivre la dispersion des rejets de saumure en mer à partir des points d'émission visibles. D'autre part, elle intègre une analyse du comportement des panaches de saumure à l'aide de la méthode d'analyse dimensionnelle, basée sur le principe de l'échelle de longueur, afin de simuler la dynamique de propagation et de dilution des rejets dans le milieu marin. L'ensemble de ces approches vise à mieux comprendre les impacts environnementaux des rejets de saumure et à fournir des éléments utiles pour la conception de solutions de gestion plus respectueuses du milieu marin.

Mots clés : Dessalement d'eau de mer, osmose inverse, stations de dessalement, imagerie satellitaire, rejets de saumure.

Abstract

Given the challenges related to the limited availability of freshwater resources and the growing demand for drinking water in the Middle East and North Africa region, seawater desalination by reverse osmosis is the main focus of this thesis. The study examines several desalination plants selected based on their production capacity which varies from 120 000 m³/day to 290 000 m³/day, ensuring a consistent scale of analysis across the different cases. The work relies, on the one hand, on the use of satellite imagery to identify and characterize the main infrastructures of the plants, as well as on image processing aimed at detecting and monitoring the dispersion of brine discharges into the sea from visible outfall points. On the other hand, it includes an analysis of the behavior of brine plumes using the dimensional analysis method, based on the principle of length scale, in order to simulate the propagation dynamics and dilution of discharges in the marine environment. Together, these approaches aim to improve understanding of the environmental impacts of brine discharges and to provide useful elements for designing management solutions that are more respectful of the marine environment.

Keywords : Seawater desalination, reverse osmosis, desalination plants, satellite imagery, brine discharges.

المخلص

نظراً للتحديات المرتبطة بتوفر الموارد المحدودة من المياه العذبة وازدياد الحاجة إلى مياه الشرب في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، يشكل تحلية مياه البحر بواسطة التناضح العكسي المحور الرئيسي لهذا البحث. تركز الدراسة على عدة محطات تحلية تم اختيارها بناءً على طاقتها الإنتاجية التي تتراوح من 120 000 متر مكعب في اليوم إلى 290 000 متر مكعب في اليوم، مما يسمح بالحفاظ على مقياس تحليل متجانس بين الحالات المختلفة. تعتمد الدراسة من جهة على استخدام صور الأقمار الصناعية لرصد وتوصيف البنى التحتية الرئيسية للمحطات، وكذلك على معالجة الصور بهدف تحديد وتتبع انتشار تصريفات المحلول الملحي في البحر انطلاقاً من نقاط التصريف الظاهرة. ومن جهة أخرى، تُدمج الدراسة تحليلاً لسلوك أعمدة المحلول الملحي باستخدام طريقة التحليل البعدي، القائمة على مبدأ مقياس الطول، وذلك لمحاكاة ديناميكية انتشار وتخفيف التصريفات في البيئة البحرية. وتهدف هذه المقاربات مجتمعة إلى فهم أفضل للآثار البيئية لتصريفات المحلول الملحي وتقديم عناصر مفيدة لتصميم حلول إدارة أكثر احتراماً للبيئة البحرية.

الكلمات المفتاحية: تحلية مياه البحر، التناضح العكسي، محطات التحلية، التصوير بالأقمار الصناعية، تصريفات المحلول الملحي.