

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Hydraulique

Spécialité : Hydraulique Urbaine

Par : RACHEDI Khadidja

Sujet

Analyse et diagnostic des cas de défaillances d'une station de dessalement des eaux : Cas de la station de dessalement d'eau de Chatt El Hilal de Beni Saf

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

Mr BENADDA Lotfi	Maître de conférences A	Univ. Tlemcen	Président
Mr CHIBOUB FELLAH Abdelghani	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
Mme LALLAM Faiza	Maître de conférences B	Univ. Tlemcen	Encadreur
Mr BOUMEDIENE Maamar	Maître de conférences A	Univ. Tlemcen	Co-encadreur

Promotion : 2024 – 2025

REMERCIEMENTS

Je commence par remercier Dieu pour m'avoir donné la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens à remercier tout d'abord mes deux encadrants, **Madame LALLAM Faïza** et **Monsieur BOUMEDIENE Maâmar**, pour avoir parfaitement rempli leurs rôles, ainsi que pour les orientations précieuses qu'ils m'ont apportées. Je leur suis profondément reconnaissante pour la confiance qu'ils m'ont témoignée, ainsi que pour leurs encouragements et les conseils qu'ils m'ont prodigués.

Je remercie chaleureusement le staff technique et administratif de la station de dessalement de Beni Saf – Chatt El Hilal pour m'avoir accueillie durant mon stage. Un grand merci à Monsieur **MAKHLOUFI Mahmoud** pour son encadrement, ainsi qu'à toute l'équipe pour leur disponibilité, leur accueil et les informations précieuses fournies tout au long de cette expérience.

J'adresse également mes remerciements les plus sincères aux membres du jury, Monsieur **BENADDA Lotfi** et Monsieur **CHIBOUB FELLAH Abdelghani**, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce mémoire. Leur bienveillance, leurs remarques pertinentes et leurs conseils judicieux ont constitué pour moi une réelle source d'enrichissement académique.

Dans l'impossibilité de citer tous les noms, j'adresse mes remerciements les plus sincères à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire par leurs conseils, leur soutien et leurs compétences. J'exprime également ma profonde gratitude à l'ensemble de mes enseignantes et enseignants qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours universitaire.

DEDICACES

Je dédie ce travail à mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études. Rien n'aurait été possible sans eux.

À mes chères sœurs **Fatna**, **Fethia** et **Hiba**, pour leur appui constant, leurs encouragements permanents et leur soutien moral inestimable.

À toute ma famille, pour sa présence et son soutien durant tout mon parcours. Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux les plus chers, et le fruit de votre appui inébranlable. Merci d'avoir toujours été là pour moi.

Je dédie également ce travail à tous mes professeurs de la filière **Hydraulique**, pour la richesse de leur enseignement et leur accompagnement tout au long de ces années.

À tous mes ami(e)s, pour leur présence, leur bienveillance et les moments partagés.

Et enfin, à tous les étudiants de la filière **Hydraulique urbaine**, avec qui j'ai vécu une expérience inoubliable.

Résumé

Résumé

Face aux enjeux croissants liés à la raréfaction des ressources en eau, l'Algérie a mis en œuvre une stratégie nationale reposant largement sur le dessalement de l'eau de mer. La station de dessalement de Chatt El Hilal à Béni Saf, d'une capacité importante, fait partie intégrante de ce dispositif. Toutefois, comme toute infrastructure complexe, elle est sujette à des défaillances techniques pouvant affecter sa performance et son impact environnemental. Le présent travail a pour objectif d'analyser et de diagnostiquer ces défaillances à travers une étude détaillée des différentes étapes du procédé. Il vise également à évaluer les répercussions sur la production, la qualité de l'eau et l'environnement marin, tout en proposant des solutions d'amélioration durable.

Mots clés :

Station de dessalement, Chatt El Hillel, Défaillances techniques, Impact environnemental.

الملخص

في ظل التحديات المتزايدة المرتبطة بندرة الموارد المائية، اعتمدت الجزائر استراتيجية وطنية تقوم أساسًا على تحلية مياه البحر. وتُعد محطة تحلية المياه شط الهلال ببني صاف، ذات السعة الكبيرة، جزءًا أساسيًا من هذا البرنامج. غير أن هذه البنية التحتية، كغيرها من المنشآت المعقدة، معرضة لأعطال تقنية قد تؤثر على أدائها وعلى البيئة البحرية المحيطة بها. يهدف هذا العمل إلى تحليل وتشخيص هذه الأعطال من خلال دراسة مفصلة لمختلف مراحل المعالجة. كما يهدف إلى تقييم آثارها على الإنتاج وجودة المياه و البيئة، مع اقتراح حلول لتحسين الأداء وضمان استدامة التشغيل.

الكلمات المفتاحية :

محطة تحلية المياه، شط الهلال، الأعطال التقنية، الأثر البيئي .

Abstract

In response to the increasing challenge of water scarcity, Algeria has adopted a national strategy that relies heavily on seawater desalination. The Chatt El Hilal desalination plant in Béni Saf, with its substantial production capacity, plays a central role in this approach. Nevertheless, as with any large-scale facility, the plant is vulnerable to technical failures that may compromise its operational efficiency and environmental sustainability. This study aims to analyze and diagnose the key failures observed in the plant through a comprehensive evaluation of its desalination process. It further assesses the impacts of these failures on production performance, water quality, and the surrounding marine ecosystem, while proposing corrective actions and sustainable improvements.

Keys words:

Desalination plant, Chatt El Hillal, Technical failures, Environmental impact.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : LES RESSOURCES EN EAU EN ALGERIE	4
I.1-Introduction	4
I.2-Disponibilité de l'eau en Algérie.....	4
I.2.1-Les ressources en eau de surface	4
I.2.2-Les ressources en eau souterraines	5
I.2.3-Les eaux de mer et les eaux saumâtres	6
I.3 -Adéquation entre ressources et besoins en eau.....	6
I.3.1-Usage industriel de l'eau	6
I.3.2-Usage agricole de l'eau	7
I.3.3-Usages domestiques de l'eau	7
I.3.4 -Indicateurs de ressources en eau (seuils de tension et de pénurie)	8
I.4-Le développement du dessalement en Algérie	8
I.4.1-Les stations existantes	9
I.5-Conclusion	11
CHAPITRE II : NOTIONS SUR LES PROCEDES DE DESSALEMENT	14
II.1-Introduction	14
II.2-Définition du dessalement.....	14
II.3-Propriétés des eaux de mer et des eaux saumâtres	14
II.3.1-Eaux de mer	14
II.3.2-Eaux de saumâtres	15
II.4-Historique du dessalement	15
II.5-Technologie de dessalement.....	17
II.5.1-Procédés thermique	18
II.5.2-Les procédés membranaires	23
II.5.3-Les procédés chimiques	25
II.6-Choix d'un procédé de dessalement.....	27
II.6.1-Critères économiques	27
II.6.2-Critères techniques	27
II.7-Conclusion.....	28
CHAPITRE III : L'OSMOSE INVERSE	30
III.1-Introduction.....	30
III.2-Définition de l'osmose et de l'osmose inverse.....	30
III.3-Description d'une filière de traitement des eaux par osmose inverse :	31
III.4-Procédure d'osmose inverse de choix	31

TABLE DES MATIERES

III.5-Choix d'un module d'osmose inverse.....	32
III.5.1-Les modules tubulaires.....	32
III.5.2-Les modules spiralés.....	32
III.5.3-Les modules à fibres creuses.....	33
III.5.4-Les modules Plan.....	33
III.6-Choix d'une membrane.....	35
III.6.1-Membranes organiques.....	36
III.6.2-Membranes minérales ou inorganiques.....	37
III.6.3-Membranes composites (organiques et anisotropes).....	37
III.7-Pompe haute pression.....	38
III.8-Poste de prétraitement.....	38
III.9-Système de récupération d'énergie.....	39
III.10-Mécanisme de transfert de matière.....	40
III.11-Conditions de fonctionnement et choix des paramètres.....	40
• Choix de taux de conversion.....	40
• Choix de la pression.....	41
• Choix de la température.....	41
• Consommation de l'énergie.....	41
III.12-Avantages et inconvénients d'osmose inverse.....	42
III.13-Conclusion.....	42
CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL.....	44
IV.1-Introduction.....	44
IV.2-Situation géographique.....	44
IV.3-Présentation du promoteur de projet.....	45
IV.4-Fiche Technique.....	46
IV.5-Infrastructures principales et schéma général du dessalement à la SDEM de Béni Saf :.....	46
IV.6-Description du fonctionnement de la SDEM.....	48
IV.6.1-Captage et prétraitement initial :.....	48
IV.6.2-Prétraitement de l'eau de mer.....	51
IV.6.3-Osmose Inverse.....	61
IV.6.4-Membranes.....	63
IV.6.5-Système de pompage à l'osmose inverse et récupération d'énergie (ERI).....	64
IV.6.6-Post-traitement et reminéralisation.....	67
IV.6.7-Equipement de nettoyage.....	71
IV.6.8-Bâtiment de saumure.....	72

TABLE DES MATIERES

IV.6.9-Le laboratoire	72
IV.6.10-Salle de contrôle	73
IV.6.11-Autres composants de la station	74
IV.7-Conclusion	75
CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF...	77
Introduction :	77
V.2- Diagnostic technique des défaillances de la station	77
V.2.1- Les défaillances liées au captage d'eau de mer	77
V.2.2- Les pannes et dysfonctionnements de pompe haute pression	78
V.2.3- Les défaillances des systèmes de prétraitement	80
V.2.4- Le colmatage des membranes d'osmose inverse	81
V.2.5- Problèmes électriques et de contrôle-commande	84
V.2.6- Problèmes liés au dosage chimique (NaOCl, antiscalant, acide, etc.)	85
V.2.7- Cas de rejets anormaux ou non conformes	86
V.2.8 – Synthèse des principales défaillances observées	87
V.3- Études de cas pratiques de défaillances critiques	88
V.3.1- Étude de cas n°1 : Arrêt total du système par surcharge des pompes	88
V.3.2- Étude de cas n°2 : Contamination bactérienne du réseau de perméat	89
V.3.3 Étude de cas n°3 : Corrosion accélérée des tubes en acier inoxydable	89
V.4- Utilisation des outils fondamentaux de l'analyse des causes racines (RCA) pour l'identification des défaillances.	90
V.4.1- Utilisation du diagramme d'Ishikawa (causes multiples)	91
V.4.2- Analyse 5M Détaillée	92
V.4.3- Identification des points critiques par arbre des causes	93
V.5- Impacts des défaillances sur la production.....	94
V.5.1- Réduction de débit de production	95
V.5.2-Détérioration de la qualité de l'eau produite	95
V.5.3- Augmentation des coûts d'exploitation et d'entretien	96
V.6-Évaluation de la qualité de l'eau produite.....	96
V.6.2- Résultats des analyses physico-chimiques et interprétation	103
V.6.2.1-Température	103
V.6.2.4-	109
V.7- Conclusion :	121
CHAPITRE VI : LES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT DU DESSALEMENT	123
VI.1-Introduction	123
VI.2-Origin et type des rejets	123

TABLE DES MATIERES

VI.2.1-Rejets atmosphériques	123
VI.2.2-Les rejets chimiques	124
VI.2.3-La saumure concentrée	124
VI.3-Impacts sur l'environnement	125
VI.3.1-Effets dus aux produits de la corrosion	125
VI.3.2-Effets dus aux additifs antitartres	126
VI.3.3-Effets des additifs antisalissure	126
VI.3.4-Effets des additifs anti mousses	126
VI.3.5-Effets du concentré (saumure)	126
VI.3.6-Effets sur la faune et la flore marine	129
VI.3.7-Effets du bruit	129
VI.3.8-Évolution des différents impacts du dessalement	129
VI.4-Mesures d'atténuation des impacts sur les ressources marines : Cas de la SDEM de Béni Saf	131
VI.5-Les mesures prises par la station de Béni Saf	132
VI.6-Conclusion	133
CONCLUSION GENERALE	135
BIBLIOGRAPHIE	138

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1: Situation géographique des stations de dessalement en Algérie.	9
Figure II. 1: Capacités de dessalement dans le monde.	17
Figure II. 3: Les différents procédés de dessalement	17
Figure II. 4: Distillation à simple effet	18
Figure II. 5: Distillation à multiples effets	19
Figure II. 6: Distillation par longs tubes verticaux	20
Figure II. 7: Distillation à détente étagées	21
Figure II. 8: Schéma de la distillation solaire.	22
Figure II. 9: Principe de dessalement par l'électrodialyse	23
Figure II. 10: Principe de dessalement par osmose inverse.....	25
Figure II. 11: Remplacement des cations par H ⁺	26
Figure II. 12: Principe de l'échange d'ions en déminéralisation de l'eau	26
Figure III. 1: Schéma d'une filière de traitement par osmose inverse.....	31
Figure III. 3: Module à membrane tubulaire	32
Figure III. 4: Représentation d'un module spiralé.....	33
Figure III. 5: Schéma de principe d'un module plan.....	33
Figure III. 6: Schéma de récupération indirecte de l'énergie	39
Figure III. 7: Schéma de récupération directe de l'énergie	40
Figure III. 8: Mécanisme de transfert de matière	40
Figure IV. 1: Photo de la station de dessalement de l'eau de mer de Chatt El Hillel.....	44
Figure IV. 2 : Situation géographique de la SDEM de Béni Saf	45
Figure IV. 3: les différents collaborateurs de la station BWC.....	45
Figure IV. 4: Schéma du processus de la station.	48
Figure IV. 5: Les tuyaux de captage.....	48
Figure IV. 6: Le dégrillage pour éliminer les plus gros déchets.....	49
Figure IV. 7: Filtres rotatifs de nettoyage.....	49
Figure IV. 8: Bâtiment de captage.....	50
Figure IV. 9: pompes de pompage et bassin de stockage.....	50
Figure IV. 10: Réservoir de stockage d'Hypochlorite de sodium.	51
Figure IV. 11: Bâtiment de dosage chimique.	52
Figure IV. 12: Bâtiment d'acide sulfurique.....	53
Figure IV. 13: zone des filtres à sable et à anthracite de la SDEM de Béni Saf.	54
Figure IV. 14: Débitmètre	55
Figure IV. 15: Les collecteurs des filtres à sable.....	57

LISTE DES FIGURES

Figure IV. 16: échantillon d'anthracite	58
Figure IV. 17: Filtres à cartouches	59
Figure IV. 18: Des cartouches avant l'utilisation	60
Figure IV. 19: Les cartouches après utilisation.	60
Figure IV. 20: Les membranes d'osmose inverse	61
Figure IV. 21: Pompe de recirculation	64
Figure IV. 22: Chambres d'échange de pression.....	65
Figure IV. 23: La composition interne des ERI.....	67
Figure IV. 24: La calcite.....	68
Figure IV. 25: Zone de CO2.....	69
Figure IV. 26: Evaporateur de CO2	70
Figure IV. 27: bâtiment de lavage des filtres.	71
Figure IV. 28: Bâtiment de saumure où l'eau de rejet de saumure.	72
Figure IV. 29: Le laboratoire de la SDEM de Béni Saf.	73
Figure IV. 30: la salle de contrôle de la SDEM de Béni saf.....	74
Figure IV. 31: Salle d'électricité de la SDEM de Béni Saf.	75
Figure V. 1: Corrosion localisée sur une conduite d'osmose inverse (OI), 26 mars 2025.....	90
Figure V. 2: Diagramme d'Ishikawa spécifique à la corrosion des tubes en inox la SDEM de Béni Saf.	92
Figure V. 3: pH mètre VWR [14].....	97
Figure V. 4: Conductimètre VWA EC 300 [14].....	98
Figure V. 5: Turbidimètre TURB 550 IR [14].	99
Figure V. 6: L'évolution de la température d'eau brute et d'eau filtrée.....	104
Figure V. 7: variation de PH en fonction de la période d'analyse.....	106
Figure V. 8: variation de la conductivité en fonction de la période d'analyse.....	108
Figure V. 9: variation de TDS en fonction de la période d'analyse.	110
Figure V. 10: L'évolution de la turbidité d'eau brute et d'eau filtrée.	112
Figure V. 11: L'évolution du SDI d'eau brute et d'eau filtrée.	114
Figure V. 12: variation de TAC en fonction de la période d'analyse.....	116
Figure V. 13: variation de TH en fonction de la période d'analyse.	118
Figure V. 14: variation de TH en fonction de la période d'analyse.	119
Figure VI. 1: Etat initial du milieu (pas de rejet de saumure)	128
Figure VI. 2: Etat du milieu après implantation de l'usine de dessalement (rejet de saumure	128

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Répartition des eaux de surface.....	5
Tableau I.2: Stations exploitées par Sonelgaz.....	10
Tableau I.3: Stations de dessalement exploitées par SONATRACH	10
Tableau I.4: Stations installées par d'autres Compagnies	11
Tableau II.1: Volumes d'eau dessalée par les pays arabes.....	16
Tableau III.1: Avantages et inconvénients des modules d'osmose inverse	34
Tableau IV. 1: Fiche technique de la SDEM de Béni Saf.	46
Tableau IV. 2: les caractéristiques de la couche filtrante.....	56
Tableau IV. 3: les caractéristiques de L'anthracite utilisé.....	58
Tableau IV. 4: contrôle de qualité de l'eau commercialisée.....	73
Tableau V. 1: Synthèse des défaillances techniques observées dans la station de dessalement de Béni Saf	87
Tableau V. 2: Exemples de causes racines identifiées selon la méthode des 5M.	92
Tableau V. 3: La température d'eau brute et d'eau filtrée.....	103
Tableau V. 4: Résultats des analyses de PH.....	105
Tableau V. 5: Résultats des analyses de La conductivité.....	107
Tableau V. 6: Résultats des analyses de TDS	109
Tableau V. 7: La turbidité d'eau brute et d'eau filtré.....	111
Tableau V. 8: SDI d'eau brute et d'eau filtré.	113
Tableau V. 9: Résultats des analyses de TAC	115
Tableau V. 10: Résultats des analyses de TH.....	117
Tableau V. 11: Comparaison de l'eau traitée à la norme.	119
Tableau VI. 1: Composition chimique de la saumure par rapport à celle de l'eau de mer. ...	124
Tableau VI. 2: L'évaluation des impacts associés à l'osmose inverse	130
Tableau VI. 3: Caractéristiques de l'effluent versé par l'émissaire sous-marin de la station de dessalement de Béni Saf.	133

LISTE DES ABREVIATIONS

ADE : Algérienne Des Eaux.

AEC: Algerian Energy Company.

BWC: Beni Saf Water Company

°C : Degré Celsius.

C0 : Concentration de l'eau de mer (mg/l)

Cp : Concentration de l'eau produite (mg/l)

DCS : Système de Contrôle Digital.

DN : Diamètre Nominale

ED : Electrodialyse.

EDTA : Acide Ethylène Diamine Tétracétique

ERI : Système de Récupération d'énergie.

HP : Haute pression.

LSI : Indice de Langelier

MED : Multi-Effet-Distillation (distillation à effet multiple).

MES : Matière en suspension en (mg/l).

MSF : Multi-Stage-Flash distillation (distillation à détente étagées).

NTU : Nephelométric Turbidity Unit.

OI : Osmose Inverse.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

Pa : Pascals

PEHD : Polyéthylène haut densité

PH : Potentiel d'hydrogène.

Ppm : Partie par million.

Q0 : Débit d'alimentation (m³/j).

Qc : Débit de concentrât (m³/j).

Qp : Débit de perméat (m³/j).

Qsp : Débit spécifique (l/h.m²).

R : Constante des gaz parfaits (0,081 L.atm/K/mol).

SDEM : Station de dessalement d'eau de mer.

SDI : L'indice de colmatage SDI

SNCC: Système numérique de contrôle et de commande

T : Température (°C).

LISTE DES ABREVIATIONS

TA : Titre alcalimétrique.

TAC : Titre alcalimétrique complet (mg/l) en CaCO₃.

TDS : Total de Sel Dissous (mg/l).

TH : Titre hydrométrique (mg/l) en CaCO₃

USD: United States Dollar

π : Pression osmotique (bar).

Y : Taux de conversion (%).

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le dessalement de l'eau de mer s'impose aujourd'hui comme une solution incontournable face à la raréfaction de l'eau potable à l'échelle mondiale, alors que près de 2,2 milliards de personnes demeurent privées d'un accès sécurisé à cette ressource vitale [1].

Bien que cette technique soit ancienne, elle a connu un essor considérable ces dernières décennies, en particulier dans les régions arides et côtières. On recense actuellement environ 13 000 unités de dessalement dans le monde, produisant près de 58 millions de mètres cubes d'eau douce par jour, soit environ 1 % de la consommation mondiale [1] [3]. La Terre compte environ 1 386 milliards de kilomètres cubes d'eau, dont plus de 97 % sont salés, ce qui souligne l'intérêt du dessalement pour exploiter ce vaste potentiel. Les technologies modernes, telles que l'osmose inverse et la distillation thermique, permettent de transformer cette ressource abondante en eau potable [2].

L'engagement de l'Algérie en faveur du dessalement de l'eau de mer illustre une volonté affirmée d'intégrer des solutions technologiques de pointe pour répondre à la pénurie d'eau et soutenir le développement socio-économique du pays. Face à la pression croissante exercée sur les ressources hydriques par la croissance démographique, les sécheresses récurrentes et les effets du changement climatique, le gouvernement a investi massivement dans la construction de stations de dessalement, avec l'objectif d'atteindre 60 % de couverture des besoins nationaux en eau potable d'ici 2030. [4] [6] [7]

Cependant, la fiabilité et la performance de ces infrastructures demeurent un enjeu majeur, car les défaillances techniques et opérationnelles peuvent compromettre la continuité de l'approvisionnement en eau douce. Ces défaillances résultent souvent de facteurs multiples : encrassement et colmatage des membranes d'osmose inverse, corrosion des équipements, fluctuations de la qualité de l'eau brute, pannes mécaniques, ou encore gestion inadéquate de la maintenance. De plus, l'impact environnemental des rejets de saumure, la consommation énergétique élevée, et la nécessité d'une gestion rigoureuse des ressources humaines et des pièces de rechange constituent des défis supplémentaires. Dans ce contexte, il devient essentiel d'identifier, d'analyser et de diagnostiquer les causes de dysfonctionnement afin d'optimiser le rendement des installations et d'assurer leur durabilité.

C'est dans cette optique que s'inscrit la présente étude, qui porte sur l'usine de dessalement de Chatt El Hillal à Beni Saf (wilaya d'Aïn Témouchent). Cette station, qui utilise la technologie de l'osmose inverse, joue un rôle stratégique en alimentant en eau

potable la wilaya ainsi que plusieurs localités de la région d'Oran. L'analyse approfondie des défaillances rencontrées dans cette installation permettra de proposer des solutions concrètes pour améliorer la fiabilité, la performance et la pérennité des stations de dessalement en Algérie, contribuant ainsi à la sécurité hydrique du pays.

Pour faire ce travail, nous avons structuré notre mémoire en six chapitres :

- Le premier chapitre aborde les ressources en eau en Algérie, la problématique de la pénurie hydrique et les stratégies du pays pour y faire face, notamment via le dessalement et le développement d'infrastructures.
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons des notions fondamentales des procédés de dessalement de l'eau.
- Le deuxième chapitre expose les notions fondamentales des procédés de dessalement de l'eau.
- Le troisième chapitre détaille l'osmose inverse : définition, principe, composants et fonctionnement du système.
- Le quatrième chapitre décrit en détail la station de dessalement de Chatt El Hilal / Béni Saf.
- Le cinquième chapitre analyse les défaillances opérationnelles de la station de Béni Saf, incluant un diagnostic technique, une analyse des causes racines (Ishikawa, 5M) et l'évaluation de la qualité de l'eau traitée selon les normes.
- Le sixième chapitre examine les impacts environnementaux significatifs du dessalement, notamment les rejets atmosphériques et de saumure.

Pour conclure ce manuscrit, nous synthétiserons les principaux résultats et présenterons les perspectives d'amélioration.

CHAPITRE I :
LES RESSOURCES
EN EAU
EN ALGERIE

CHAPITRE I : LES RESSOURCES EN EAU EN ALGERIE

I.1-Introduction

Depuis l'indépendance en 1962, l'Algérie a réalisé des progrès significatifs dans la gestion de ses ressources en eau, un enjeu crucial face à une pluviométrie faible et une croissance démographique rapide. Le pays dispose de ressources variées, comprenant des eaux de surface, des nappes souterraines renouvelables et fossiles, ainsi que des ressources non conventionnelles comme l'eau de mer et les eaux saumâtres. Toutefois, la répartition géographique inégale de ces ressources, conjuguée à une demande croissante pour les usages domestiques, agricoles et industriels, accentue la pression sur le secteur hydrique. L'Algérie se trouve ainsi confrontée à une situation de pénurie hydrique sévère, avec une disponibilité moyenne d'eau bien en dessous des seuils internationaux de stress et de pénurie.

Pour répondre à ces défis, le pays a développé des solutions innovantes, notamment le dessalement de l'eau de mer, qui constitue aujourd'hui une part importante de l'approvisionnement en eau potable. Ce chapitre analyse les différentes ressources en eau du pays, leurs usages, ainsi que les stratégies mises en œuvre pour assurer une gestion durable et adaptée aux besoins croissants de la population et de l'économie nationale.

I.2-Disponibilité de l'eau en Algérie

Depuis l'indépendance de l'Algérie en 1962, le secteur des ressources en eau a réalisé de nombreuses avancées malgré les défis liés à une faible pluviométrie et une croissance démographique rapide. Le réseau d'eau potable s'est étendu à 143 000 km en 2021, contre une couverture limitée aux colons européens avant l'indépendance. L'approvisionnement en eau potable atteint 3,6 milliards de m³, dont 50 % proviennent des nappes phréatiques, 33 % des eaux de surface et 17 % du dessalement. La capacité de stockage des barrages est passée de 908,8 millions de m³ à plus de 8,6 milliards de m³ avec plus de 80 barrages [1].

I.2.1-Les ressources en eau de surface

Les ressources en eau de surface sont estimées entre 9,8 et 13,5 milliards de mètres cubes par an, selon différentes régions hydrographiques [2]. Le tableau I.1 donne une répartition détaillée de ces ressources par région :

Tableau I.1: Répartition des eaux de surface [2]

Région Hydrographique	Superficie (Km ²)	Potentialités en Eau Superficielle (hm ³ /an)
Oranie-Chott Chergui	88 370	820
Chellif-Zahrez	56 227	1 470
Algérois-Hodna-Soummam	47 906	3 340
Constantinois-Seybousse-Mellègue	44 719	3 650
Sahara	2 081 650	480
Total Algérie	2 318 872	9 760

Cependant, tous les écoulements superficiels ne sont pas exploitables en raison de facteurs tels que l'existence de sites de barrages, la qualité des eaux et les coûts d'aménagement. Actuellement, environ 2 milliards de mètres cubes sont mobilisés à partir de 50 barrages, avec une capacité initiale de 5 milliards de mètres cubes, réduite à 4,5 milliards de mètres cubes en raison de l'envasement [2].

I.2.2-Les ressources en eau souterraines

-Nord de l'Algérie

Les ressources en eau renouvelables sont estimées à environ 2,5 milliards de m³ par an. Ces ressources proviennent principalement de 177 aquifères ainsi que de nombreuses sources naturelles et forages répartis à travers les régions côtières et montagneuses [3].

Toutefois, ces aquifères subissent une pression croissante en raison de la surexploitation, entraînant souvent une diminution de leur niveau et, dans certains cas, une intrusion d'eau salée qui compromet leur qualité [4].

Des wilayas comme Alger, Oran et Constantine disposent de réserves souterraines relativement importantes. Cependant, ces ressources restent vulnérables, notamment en raison d'un taux de réalimentation naturelle faible, ce qui limite leur durabilité à long terme [4].

-Sud de l'Algérie

Dans le sud de l'Algérie, les ressources en eau sont principalement non renouvelables et proviennent essentiellement de grandes nappes fossiles, avec un volume exploitable estimé à environ 6 milliards de m³ par an [3].

La nappe albienne, l'une des plus vastes au monde, s'étend sur près d'un million de km², dont 60 à 70 % se trouvent en territoire algérien. Son volume total est estimé entre 30 000 et 40 000 km³. Deux grandes formations en font partie : la nappe albienne terminale, qui

alimente des régions telles que Tidikelt, El Menéa, Adrar et Ghardaïa, et la nappe intercalaire, plus profonde, qui s'étend au-delà des frontières de l'Algérie vers d'autres pays du Sahara [5].

Bien que ces nappes constituent une ressource stratégique, leur caractère non renouvelable impose une gestion rigoureuse pour préserver leur durabilité à long terme [5].

I.2.3-Les eaux de mer et les eaux saumâtres

L'eau de mer est une ressource naturellement salée, caractérisée par une salinité élevée avoisinant les 35 g/L. En raison de cette forte teneur en sels dissous, elle n'est pas directement potable et nécessite un traitement spécifique, tel que le dessalement, afin de la rendre apte à la consommation ou à d'autres usages. Ce processus permet de convertir l'eau de mer en une ressource en eau non conventionnelle, particulièrement précieuse dans les régions confrontées à une pénurie d'eau douce. Les eaux saumâtres, quant à elles, représentent un type d'eau intermédiaire entre l'eau douce et l'eau de mer. Leur salinité est inférieure à celle de cette dernière, mais demeure trop élevée pour permettre une utilisation directe. Elles proviennent généralement d'estuaires ou de nappes souterraines ayant été en contact avec des formations salines. Comme l'eau de mer, elles nécessitent un traitement adapté avant toute réutilisation, et sont également classées parmi les ressources en eau non conventionnelles.

I.3 -Adéquation entre ressources et besoins en eau

La répartition des ressources en eau à l'intérieur d'un pays peut être marquée par des disparités significatives. En Algérie, par exemple, 75 % des ressources en eau renouvelables sont concentrées sur seulement 6 % du territoire national [6]. De plus, les besoins en eau diffèrent considérablement d'un pays à l'autre. Dans les pays en développement peu industrialisés, la consommation moyenne d'eau est généralement faible, ne dépassant pas 40 litres par jour et par habitant pour tous les usages combinés. En revanche, dans les pays fortement industrialisés, la consommation quotidienne peut atteindre plusieurs milliers de litres par personne, en incluant les usages domestiques, agricoles et industriels. Cette variation souligne l'importance de la gestion efficace des ressources en eau pour répondre aux besoins spécifiques de chaque région et pays [7].

I.3.1-Usage industriel de l'eau

Le secteur industriel en Algérie représente environ 3,5 % de la consommation totale d'eau, ce qui en fait un utilisateur minoritaire en volume, mais néanmoins stratégique en raison du développement croissant des secteurs industriel et énergétique [6].

L'eau industrielle est principalement utilisée pour le refroidissement des équipements, les procédés de fabrication, ainsi que pour le nettoyage des installations [8].

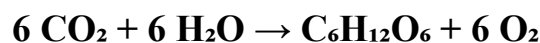
Certaines industries ont également recours à des eaux usées traitées, notamment dans les zones où l'accès à l'eau douce est limité [8].

Dans la majorité des cas, l'eau destinée aux usages industriels est prélevée via les mêmes réseaux que ceux de l'eau potable, bien que des efforts soient entrepris pour améliorer la gestion, notamment par l'optimisation des consommations, la réduction des pertes et la réutilisation des eaux usées traitées [9].

Ces démarches s'inscrivent dans une logique de gestion intégrée et durable des ressources hydriques dans le contexte de rareté croissante de l'eau.

I.3.2-Usage agricole de l'eau

À l'échelle mondiale, l'agriculture demeure le principal consommateur d'eau, représentant près de 70 à 75 % des prélèvements totaux. L'eau est en effet un facteur fondamental et souvent limitant pour la production végétale. Les tissus des plantes en contiennent une proportion très élevée, parfois jusqu'à 95 % de leur poids assurant leur turgescence, le transport des nutriments dissous et les échanges internes. Sur le plan biochimique, l'eau joue un rôle central puisqu'elle participe activement à la photosynthèse, en tant que réactif avec le dioxyde de carbone :



Ce processus aboutit à la formation de matière organique, essentielle à la croissance végétale. Par ailleurs, les plantes perdent une partie importante de l'eau absorbée sous forme de vapeur, via un phénomène appelé transpiration. Ce processus, combiné à l'évaporation du sol, constitue l'évapotranspiration, dont l'intensité dépend fortement des conditions climatiques. On estime qu'il faut environ 300 litres d'eau pour produire 1 kg de matière sèche en climat humide, contre jusqu'à 1000 litres en climat semi-aride [6].

I.3.3-Usages domestiques de l'eau

Les usages domestiques de l'eau englobent l'ensemble des besoins quotidiens des populations, tant à l'échelle individuelle que collective. Ils incluent principalement les usages alimentaires tels que la cuisine et la boisson ainsi que les besoins liés à l'hygiène, notamment les sanitaires, la vaisselle, la lessive ou encore le nettoyage des surfaces. À ces usages individuels s'ajoutent des besoins collectifs importants, comme l'alimentation en eau des écoles, des hôpitaux, des administrations publiques ou encore l'entretien des espaces verts et des voiries urbaines. Selon l'Organisation mondiale de la santé, un minimum de 50 à 100 litres d'eau par personne et par jour est nécessaire pour répondre aux besoins vitaux en matière de consommation, d'hygiène et de propreté. Ces usages représentent une part

essentielle de la demande en eau, d'autant plus critique dans un contexte de pression croissante sur les ressources hydriques, notamment dans les zones urbaines à forte densité [10].

I.3.4 -Indicateurs de ressources en eau (seuils de tension et de pénurie)

Pour évaluer la disponibilité et la pression exercée sur les ressources en eau, les experts utilisent des indicateurs quantitatifs exprimés en mètres cubes par habitant et par an. Deux seuils sont couramment retenus au niveau international. Le seuil de tension hydrique est fixé à 1700 m³/hab/an. En dessous de cette valeur, un pays est considéré comme exposé à un stress hydrique, ce qui signifie que la disponibilité en eau commence à limiter significativement les usages domestiques, agricoles et industriels. Le seuil de pénurie est encore plus critique et se situe à 1000 m³/hab/an. En dessous de ce niveau, les pénuries d'eau deviennent structurelles, menaçant le développement économique, la sécurité alimentaire et la stabilité sociale. L'Algérie, avec une disponibilité moyenne annuelle d'environ 400 m³/hab/an, se situe bien en dessous de ces seuils, ce qui la classe parmi les pays en situation de pénurie hydrique sévère [11], [12].

I.4-Le développement du dessalement en Algérie

Comme d'autres pays méditerranéens, l'Algérie fait face à des défis majeurs concernant sa politique de gestion de l'eau. La pression sur le littoral, les inégalités entre les zones rurales et urbaines, les sécheresses récurrentes et l'augmentation de la pollution perturbent l'équilibre déjà fragile de l'approvisionnement en eau.

La crise des ressources en eau qui a affecté l'approvisionnement en eau potable dans plusieurs régions du pays ces dernières années, a suscité un intérêt accru pour le dessalement. Ce projet de dessalement d'eau de mer s'inscrit dans un programme d'urgence mis en place par le gouvernement pour remédier durablement à ce déficit [13].

En 1964, trois unités de 8 m³/h ont été installées au complexe de gaz liquéfié d'Arzew, utilisant un procédé de distillation à effet multiple. En 1969, une nouvelle installation a été créée à Arzew, avec une capacité de production de 4560 m³/j, utilisant la méthode du multi-stage flash. D'autres installations ont été développées pour fournir de l'eau de haute pureté aux complexes électriques à Cap Djinet et aux usines de liquéfaction à Arzew et Skikda. L'entreprise nationale algérienne des eaux a lancé le premier programme de dessalement en construisant 23 stations monoblocs avec une capacité totale de 57 500 m³/j dans plusieurs

wilayas entre 2003 et 2005. En parallèle, 14 grandes stations ont été mises en service durant cette période, totalisant 1 940 000 m³/j [14].

Des stations supplémentaires ont été mises en service entre 2009 et 2011, incluant celles de Skikda (100 000 m³/j), Beni Saf (200 000 m³/j), et plusieurs autres dans les wilayas de Tlemcen et Tipaza [14].

I.4.1-Les stations existantes

L’Algérie compte actuellement 25 stations de dessalement opérationnelles, avec une capacité cumulée d’environ 2,6 millions de m³/jour, couvrant environ 18 % des besoins en eau potable du pays. La figure I.1 donne une représentation de la répartition géographique des stations de dessalement sur le littoral de l’Algérie.

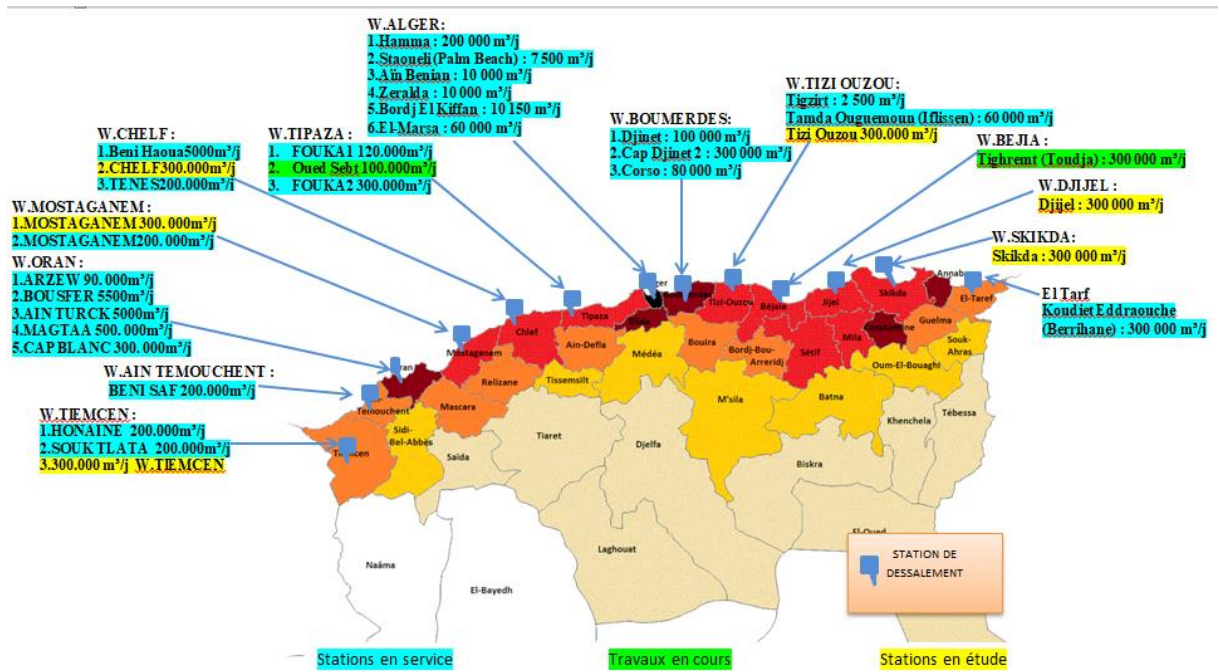


Figure I.1 : Situation géographique des stations de dessalement en Algérie.

D’ici 2030, avec les projets en cours et à venir, la capacité totale devrait atteindre 3,7 millions de m³/jour, permettant de couvrir jusqu’à 42 % des besoins nationaux en eau potable.

A) Stations installées par la Compagnie « SONEGAS »

Pour répondre aux besoins en production d’électricité et face à la quantité insuffisante ou à la qualité parfois médiocre de l’eau fournie par les réseaux d’AEP, SONEGAS a équipé chacune de ses nouvelles centrales à vapeur d’unités de dessalement d’eau de mer. Ces installations permettent de produire l’eau nécessaire pour l’appoint des chaudières, assurant ainsi un approvisionnement en eau de qualité conforme aux exigences du processus de production électrique. Le tableau I-2 présente les stations exploitées par Sonelgaz.

Tableau I.2: Stations exploitées par Sonelgaz [16].

Centrale	Capacité (m³/j)	Technique	Mise en service
Mers el Hadjadj	1500	Thermo compression	1977
Mers el Hadjadj	2000	MSF	1991
Mers el Hadjadj	500	Thermo compression	1989
Cap Djinet	2000	MSF	1985
Djijel	2000	MSF	1992
Djijel	500	Osmose inverse	1992

B) Stations installées par la Compagnie SONATRACH

Lors de l'inauguration de la station de Mostaganem, dotée d'une capacité de 57 600 m³/j, cette installation a été reconnue comme l'une des plus importantes au monde, devenant une référence majeure dans le domaine du dessalement. La Compagnie SONATRACH se distingue par son expertise remarquable. Entre 1964 et 1982, elle a mis en service 31 centrales de dessalement (tableau I-3), totalisant une capacité de production de 107401 m³/j, utilisant diverses techniques. La variété des types d'eau traitée en eau de mer, eau chargée provenant de barrages, eau saumâtre souterraine témoigne de la capacité de SONATRACH à adapter ses procédés aux différentes conditions d'approvisionnement en eau [16].

Tableau I.3: Stations de dessalement exploitées par SONATRACH [16]

Centrale	Capacité (m³/j)	Technique	Mise en service
Arzew	576	Multi effets	1964
Arzew	4560	MSF	1969
Skikda	1440	MSF	1971
Skikda	720	MSF	1971
Skikda	1440	Echangeurs d'ions	1971
Annaba	960	Echangeurs d'ions	1971
Annaba	3600	Echangeurs d'ions	1973
Ghazaouat	840	Echangeurs d'ions	1974
Arzew	3888	Electrodialyse	1975
Arzew	960	Echangeurs d'ions	1975
Hassi Messaoud	1000	Electrodialyse	1975
Hassi Messaoud	110	Electrodialyse	1976
Gassi Touil	55	Electrodialyse	1977

Arzew	350	Thermo compression	1978
Annaba	14180	MSF	1978
Hassi Messaoud	350	Electrodialyse	1978
Bel Abbes	1500	Echangeurs d'ions	1978
Haoud Berkaoui	55	Electrodialyse	1979
Hassi Messaoud	300	Electrodialyse	1979
Rhourd El Baguel	25	Electrodialyse	1979
Arzew	960	MSF	1979
Annaba	144	Echangeurs d'ions	1979
Annaba	576	Echangeurs d'ions	1979
Bassi-Rmel	792	Osmose d'inverse	1979
Annaba	6240	Echangeurs d'ions	1980
Ghardaia	960	Osmose d'inverse	1980
Arzew	960	MSF	1980
Mostaganem	57600	Osmose d'inverse	1980
Rhourd El Baguel	300	Electrodialyse	1981
Annaba	1800	Echangeurs d'ions	1981

C) Stations mises en place par d'autres compagnies :

Certaines entreprises ont installé de petites stations de traitement d'eau afin de couvrir leurs besoins industriels spécifiques. Les exemples suivants indiqués dans le tableau I-4 illustrent ces initiatives.

Tableau I.4: Stations installées par d'autres Compagnies [16].

Entreprise	Localisation	Procédé utilisé	Capacité
Compagnie Tongo	Rouïba	Échange d'ions	1500 m ³ /jour
Brasserie Bovaroise	Annaba	Osmose inverse	3500 m ³ /jour

I.5-Conclusion

L'Algérie fait face à une rareté marquée de ses ressources en eau, exacerbée par des disparités régionales, la surexploitation des nappes souterraines et des conditions climatiques difficiles. Malgré ces contraintes, le pays a su développer un réseau étendu d'approvisionnement en eau potable et multiplier les infrastructures de dessalement, notamment sur le littoral, pour pallier les déficits. Le dessalement d'eau de mer, en particulier,

joue un rôle stratégique croissant, avec une capacité installée qui devrait continuer à augmenter pour couvrir une part significative des besoins nationaux. Par ailleurs, la gestion intégrée des ressources hydriques, incluant la réduction des pertes, la réutilisation des eaux usées et l'optimisation des usages industriels et agricoles, apparaît indispensable pour garantir la durabilité à long terme. Face à la pression démographique et aux défis environnementaux, l'Algérie doit poursuivre ses efforts en matière d'innovation technologique et de planification territoriale afin d'assurer la sécurité hydrique, condition essentielle au développement économique, social et environnemental du pays.

CHAPITRE II :
NOTIONS SUR LES
PROCEDES DE
DESSALEMENT

CHAPITRE II : NOTIONS SUR LES PROCÉDES DE DESSALEMENT

II.1-Introduction

Le dessalement de l'eau de mer s'impose comme une solution incontournable pour répondre aux besoins croissants en eau douce, notamment dans les régions arides et semi-arides du monde. La rareté de cette ressource vitale s'explique par une répartition inégale de l'eau douce sur la planète, où seules 2,5 % des réserves mondiales d'eau sont non salées, et une grande partie de celles-ci est piégée dans les glaciers ou les eaux souterraines profondes.

Depuis l'Antiquité, l'humanité a tenté de convertir l'eau salée en eau potable, mais ce n'est qu'au XX^e siècle que des progrès technologiques ont permis la création de stations de dessalement à grande échelle. Aujourd'hui, les pays du Moyen-Orient, certaines régions d'Asie et d'Afrique du Nord, dont l'Algérie, abritent des infrastructures de dessalement modernes, essentielles pour pallier le manque de pluies et satisfaire les besoins domestiques, agricoles et industriels. Cependant, cette technologie, bien qu'efficace, reste énergivore et soulève des préoccupations environnementales liées à la gestion de la saumure rejetée [17].

II.2-Définition du dessalement

Le dessalement est le processus par lequel l'eau salée, principalement issue des mers et des océans, est traitée pour éliminer les sels dissous et autres impuretés afin de la rendre potable ou utilisable pour des besoins domestiques, agricoles et industriels. Cette technique permet de convertir une ressource hydrique abondante mais inutilisable en une source d'eau douce, essentielle pour les régions souffrant de pénuries d'eau [18].

Selon l'Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture (UNESCO, 2020), le dessalement représente une alternative prometteuse pour compenser le déficit en eau douce, particulièrement dans les régions où les ressources naturelles en eau sont limitées ou surexploitées. Cependant, son développement est conditionné par des défis technologiques, économiques et environnementaux [18].

II.3-Propriétés des eaux de mer et des eaux saumâtres

II.3.1-Eaux de mer

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, qui représente la concentration globale en sels dissous tels que le chlorure de sodium, le chlorure de magnésium, les sulfates et les carbonates. En moyenne, la salinité des mers et océans est d'environ 35 g/L, ce qui correspond à environ 27,2 g/L de NaCl, 3,8 g/L de MgCl₂, 1,7 g/L de

MgSO₄, 1,26 g/L de CaSO₄ et 0,86 g/L de K₂SO₄. Cette salinité peut varier considérablement dans le cas des mers fermées. Par exemple, la salinité de la mer Méditerranée et du golfe Arabique comprise entre 36 et 39 g/L, tandis que la mer Rouge peut atteindre environ 40 g/L. À l'opposé, la mer Caspienne présente une salinité plus faible d'environ 13 g/L, et la célèbre mer Morte se distingue par sa salinité extrêmement élevée, atteignant jusqu'à 270 g/L. Le Golfe Arabo-Persique a également une salinité similaire à celle de la Méditerranée, oscillant entre 36 et 39 g/L. En outre, le pH moyen des eaux de mer se situe entre 7,5 et 8,4, indiquant que l'eau de mer est légèrement basique.

Ces variations de salinité et de pH sont cruciales pour comprendre les écosystèmes marins et leur dynamique [19].

II.3.2-Eaux de saumâtres

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le CaCO₃, le CaSO₄, le MgCO₃ et le NaCl [19].

Les eaux saumâtres jouent un rôle crucial dans les écosystèmes aquatiques, soutenant une biodiversité riche grâce à leur capacité à fournir un habitat pour diverses espèces aquatiques adaptées aux fluctuations de salinité [19].

II.4-Historique du dessalement

Le dessalement de l'eau de mer est une technique qui remonte à l'Antiquité. Déjà au IV^e siècle avant J.-C., Aristote avait observé que l'eau salée, lorsqu'elle s'évapore, laisse le sel derrière elle, et que la vapeur condensée devient de l'eau douce. Des pratiques similaires existaient en Chine ancienne, où l'on utilisait des méthodes naturelles pour séparer le sel de l'eau. Les marins grecs employaient également des méthodes simples de distillation pour obtenir de l'eau potable en mer.

Au cours des XVI^e et XVII^e siècles, les premières installations terrestres de dessalement ont vu le jour. En 1560, une usine de dessalement fut construite sur une île tunisienne. En 1675, un brevet anglais fut délivré pour des dispositifs destinés à produire de l'eau douce à bord des navires, notamment via des distillateurs solaires.

Le XIX^e siècle a marqué un tournant avec l'essor de la révolution industrielle. L'apparition du moteur à vapeur a permis le développement de procédés thermiques plus

CHAPITRE II : NOTIONS SUR LES PROCÉDES DE DESALEMENT

efficaces pour le dessalement. En 1852, un brevet pour un évaporateur à tube vertical fut accordé en Grande-Bretagne. Vers la fin du siècle, des installations terrestres, comme celle de Suakin dans les années 1880, ont été construites avec des capacités de plusieurs centaines de milliers de litres par jour.

Le XXe siècle a vu l'industrialisation du dessalement, notamment dans les régions du Moyen-Orient, riches en énergie mais pauvres en ressources en eau douce. Dans les années 1950, les premières usines modernes utilisant la distillation ont été mises en service. En 1960, la première usine utilisant la technologie de l'osmose inverse sur eau de mer a été inaugurée, marquant une avancée technologique majeure. En Europe, la première usine moderne de dessalement a été construite en 1964 aux îles Canaries, répondant aux besoins croissants liés au tourisme.

Au XXIe siècle, la technologie de l'osmose inverse s'est largement imposée, supplantant les procédés thermiques grâce à des membranes plus performantes et à des systèmes de récupération d'énergie. Aujourd'hui, plus de 17000 usines de dessalement fonctionnent dans le monde, produisant plus de 100 millions de mètres cubes d'eau douce par jour, avec une croissance annuelle de 5 à 10 %. Le dessalement est devenu une solution essentielle pour répondre aux besoins en eau potable dans les régions arides et côtières, grâce à des innovations technologiques continues. Le tableau II.1 présente les volumes d'eau dessalée par les pays arabes. Ainsi, la figure II.1 illustre les capacités de dessalement produites dans le monde.

Tableau II.1: Volumes d'eau dessalée par les pays arabes [20]

Pays	Volume d'eau dessalée (millions m ³ /an)	Part approximative des besoins en eau couverts (%)
Arabie Saoudite	~2 500	90 %
Émirats Arabes Unis	~1 000+	70 %+
Algérie	~1 350	42 % (objectif 2024)
Koweït	~260	77 %
Bahreïn	~160	70 %
Qatar	~360	100 %
Maroc	~200	En développement
Jordanie	~300	Projet en développement
Tunisie	~30	En développement

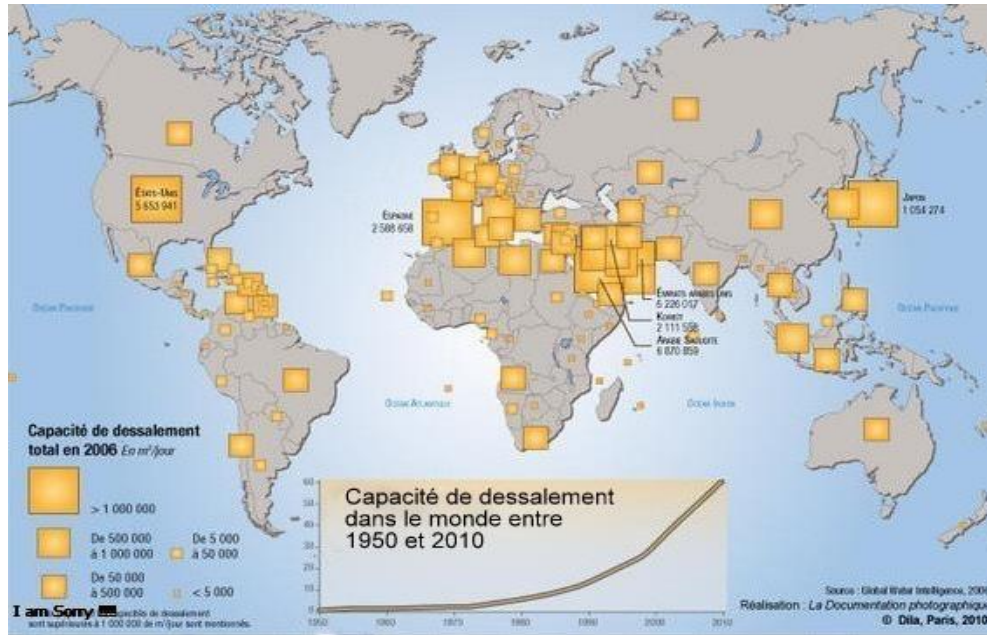


Figure II.1 : Capacités de dessalement dans le monde [20].

II.5-Technologie de dessalement

Les méthodes de dessalement de l'eau de mer, comme c'est indiqué sur la figure II.2, peuvent être classées selon le type de procédé mis en œuvre. Selon la littérature, il existe au total de 27 procédés différents de dessalement, répartis en trois grandes catégories :

- Les procédés impliquant un changement de phase, tels que la distillation et la congélation.
- Les procédés utilisant des membranes, comme l'osmose inverse et l'électrodialyse.
- Les procédés reposant sur des réactions chimiques, notamment l'échange d'ions et l'extraction à l'aide de solvants sélectifs.

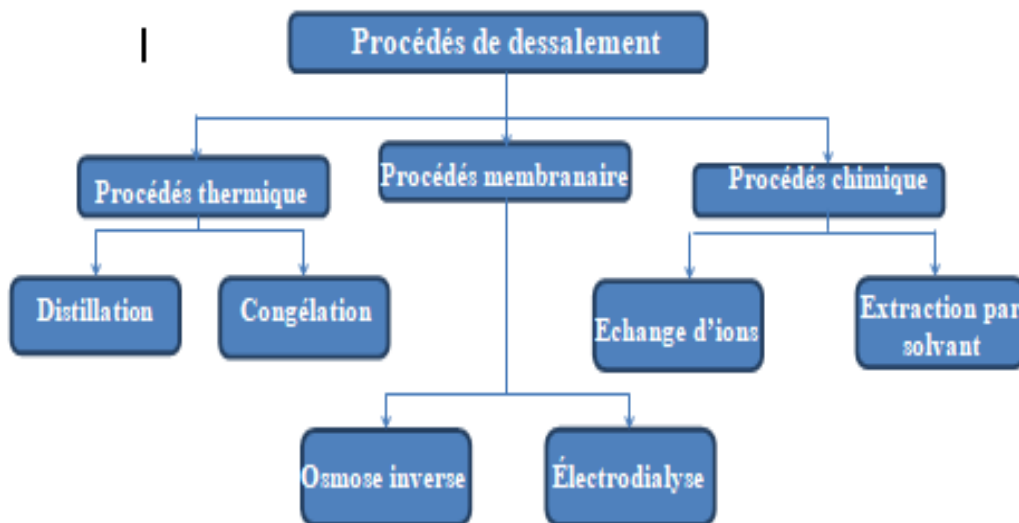


Figure II. 2 : Les différents procédés de dessalement

II.5.1-Procédés thermique

II.5.1.1-La distillation

La méthode de dessalement de l'eau de mer la plus courante est la distillation, également connue sous le nom de dessalement thermique. Ce processus consiste à chauffer l'eau de mer jusqu'à ce qu'elle s'évapore, en séparant les molécules d'eau des sels et autres impuretés.

La vapeur d'eau qui en résulte est ensuite condensée pour produire de l'eau douce. Cette technique de dessalement simple est utilisée depuis très longtemps.

A) Distillation à simple effet

Ce procédé est mis en œuvre depuis longtemps sur les navires où les moteurs Diesel émettent une quantité significative de chaleur récupérable. Son principe est simple : il produit le cycle naturel de l'eau. Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer (figure II.3).

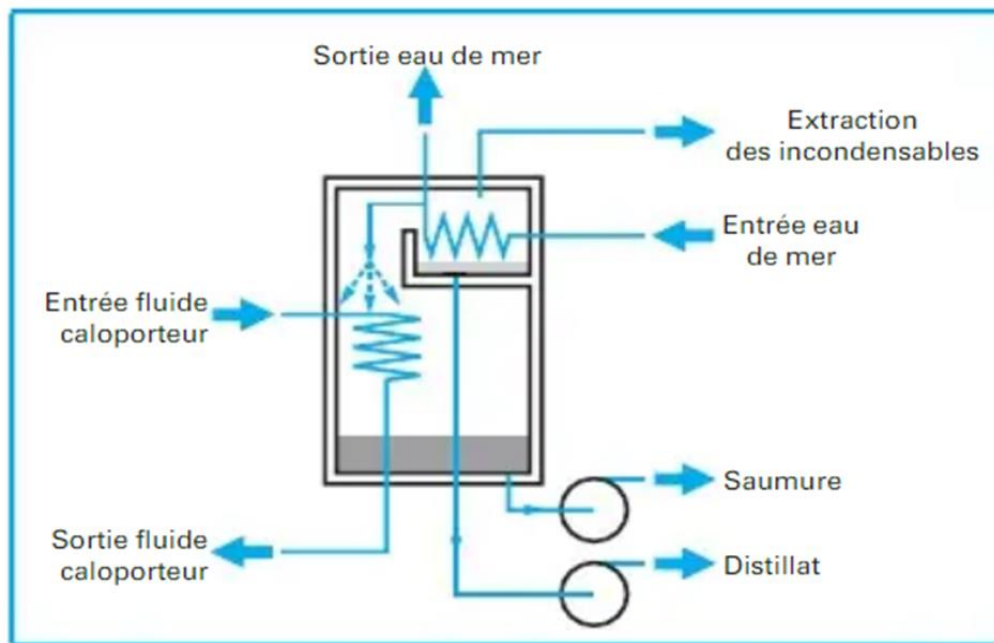


Figure II. 3 : Distillation à simple effet [21]

La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide. Un éjecteur (ou une pompe) évacue les gaz incondensables. Un groupe électropompe soutire le distillat [21].

B) Distillation à multiples effets (Multi-Effet distillation MED)

La distillation à multiples effets (Figure II.4) consiste simplement à la juxtaposition de plusieurs cellules fonctionnant selon le principe de l'effet simple. Le fluide caloporteur porte à l'ébullition l'eau de mer admise dans la première cellule où règne la température la plus haute. La vapeur émise par l'ébullition de l'eau de mer est transférée dans la cellule voisine où une pression légèrement inférieure est maintenue. La température d'ébullition diminuant avec la pression, l'eau de mer présente dans la deuxième cellule est alors vaporisée grâce à la vapeur issue du premier effet. Il s'agit du deuxième effet. L'opération peut être répétée plusieurs fois.

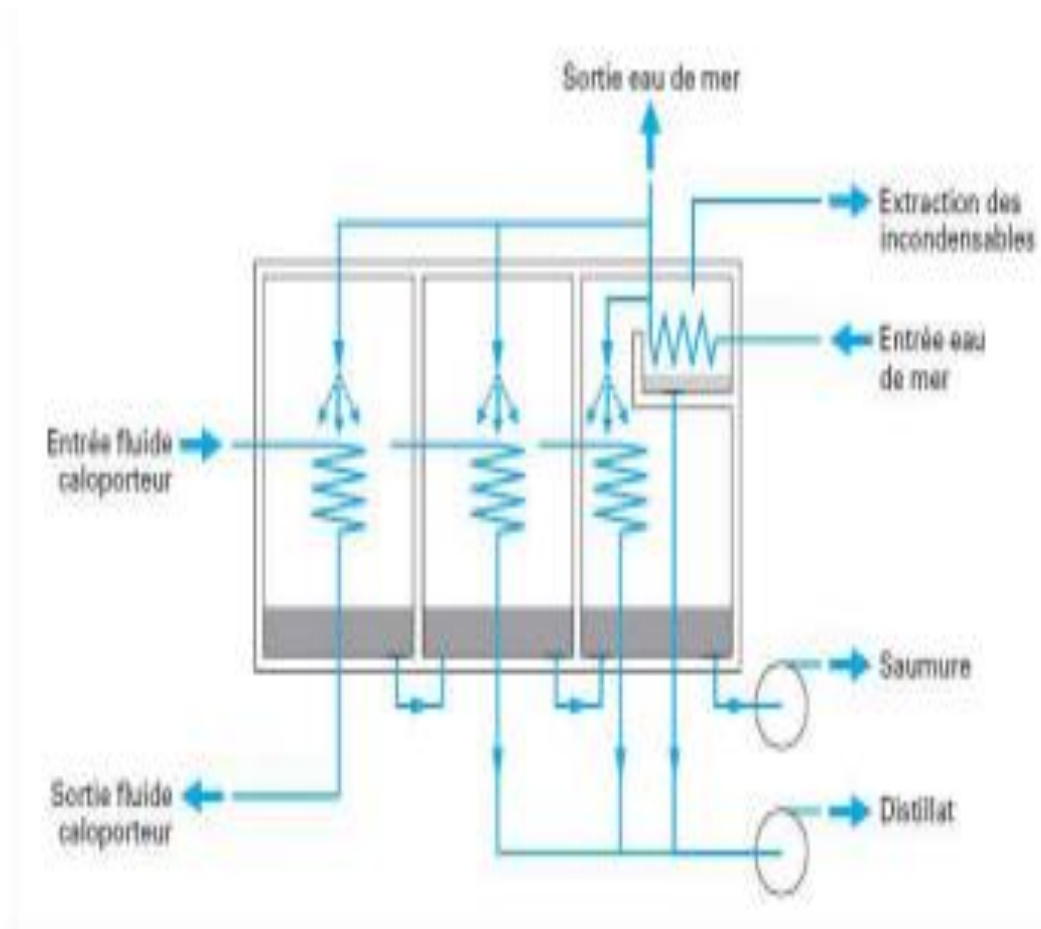


Figure II. 4 : Distillation à multiples effets [22]

Ce procédé permet d'obtenir une production de $10\ 000$ à $25\ 000\ \text{m}^3.\text{j}^{-1}$ avec une salinité de 1 à $50\ \text{mg}.\text{L}^{-1}$ pour une consommation énergétique de 1 à $2\ \text{kWh}.\text{m}^{-3}$ d'eau produite [22].

❖ *Distillation par longs tubes verticaux*

Comme montré sur la figure II.5, l'eau de mer pénètre par le point A avant de s'écouler à l'intérieur des tubes verticaux B.

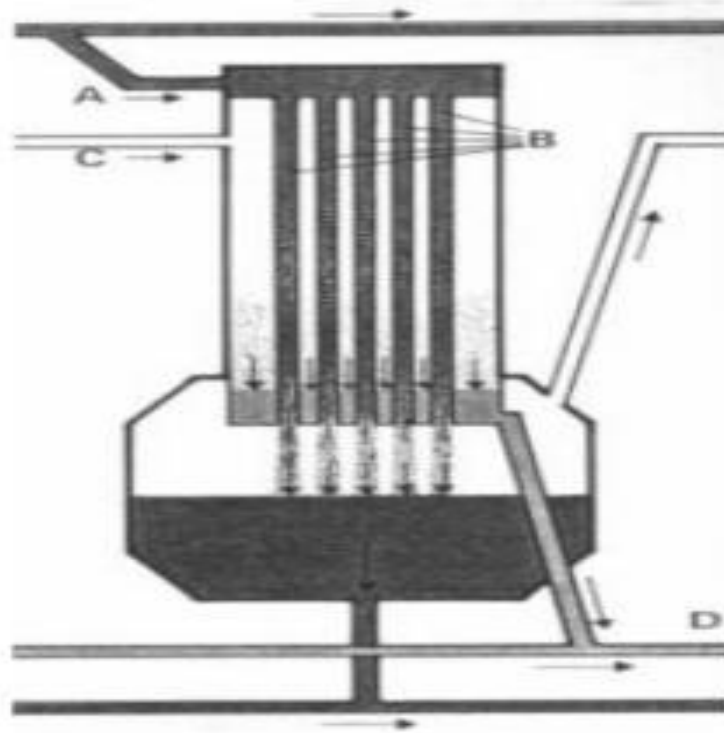


Figure II. 5 : Distillation par longs tubes verticaux [23]

La vapeur, employée comme source de chaleur, réchauffe ces tubes et alimente l'étage suivant. Seul le premier étage reçoit une vapeur générée spécialement pour cette fonction. La vapeur située en C se condense à l'extérieur des tubes, et l'eau douce obtenue est collectée en D [23].

❖ *Distillation par longs tubes horizontaux*

Appelée également HTME (*Horizontal Tube Multiple Effet*) dans la littérature anglo-saxonne, cette technologie a connu un développement industriel relativement récent, datant d'environ une vingtaine d'années. Elle repose sur un système constitué essentiellement de faisceaux tubulaires horizontaux, chauffés intérieurement par de la vapeur et arrosés extérieurement par de l'eau de mer.

Le principe repose sur l'évaporation progressive de l'eau à travers plusieurs effets, avec récupération partielle de la chaleur pour améliorer le rendement énergétique global. Cette méthode est une variante du procédé de distillation multi-effets (MED), adaptée à certaines configurations industrielles spécifiques.

C) Distillation à détentés étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF)

Dans le procédé de distillation à détentés étagées (multi stage flash) dont le schéma de principe est présenté en figure II.6, la vaporisation de l'eau de mer est obtenue par une succession de réduction de pression dans chaque étage. L'eau salée est tout d'abord chauffée puis introduite dans une première chambre à basse pression, de sorte qu'une partie est instantanément vaporisée. La vaporisation d'une partie de l'eau produit une diminution de température de la solution restante. Cette solution est introduite dans la chambre suivante à pression plus réduite et le processus est ainsi répété dans plusieurs étages (50 étages peuvent être installés dans une usine).

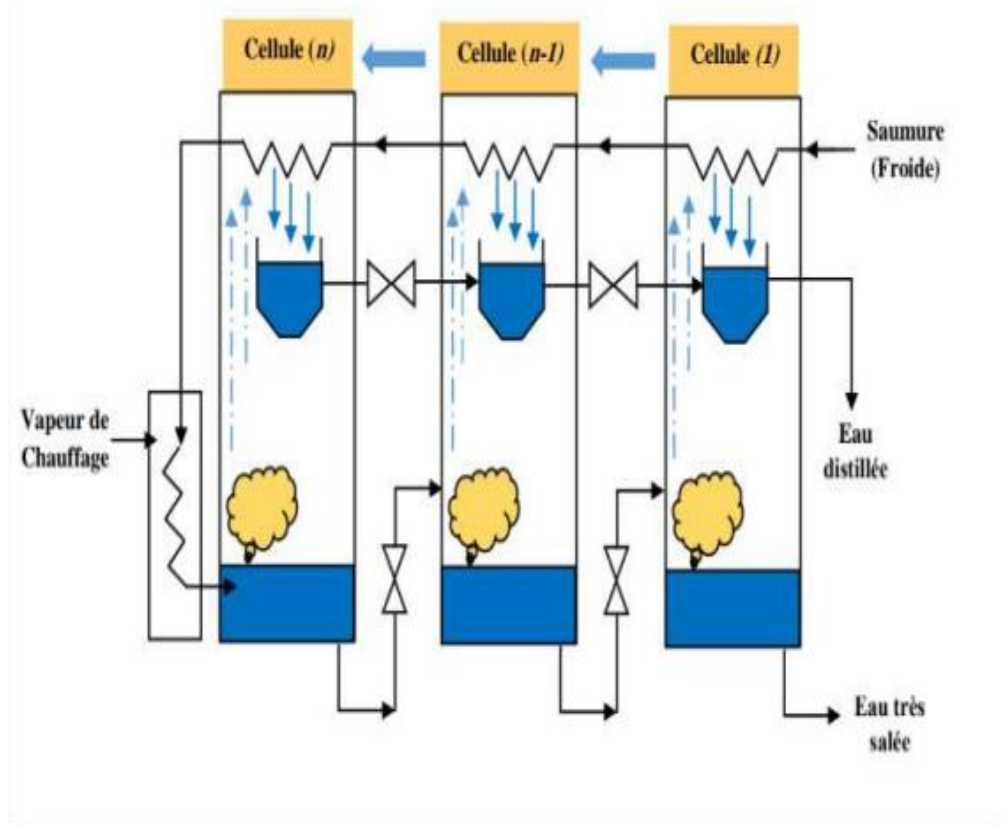


Figure II. 6 : Distillation à détentés étagées [25]

La vapeur produite est refroidie par échange de chaleur avec l'eau de mer d'alimentation et condensée sous forme d'eau dessalée [24].

II.5.1.1.4-La distillation solaire

La distillation solaire (figure II.7) est une technique qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer de l'eau saumâtre dans un bac couvert par une vitre inclinée. L'eau salée dans le bac va se chauffer (d'autant plus vite que le bassin est noir) et avec l'augmentation de température une partie de l'eau s'évapore et la vapeur d'eau se liquéfie sur la surface intérieure de la vitre transparente.

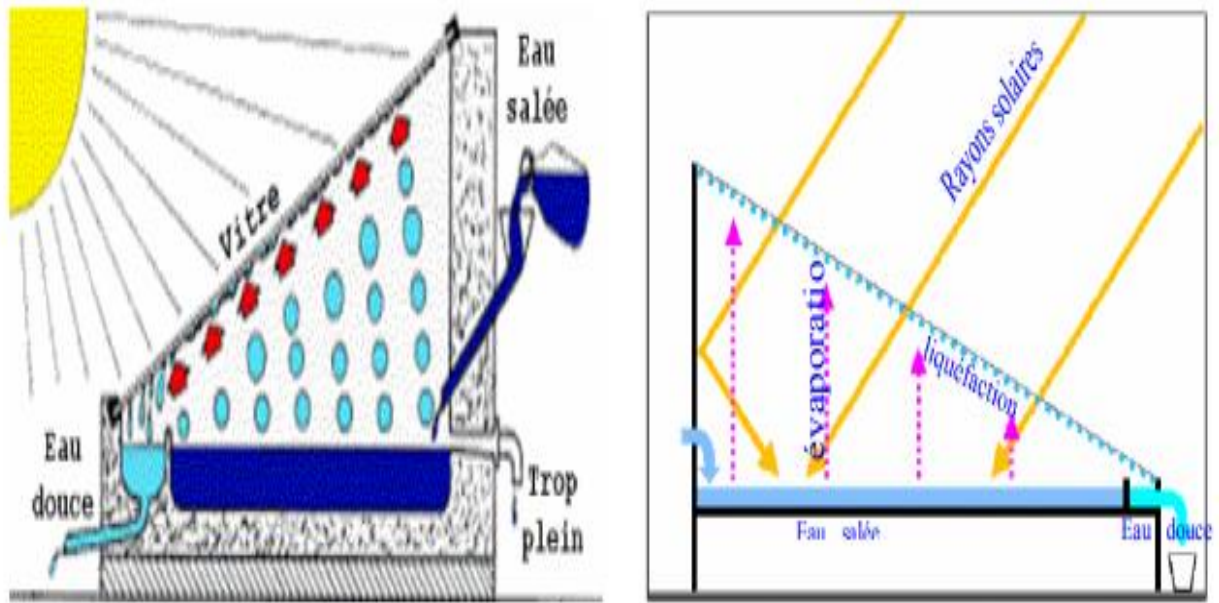


Figure II. 7 : Schéma de la distillation solaire [26].

Éventuellement des gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface de la vitre et tomber dans le récupérateur situé au coin. Il faut régulièrement nettoyer le bassin pour éliminer le sel [26].

II.5.1.2-Congélation

Le dessalement par congélation repose sur le principe que lors du gel de l'eau de mer, les cristaux de glace formés sont pratiquement dépourvus de sels dissous. Ce procédé permet donc une séparation physique entre la phase solide (glace pure) et la phase liquide (saumure concentrée).

Le processus se déroule généralement en plusieurs étapes :

- Refroidissement de l'eau de mer jusqu'à atteindre sa température de congélation.
- Cristallisation contrôlée, où des cristaux de glace se forment progressivement dans des conditions spécifiques.
- Séparation mécanique des cristaux de glace et de la saumure restante.

- Lavage des cristaux, afin d'éliminer les résidus de saumure encore présents à leur surface.
- Fusion de la glace, permettant d'obtenir une eau douce, prête à être utilisée [27].

II.5.2-Les procédés membranaires

II.5.2.1-L'électrodialyse

L'électrodialyse est un procédé de dessalement qui repose sur la séparation des sels dissous dans l'eau au moyen de membranes semi-perméables, sous l'action d'un champ électrique.

Le principe fondamental est le transfert sélectif des ions à travers des membranes spécifiques, favorisé par une différence de potentiel électrique appliquée entre deux électrodes [28].

Le schéma de la figure II.8 illustre le principe de fonctionnement d'une cellule d'électrodialyse. Chaque module élémentaire est composé de deux compartiments, désignés "1" et "2", délimités alternativement par des membranes cationiques et anioniques.

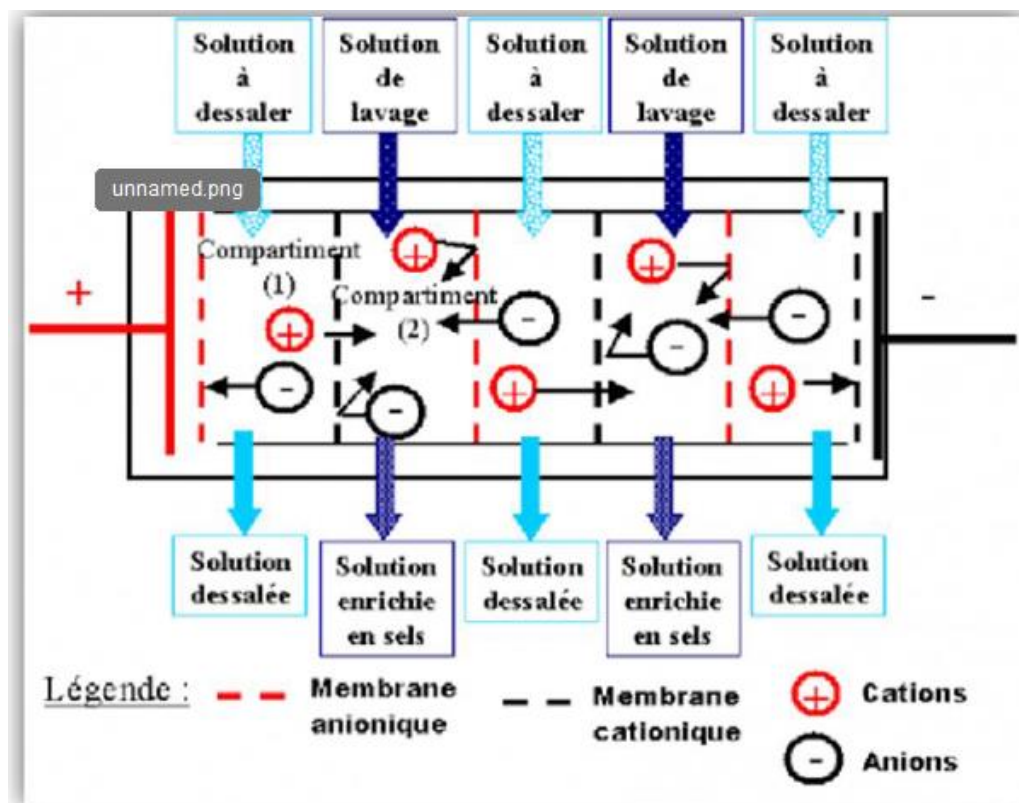


Figure II. 8 : Principe de dessalement par l'électrodialyse [28]

Lorsqu'un courant électrique est appliqué :

- Les cations (ions positifs) migrent vers la cathode (électrode négative).
- Les anions (ions négatifs) se dirigent vers l'anode (électrode positive).

Dans ce système :

- Les cations présents dans le compartiment "1" traversent la membrane cationique pour atteindre le compartiment "2", mais sont bloqués ensuite par la membrane anionique qui leur fait face.
- De même, les anions migrent vers la cellule voisine, franchissant la membrane anionique, mais sont retenus dans le compartiment "2" car ils ne peuvent traverser la membrane cationique suivante.

Ainsi, on assiste à un appauvrissement ionique dans certains compartiments (dessalés) et une concentration accrue dans d'autres (chargés en sels), permettant la séparation efficace des ions de l'eau [28].

II.5.2.2-L'Osmose inverse

L'osmose est un phénomène naturel observé dès 1748, correspondant à la diffusion d'un fluide, généralement de l'eau, à travers une membrane semi-perméable, allant d'une solution moins concentrée en soluté vers une solution plus concentrée, jusqu'à l'établissement d'un équilibre de concentration des deux côtés de la membrane. Ce transfert est dirigé par un gradient de potentiel chimique, qui agit comme force motrice. La pression osmotique est la différence de pression nécessaire pour contrebalancer ce flux naturel [21].

Dans le procédé d'osmose inverse (OI), ce principe est inversé : une pression supérieure à la pression osmotique est appliquée sur le côté contenant la solution concentrée en solutés (par exemple, l'eau de mer). Cette pression force l'eau à traverser la membrane semi-perméable vers le côté moins concentré en soluté, permettant ainsi la séparation de l'eau pure des sels dissous [21]. Le schéma de la figure II.9 illustre le principe de fonctionnement de ce procédé.

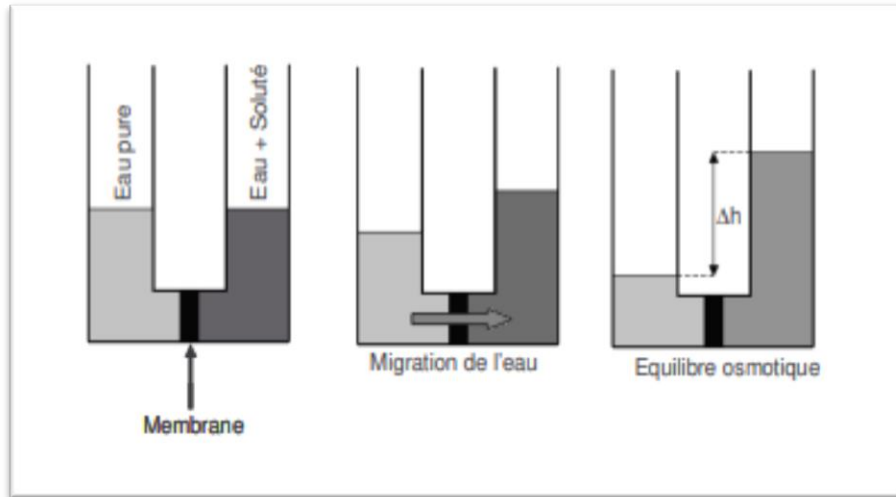


Figure II. 9 : Principe de dessalement par osmose inverse [21]

La **membrane semi-perméable** utilisée dans ce procédé est spécialement conçue pour **laisser passer les molécules d'eau** tout en retenant les ions, les sels, et d'autres impuretés dissoutes. Ce processus est aujourd'hui largement utilisé dans les unités de dessalement modernes en raison de son efficacité et de son adaptabilité [21].

À noter que l'osmose inverse est parfois désignée par le terme de "**hyper filtration**", bien que l'appellation la plus couramment utilisée reste **osmose inverse (OI)**.

II.5.3-Les procédés chimiques

II.5.3.1-Échange d'ions

L'échange d'ions est un procédé physico-chimique permettant de retirer les ions dissous dans une solution aqueuse, en les adsorbant sur un matériau solide, appelé résine échangeuse d'ions. Cette résine libère en échange une quantité équivalente d'ions de même charge, assurant ainsi l'électro neutralité de la solution. Les ions de charge opposée à ceux ciblés par la résine ne sont pas affectés par le processus.

-Principe de déminéralisation totale :

Lorsqu'on souhaite éliminer à la fois les cations et les anions présents dans l'eau, deux types de résines sont utilisés :

- Une résine échangeuse de cations, sous forme hydrogène (H^+).
- Une résine échangeuse d'anions, sous forme hydroxyde (OH^-).

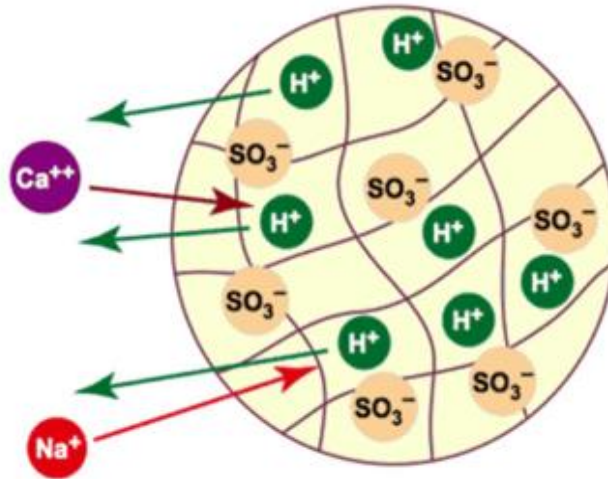
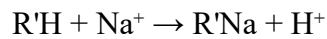
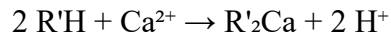


Figure II. 10 : Remplacement des cations par H^+ [29]

Les cations dissous (tels que Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+}) sont remplacés par des ions H^+ :



De même, les anions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) sont remplacés par des ions OH^- :

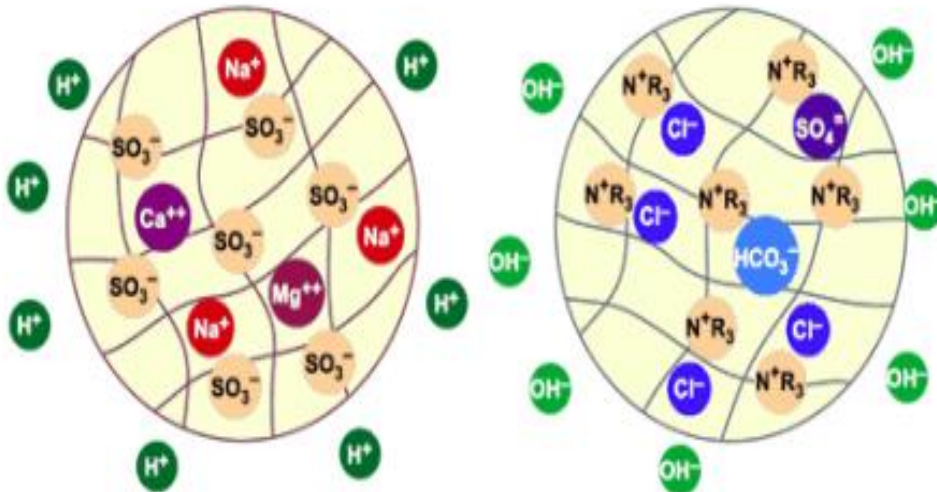
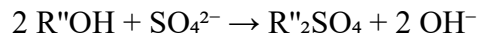
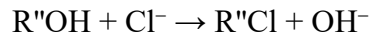


Figure II. 11 : Principe de l'échange d'ions en déminéralisation de l'eau [29]

II.6-Choix d'un procédé de dessalement

Le choix d'un procédé de dessalement dépend de plusieurs facteurs, généralement regroupés en deux grandes catégories : les critères économiques et les critères techniques.

II.6.1-Critères économiques

- Coût de l'énergie : ce facteur est primordial. Il varie selon la nature de l'énergie utilisée (gaz naturel, fuel, électricité, énergies renouvelables...) et sa disponibilité dans la région (production locale ou importation).
- Coût des produits chimiques : dépend de leur accessibilité. Leur prix sera influencé par leur disponibilité locale ou leur nécessité d'importation.
- Taux de change : les unités utilisant l'osmose inverse sont souvent importées, notamment des États-Unis. Ainsi, les variations du taux de change du dollar américain peuvent impacter significativement le coût des équipements et des pièces de rechange.

II.6.2-Critères techniques

- Salinité de l'eau brute :

Elle peut varier considérablement selon la source. Par exemple, la mer Baltique affiche une salinité d'environ 7 g/l, tandis que celle de la mer Morte atteint 270 g/l.

Les procédés thermiques (distillation) sont généralement plus adaptés aux eaux très salines, tandis que les procédés membranaires (osmose inverse, nanofiltration) conviennent mieux aux eaux saumâtres.

- Composition chimique :

Certains éléments présents dans l'eau brute, comme les sulfates ou les carbonates, peuvent affecter les performances du procédé et nécessiter un prétraitement spécifique.

- Caractéristiques physiques :

La turbidité et la présence de matières en suspension influencent le choix et la complexité du prétraitement, en particulier pour les procédés à membranes qui sont sensibles à l'encrassement.

- Qualité de l'eau produite :

En fonction de l'usage final (eau potable, usage industriel, etc.), les exigences varient. On peut viser une eau de 300 à 500 ppm de sels pour l'eau potable, et jusqu'à 15–30 ppm pour une utilisation industrielle spécifique.

- Capacité de production requise :

La taille de l'installation varie selon les besoins, allant de quelques m³/jour à plusieurs centaines de milliers de m³/jour.

- **Source d'énergie disponible :**

Le choix du procédé dépend aussi du type d'énergie accessible sur le site : gaz, pétrole, électricité, énergies renouvelables, énergie nucléaire, ou énergie récupérable.

- **Niveau d'automatisation :**

Les systèmes sophistiqués dotés d'instruments de mesure (pH, température, conductivité, etc.) et d'enregistrement automatique augmentent les coûts d'investissement, mais permettent un meilleur contrôle du processus.

II.7-Conclusion

Le dessalement de l'eau de mer est devenu, ces dernières années, une solution de plus en plus privilégiée pour répondre à la pénurie mondiale d'eau potable. Les progrès technologiques récents ont permis d'optimiser les procédés de dessalement, les rendant à la fois plus efficaces et plus économiquement accessibles pour produire une eau de grande qualité.

Pendant longtemps, les procédés thermiques ont représenté la seule méthode fiable de dessalement, notamment la distillation multi-étagée (MSF) et la distillation à effets multiples (MED), qui ont prouvé leur performance et leur rentabilité à l'échelle industrielle.

Cependant, avec l'émergence des technologies membranaires, l'osmose inverse s'impose progressivement comme une alternative compétitive, gagnant continuellement du terrain sur le marché du dessalement grâce à son efficacité énergétique et à sa modularité.

CHAPITRE III :
L'OSMOSE
INVERSE

CHAPITRE III : L'OSMOSE INVERSE

III.1-Introduction

Dès les premières décennies du XXe siècle, l'étude des propriétés osmotiques des membranes cellulaires naturelles a incité certains chercheurs à envisager l'utilisation de membranes artificielles pour séparer le sel de l'eau de mer. Ce n'est cependant qu'à partir des années 1960 que des équipes de chercheurs américains et japonais, dans un contexte de développement industriel, ont mis au point des membranes semi-perméables. Ils ont rapidement réalisé que ces membranes pouvaient être employées avec succès pour le dessalement de l'eau de mer. [30]

III.2-Définition de l'osmose et de l'osmose inverse

L'osmose est basée sur le principe fondamental de l'équilibre. Lorsque deux liquides contenant différentes concentrations de solides dissous sont mis en contact, ceux-ci se mélangent jusqu'à uniformisation des concentrations. Lorsque ces deux liquides sont séparés par une membrane semi-perméable (laquelle laisse passer les liquides tandis que les solides dissous restent dans leur compartiment), le liquide contenant la plus faible concentration de solides dissous va traverser la membrane pour aller dans le liquide contenant la plus forte concentration de solides dissous. Après un temps donné, le niveau de l'eau sera plus élevé d'un côté de la membrane. La différence de hauteur est appelée pression osmotique. [31]

L'osmose inverse consiste à faire passer l'eau au travers des membranes semi-perméables, sous l'effet de la pression différentielle de la solution concentrée vers la solution diluée. Le taux d'élimination est exprimé en pourcentage de la salinité totale, la réduction de salinité de l'eau saumâtre est supérieure à 92% contre plus de 98,5% pour l'eau de mer [31]

III.3-Description d'une filière de traitement des eaux par osmose inverse :

Les principaux constituants d'une installation d'osmose inverse sont les suivants :

- La membrane proprement dite ;
- Le module ;
- La pompe haute pression ;
- Le système de récupération d'énergie ;
- Le poste de prétraitement. [16]

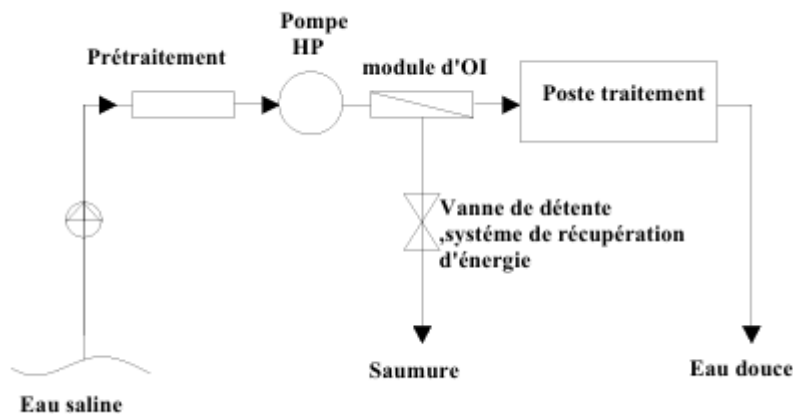


Figure III. 1 : Schéma d'une filière de traitement par osmose inverse [16]

III.4-Procédure d'osmose inverse de choix

L'osmose inverse progresse sur une tendance à la baisse pour les raisons suivantes :

- Amélioration des performances des membranes d'osmose inverse (augmentation de surface, rejet, perméabilité, matériaux...)
- Améliorer la performance des technologies de récupération d'énergie
- Flux de travail simplifié
- Effet de la taille du projet
- Prix bas pour les équipements et les membranes
- Éprouvé et techniquement maîtrisé
- Modulaire et flexible, il répond aux besoins en eau [32]

III.5-Choix d'un module d'osmose inverse

Les dispositifs de séparation utilisant des membranes sont désignés sous les termes « cartouches » ou « modules ». Leur conception varie en fonction de la forme de la membrane et doit garantir une circulation adéquate à sa surface tout en assurant une bonne compacité. De plus, ces appareils sont élaborés en tenant compte de l'application prévue et doivent faciliter l'exploitation, notamment en ce qui concerne le montage, le démontage et le nettoyage.

Les modules utilisés dans les procédés membranaires sont de type tubulaires, spiralés ou à fibres creuses,

III.5.1-Les modules tubulaires

Les membranes sont placées ou formées à l'intérieur d'un tube support, poreux ou percé de trous de drainage, et de diamètre variant de 10 à 40 nm. Ces tubes sont ensuite placés en parallèle ou en série dans une enveloppe cylindrique pour constituer le module unitaire. L'hydrodynamique de l'écoulement est parfaitement défini et des vitesses de circulation pouvant atteindre 6 m. s^{-1} sont possibles si un régime de forte turbulence est nécessaire. Ces modules ne nécessitent pas de préfiltration fine du liquide à traiter et sont faciles à nettoyer. [29]

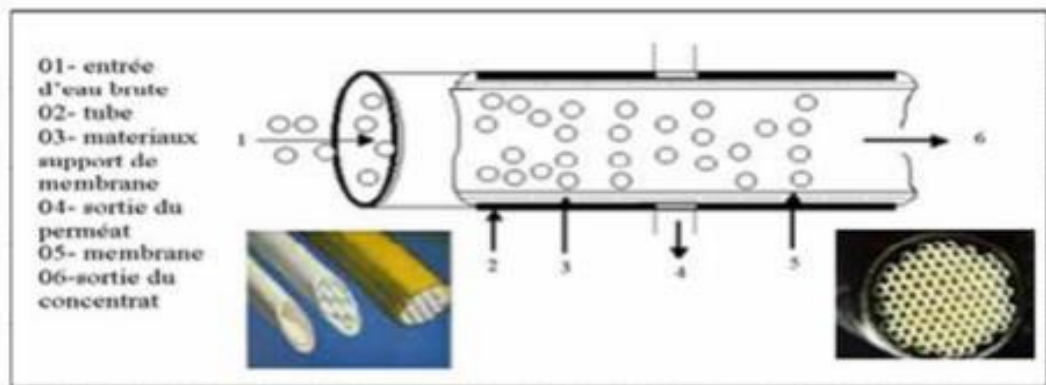


Figure III. 2 : Module à membrane tubulaire [29].

III.5.2-Les modules spiralés

Les membranes planes sont enroulées en spirale autour d'un tube creux et perforé, servant à collecter le perméat. Un grillage plastique de faible épaisseur (0,8 à 1,2 mm) est inséré entre les membranes pour induire une turbulence dans la circulation du fluide. Cette configuration forme un cylindre multicouche où le perméat s'écoule en spirale vers le tube poreux central, tandis que l'alimentation circule axialement à travers les canaux ainsi créés.

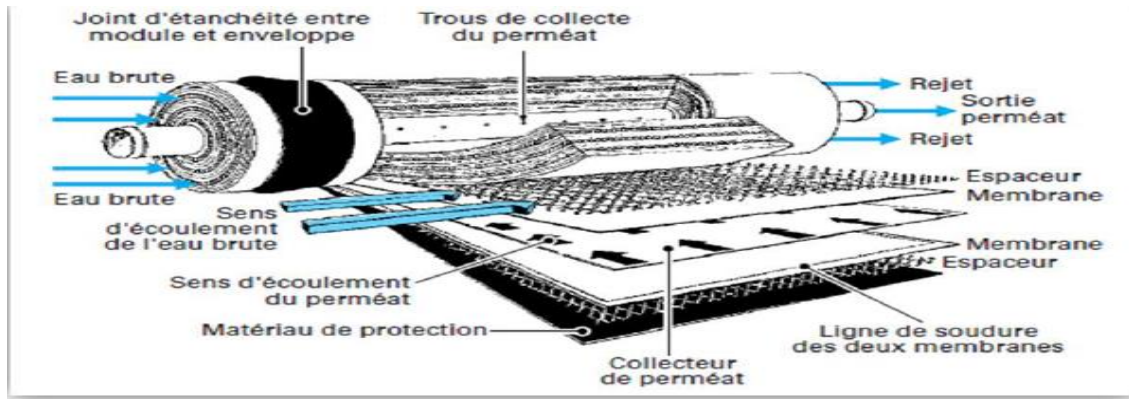


Figure III. 3 : Représentation d'un module spiralé [14]

III.5.3-Les modules à fibres creuses

Les modules à fibres creuses comprennent des faisceaux de minuscules tubes capillaires poreux. Lors du processus, les ions sont retenus lorsque l'eau traverse les parois des tubes, et le perméat est collecté à l'intérieur du canal central des fibres. Simultanément, les saumures se concentrent à l'extérieur des fibres, dans un réservoir prévu à cet effet.

III.5.4-Les modules Plan

Ce type de module est le plus simple :

Les membranes sont empilées en mille feuilles séparées par cadres intermédiaires qui assurent la circulation des fluides, et les plus anciens de technologie calquée directement sur celle des filtres presses.

Il peut se présenter soit sous forme de plaques unitaires soit sous forme de cartouches. [33]

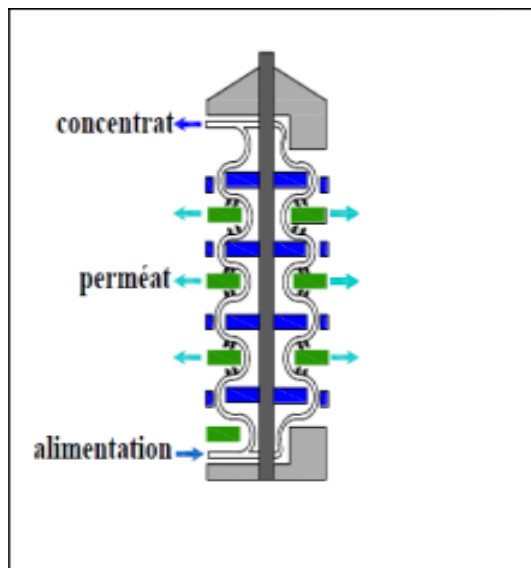


Figure III. 4 : Schéma de principe d'un module plan [32]

➤ *Les avantages et les inconvénients*

Tableau III.1:Avantages et inconvénients des modules d'osmose inverse [33]

Type de module	Avantage	Inconvénient
Plan	Flexibilité du système Modulaire Échange standard par plaque Faible consommation d'énergie Accès aux membranes Performance (flux) Plaques réutilisables	Faible résistance thermique des matières plastiques Colmatage Prix
Spiralée	Compacité Faible volume mort Faible consommation d'énergie Prix	Performance (flux) Échange standard par module Traitement de produits visqueux difficile Faible résistance thermique des matières plastiques Perte de charge élevée Zones mortes Colmatage Nettoyage difficile Accès aux membranes Membranes collées Télescopage de la membrane

<p align="center">Tubulaires</p>	<p>En général :</p> <p>Faible colmatage Facilité de nettoyage Échange standard par Tube Traitement de produits visqueux facile</p> <p>Membranes minérales :</p> <p>Durée de vie Tenue mécanique Thermostabilité Résistance aux lavages chimiques Stérilisation à la Vapeur</p>	<p>En général :</p> <p>Volume mort important Consommation d'énergie Prix</p> <p>Membranes organiques :</p> <p>Faible résistance thermique des matières plastiques</p>
<p align="center">Fibres creuses</p>	<p>Compacité Faible volume mort Faible consommation d'énergie Tenue mécanique Prix</p>	<p>Traitement de produits visqueux difficile Échange standard par module Faible résistance thermique des matières plastiques Colmatage</p>

III.6-Choix d'une membrane

La structure des matériaux permet de répartir les membranes en trois grandes catégories :

- **Membranes isotropes**, dont les propriétés structurelles sont homogènes sur toute l'épaisseur ;
- **Membranes anisotropes**, dont les caractéristiques varient de la surface jusqu'au cœur de la membrane ;

- **Membranes liquides**, composées d'une phase liquide immobilisée au sein d'un support solide.

Selon la nature des matériaux constituant les différentes couches, plusieurs types spécifiques de membranes peuvent ensuite être distingués :

III.6.1-Membranes organiques

Les membranes organiques sont majoritairement fabriquées à partir de polymères organiques tels que l'acétate de cellulose, les polysulfones ou encore les polyamides. Les qualités intrinsèques de ces matériaux leur confèrent une grande adaptabilité à diverses applications. Environ 90 % des membranes d'ultrafiltration et de microfiltration sont constituées de membranes organiques. [34]

❖ *Membranes cellulosiques*

Le concept du RO a été démontré en premier lieu à la fin de l'année 1950 avec une membrane de cellulose acétate. Ces membranes sont asymétriques, composées d'une surface de layer (couche) fine et dense de (0.2-0.5 μm) et une substructure poreuse et épaisse. Le rejet de soluté est accompli par le layer (couche) et la substructure poreuse fournit une structure solide [35].

❖ *Membranes aromatiques polyamides*

Les membranes aromatiques polyamides ont été développées en premier par Dupont dans une configuration hollowfiber (fibres creux). Comme les membranes cellulosiques, elles ont aussi une structure asymétrique avec une peau dense et fine de (0.1-1.0 μm) et une substructure poreuse. Les membranes polyamides ont une meilleure résistance à l'hydrodialyse et aux attaques biologiques que les membranes acétate cellulosiques [35].

❖ *Thin-film composites (composites à couche mince)*

Comme son nom l'indique, ces membranes sont formées par une surface fine et dense qui rejette le soluté sur les substructures poreuses. Les matériaux de construction et le processus de fabrication de ces deux layers (couches) peut être différent et optimisé pour une meilleure combinaison pour un grand flux d'eau et une faible perméabilité du soluté. Les

caractéristiques, flux de l'eau et de rejet du soluté, sont en général déterminées par la couche fine qui a une épaisseur qui peut aller de 0.01 à 0.1 μm [35].

III.6.2-Membranes minérales ou inorganiques

Les membranes inorganiques se sont développées plus tardivement que les membranes organiques.

Elles sont constituées de matériaux entièrement minéraux, tels que des céramiques, du métal fritté ou du verre. Leur introduction a permis de travailler dans des conditions extrêmes de température et d'agressions chimiques, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives dans les procédés de séparation par membranes. Les membranes dites dynamiques sont fabriquées à partir de tubes poreux présentant un diamètre de pores compris entre 0,5 et 5 μm . Certaines de ces membranes peuvent être utilisées dans le traitement des eaux usées. [34]

III.6.3-Membranes composites (organiques et anisotropes)

Les membranes composites se caractérisent par une structure asymétrique, avec une couche active ("peau") beaucoup plus fine que celle des membranes classiques non composites. Elles sont constituées par la superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique.

Ces membranes peuvent être :

- entièrement organiques (superposition de polymères organiques différents),
- organo-minérales,
- ou entièrement minérales.

Pour des raisons de confidentialité industrielle, les fabricants préfèrent décrire les membranes en termes de :

- **Hydrophilicité** (souvent mesurée par l'angle de contact avec l'eau : plus l'angle est faible, plus la surface est hydrophile),
- **Résistance mécanique** (pression maximale, durée de vie),
- **Stabilité chimique** (résistance aux variations de pH, oxydants, solvants, etc.).[35]

Critères de sélection d'une membrane pour le dessalement d'eau de mer :

1. Rejet élevé des sels : La membrane doit éliminer environ 99 % des sels dissous. Les membranes disponibles sur le marché affichent des taux de rejet variant généralement entre 99,0 % et 99,8 %, mesurés dans des conditions standardisées (concentration en NaCl, pression, température, pH et taux de conversion).

2. Résistance à la compaction : Sous des pressions élevées, souvent supérieures à 50 bars, certaines membranes peuvent se compacter, ce qui réduit leur efficacité. Il est donc crucial de choisir une membrane capable de résister à ce phénomène pour assurer une performance stable et durable.

3. Stabilité chimique : Une membrane de qualité doit fonctionner en continu dans une plage de pH étendue, généralement entre 3 et 10. Cette flexibilité permet d'accommoder les variations du pH de l'eau prétraitée (souvent proche de 7), facilite les opérations de nettoyage chimique, prolonge la durée de vie de la membrane et réduit les coûts de maintenance.

III.7-Pompe haute pression

La pompe haute pression est essentielle dans une installation d'osmose inverse. Elle fournit l'énergie nécessaire pour pousser l'eau salée à travers des membranes et séparer l'eau pure des sels. Son rendement influence directement la consommation d'énergie du système. Il existe plusieurs types de pompes :

- Les pompes centrifuges multi-étagées, robustes et adaptées aux grands débits ;
- Les pompes centrifuges mono-étagées à grande vitesse, plus compactes ;
- Les pompes volumétriques à piston, précises mais nécessitant plus d'entretien.

III.8-Poste de prétraitement

L'eau de produit provenant des usines de dessalement est typiquement faible en teneur en minéraux, en alcalinité et en pH. Par conséquent, l'eau dessalée doit être conditionnée (post-traitée) avant la distribution et l'utilisation finales. En règle générale, le post-traitement de l'eau du produit comprend un ou plusieurs des processus suivants :

- Stabilisation par addition d'alcalinité carbonatée
- Inhibition de la corrosion
- Reminéralisation par mélange avec de l'eau à haute teneur en minéraux.

- Désinfection.
- Polissage de la qualité de l'eau pour une élimination améliorée de composés spécifiques (par exemple, bore, silice, diméthylnitrosamine).

Le post-traitement du perméat produit par le système de dessalement est nécessaire pour la désinfection et l'ajout de minéraux afin de protéger la santé publique et de préserver l'intégrité du système de distribution d'eau. [36]

III.9-Système de récupération d'énergie

Dans un système d'osmose inverse, le concentrât - l'eau résiduelle riche en sels - est rejeté à une pression élevée pouvant atteindre jusqu'à 65 bars. Pour améliorer l'efficacité énergétique de l'installation, il est crucial de récupérer une partie de l'énergie contenue dans ce flux. Deux principaux types de systèmes de récupération hydraulique sont utilisés :

→ Récupération indirecte

L'énergie hydraulique du concentrât est exploitée via une turbine qui aide à alléger la charge du moteur de la pompe haute pression. Cette récupération réduit la consommation électrique de la pompe principale.

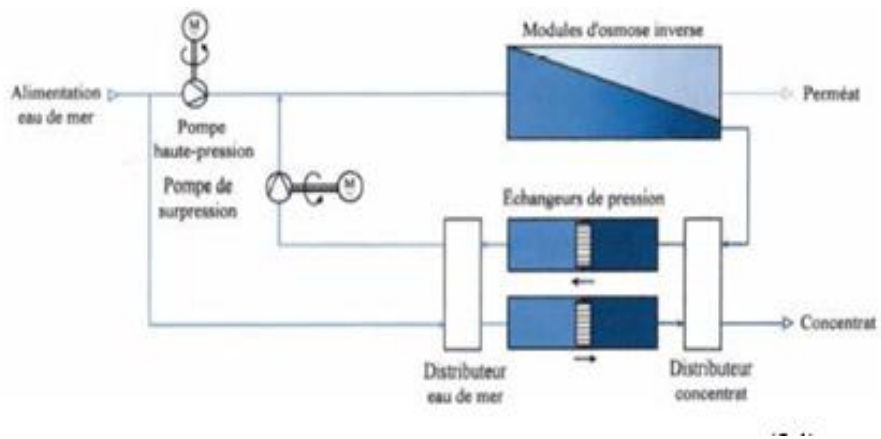


Figure III. 5 : Schéma de récupération indirecte de l'énergie [37]

→ Récupération directe

L'énergie du concentrât est transférée directement au flux d'eau d'alimentation grâce à un échangeur de pression. Le concentrât transmet ainsi son énergie à une partie de l'eau d'alimentation, maximisant le rendement énergétique. Une pompe de surpression est installée pour compenser les pertes de charge dues à l'échangeur.

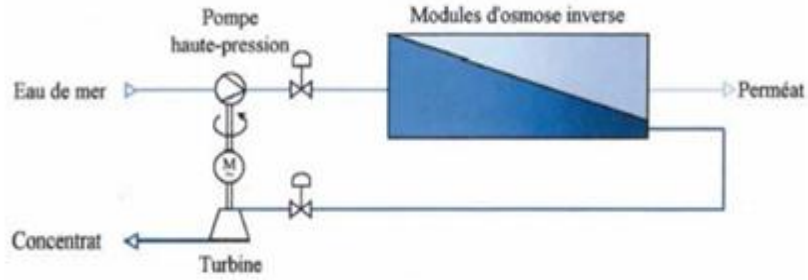


Figure III. 6 : Schéma de récupération directe de l'énergie [37]

III.10-Mécanisme de transfert de matière

Plusieurs théories expliquent les transferts de matière à travers les membranes semi-perméables et leur sélectivité (Figure 19). Parmi celles-ci, on distingue principalement :

Le modèle de solubilisation-diffusion : le soluté et le solvant se dissolvent dans la membrane et y diffusent.

Le modèle basé sur la notion de capillaires : ce modèle s'applique davantage aux membranes de microfiltration et, dans une moindre mesure, à l'ultrafiltration (Figure 19).

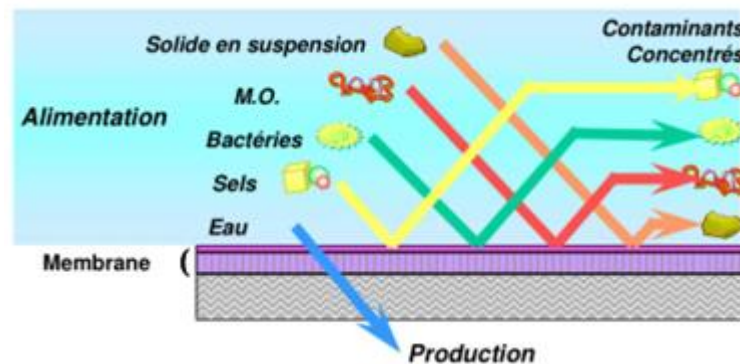


Figure III. 7 : Mécanisme de transfert de matière [37]

III.11-Conditions de fonctionnement et choix des paramètres

✚ Choix de taux de conversion

Le taux de conversion (ou "recovery rate") est le pourcentage d'eau d'alimentation transformé en eau douce dans un procédé de dessalement, en particulier en osmose inverse. Il est exprimé par :

$$\text{Taux de conversion (\%)} = (\text{Débit d'eau produite} / \text{Débit d'eau d'alimentation}) \times 100$$

Choix de la pression

La sélection de la pression dans un système de dessalement par osmose inverse doit être rigoureusement optimisée afin de trouver un équilibre entre la consommation énergétique et la performance des membranes.

La pression appliquée doit toujours dépasser la pression osmotique de l'eau à traiter pour permettre le passage de l'eau à travers la membrane.

En augmentant la pression, on accroît la consommation d'énergie, mais cela permet également de réduire la surface de membrane nécessaire pour produire un volume donné d'eau douce.

Cependant, une pression excessive peut engendrer des contraintes mécaniques sur les membranes, compromettant leur durabilité et leur efficacité.

1. Par ailleurs, bien que l'augmentation de la pression améliore la sélectivité des membranes en retenant mieux les sels et contaminants, des pressions trop élevées peuvent détériorer la performance à long terme. C'est pourquoi la pression maximale supportée par les modules de membranes est généralement limitée à environ 70-80 bars, afin d'éviter les risques de colmatage et la dégradation prématurée des équipements. [38]

Choix de la température

La capacité de production d'une unité d'osmose inverse augmente de 2,5 à 3 % par °C avec la température, facilitant le passage de l'eau à travers les membranes en réduisant sa viscosité. Cependant, une température plus élevée favorise également le colmatage des membranes, car elle accentue la précipitation des sels et des impuretés, réduisant ainsi leur efficacité et leur durée de vie. Ainsi, bien que la température améliore la production, elle nécessite un contrôle rigoureux pour minimiser l'encrassement et les coûts de maintenance.

Consommation de l'énergie

L'osmose inverse utilise une membrane semi-perméable et une pression mécanique pour séparer l'eau douce du sel, sans changement de phase. Cela permet une consommation énergétique beaucoup plus faible, généralement autour de 3 à 5 kWh par m³ d'eau produite pour l'eau de mer, et encore moins pour l'eau saumâtre. De plus, avec l'intégration de

récupérateurs d'énergie modernes (comme les échangeurs isobariques), la consommation peut être réduite jusqu'à 2,5 kWh/m³ dans les meilleures installations. Grâce à ses faibles besoins énergétiques, ses coûts d'exploitation réduits et ses performances élevées, l'osmose inverse est aujourd'hui le procédé de dessalement le plus utilisé au monde.

III.12-Avantages et inconvénients d'osmose inverse

a) *Avantages de l'osmose inverse :*

2. faible consommation énergétique : environ 3 à 4 KWh / m³ dans le cas d'eau de mer à 35g/l, grâce en particulier à la mise en place de système de récupération d'énergie ;
3. investissement plus faible dus en particulier à l'amélioration des performances des membranes ; - gamme de capacités disponible commercialement très vaste ;
4. gérer les résidus (concentrât) pour améliorer le bilan environnemental ;
5. maîtriser les phénomènes de colmatage. [38]

b) *Inconvénients de l'osmose inverse :*

1. La membrane n'a une durée de vie que d'environ 3ans, ce qui veut dire qu'à la longue une usine dépense énormément en frais d'installations puisque les membranes industrielles sont relativement chères.
2. Le rendement n'est pas total, à la fin de ces procédés il reste 25% d'eau non utilisable (il s'agit de la saumure, solution très sel), rejetée alors dans la mer ce qui provoque un réel désastre pour l'écosystème !
3. La pureté de l'eau n'est jamais totale, elle reste constamment inférieure à 100%. [38]

III.13-Conclusion

L'osmose inverse a connu des progrès technologiques significatifs grâce à l'apparition sur le marché de membranes en polyamide, reconnues pour leur longévité accrue. Cette méthode se distingue par son efficacité et sa capacité à traiter une vaste gamme de concentrations, contrairement à l'électrodialyse et à la distillation, qui restent cantonnées à des applications plus restreintes. Le but essentiel de ce procédé est d'éliminer les sels, les matières organiques ainsi que les micro-organismes présents dans l'eau souterraine.

CHAPITRE IV :
Présentation et
description de la
station de
dessalement de Chatt
El Hilal

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

IV.1-Introduction

Face aux défis croissants liés à la disponibilité de l'eau dans l'ouest algérien, exacerbés par les variations climatiques, l'augmentation démographique et les effets du changement climatique, l'État a misé sur le dessalement de l'eau de mer comme solution durable et fiable. Parmi les projets phares figure la station de Chatt El Hilal, implantée dans la wilaya d'Aïn Témouchent, qui produit jusqu'à 200 000 m³ d'eau potable par jour pour alimenter cette wilaya ainsi que celle d'Oran.



Figure IV. 1 : Photo de la station de dessalement de l'eau de mer de Chatt El Hillel [39]

IV.2-Situation géographique

La station de dessalement de Béni Saf est située sur la côte méditerranéenne, dans la commune d'Oued El Kihel (wilaya d'Aïn Témouchent), à proximité de la plage de Chatt El Hilal. Elle s'étend sur 65 700 m².

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL



Figure IV. 2 : Situation géographique de la SDEM de Béni Saf [39]

IV.3-Présentation du promoteur de projet

Le projet a été réalisé par la société Beni Saf Water Company Spa, fruit d'un partenariat entre le consortium espagnol GEIDA (COBRA, BEFESA, CODESA, SADYT), l'Algérienne des Eaux (ADE) et l'Algerian Energy Company (AEC), cette dernière issue d'un partenariat entre Sonatrach et Sonelgaz.

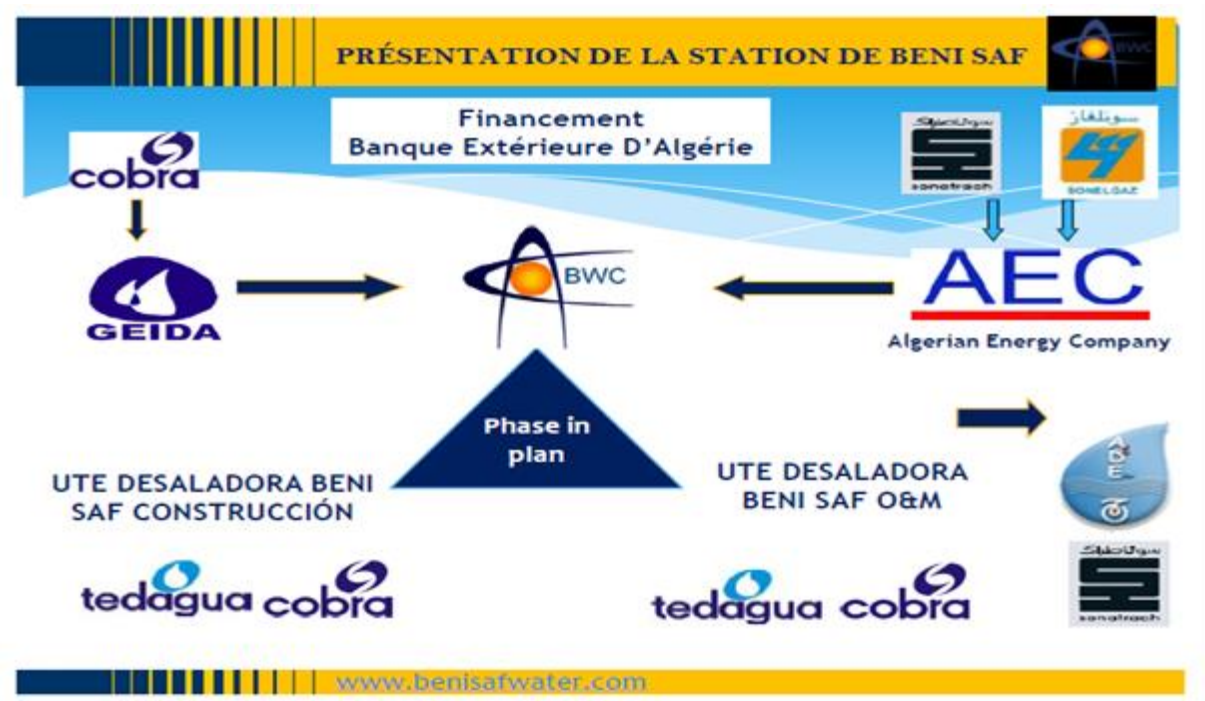


Figure IV. 3 : les différents collaborateurs de la station BWC

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

IV.4-Fiche Technique

Tableau IV. 1 : Fiche technique de la SDEM de Béni Saf. [33]

Lieu d'implantation :	Chatt El Hilal, Beni Saf, Wilaya d'Aïn Témouchent, Algérie.
Surface Totale	5.12 ha
Surface Bâtie	2.68 ha
Date signature du contrat	10 Septembre 2005
Type de Captage d'eau de mer	Emissaire Long de 1000 M /DN 2400 mm
Rejet de Saumure	Emissaire long de 500 M /DN 1800 mm
Date ouverture du chantier	01 Août 2006
Mise en service partielle	09 Novembre 2009
Mise en service totale	04 Avril 2010
Capacité de production	200.000 m ³ /jours
Consommation électrique	4.15 KW/m ³
Procédé de traitement	Osmose inverse
Taux de rendement de la station	75%
Marque des membranes	Hydranautic
Nombre de membrane /tube de pression	7 unités
Forme	Roulement en spirale
Diamètre	200 mm
Montant de l'investissement	240 M\$
Prix de l'eau	0.6994 \$/m ³

IV.5-Infrastructures principales et schéma général du dessalement à la SDEM de Béni Saf :

La station de dessalement d'eau de mer de Béni Saf est une installation automatisée de grande capacité, conçue pour fournir de l'eau potable à la région ouest de l'Algérie. Son fonctionnement repose sur plusieurs infrastructures clés qui assurent un traitement complet et efficace de l'eau de mer.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

Principales installations :

- **Captage de l'eau de mer**

L'eau est prélevée à environ 1000 mètres au large via un émissaire en polyéthylène haute densité (PEHD) de 2,4 mètres de diamètre, raccordé à une tour d'aspiration immergée à 18 mètres de profondeur. Ce dispositif permet de capter une eau la plus propre possible, qui est ensuite acheminée par gravité vers la station [40].

- **Poste de pompage**

Onze pompes centrifuges horizontales assurent le transfert de l'eau de mer depuis le bassin de captage vers la zone de traitement, avec un système d'amorçage à vide garantissant la continuité du flux. [40] [41].

- **Prétraitement**

Cette étape comprend plusieurs opérations : dégrillage, filtration mécanique (filtres rotatifs, filtres à sable et filtres à anthracite), ainsi que le dosage de produits chimiques (chlorure ferrique, acide sulfurique, anti-incrustants, etc.) pour éliminer les impuretés, protéger les membranes et ajuster les paramètres physico-chimiques de l'eau [41].

- **Unité d'osmose inverse**

Le cœur du processus où l'eau prétraitée traverse des membranes semi-perméables qui éliminent les sels et autres contaminants, produisant ainsi de l'eau douce conforme aux normes de potabilité [41].

- **Poste de nettoyage en place (CIP)**

Un système intégré permet le nettoyage périodique des membranes afin de maintenir leur efficacité et prolonger leur durée de vie [41].

- **Traitement final et reminéralisation**

Après dessalement, l'eau est reminéralisée pour rétablir une composition minérale équilibrée et subit une désinfection finale avant distribution [41].

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

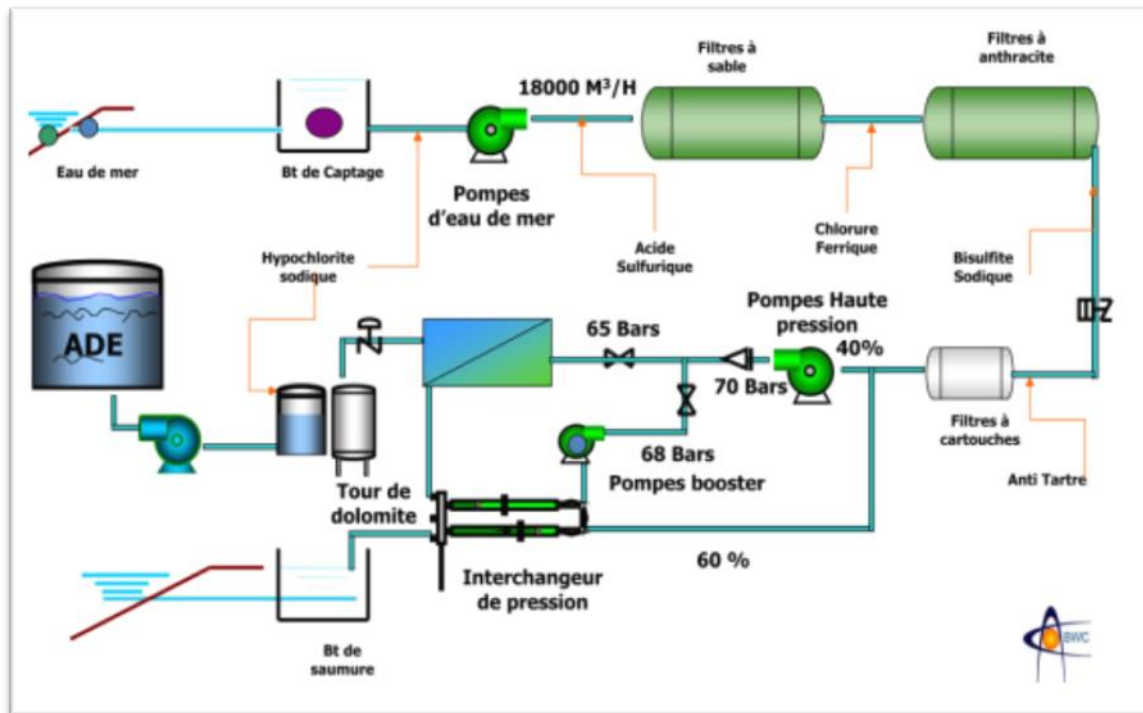


Figure IV. 4 : Schéma du processus de la station.

IV.6-Description du fonctionnement de la SDEM

IV.6.1-Captage et prétraitement initial :

L'eau de mer est prélevée à 1 000 mètres au large via un émissaire en polyéthylène haute densité (PEHD) de 2 400 mm de diamètre, relié à une tour d'aspiration de 10 mètres de hauteur immergée à 18 mètres de profondeur, garantissant une eau de qualité en évitant les zones de turbulence et de pollution.



Figure IV. 5 : Les tuyaux de captage. [42]

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

L'eau circule par gravité à moins de 1 m/s pour limiter l'érosion et le colmatage, puis subit un dégrillage mécanique qui retient les déchets volumineux (poissons, algues, plastiques, etc.) grâce à deux gros dégrilleurs.



Figure IV. 6 : Le dégrillage pour éliminer les plus gros déchets. [42]

Elle est ensuite tamisée par des filtres rotatifs pour éliminer les particules fines avant d'être pompée sur environ 900 mètres vers l'unité de prétraitement.

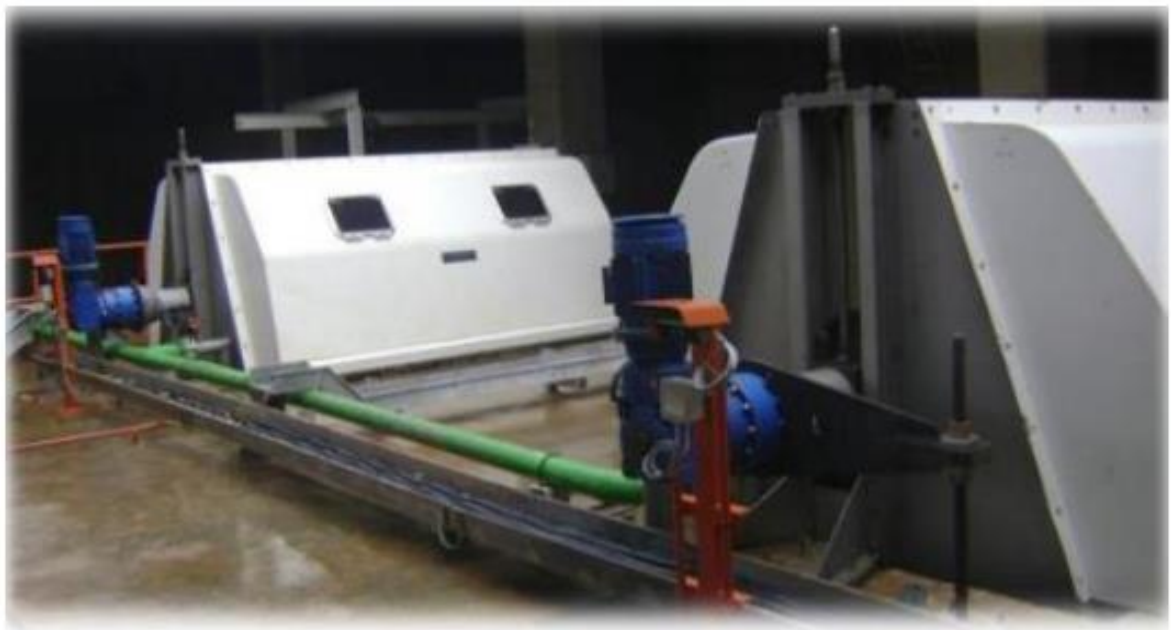


Figure IV. 7 : Filtres rotatifs de nettoyage. [42]

Le bâtiment de captage comprend un bassin d'aspiration, deux filtres à tamis rotatif, onze pompes centrifuges horizontales fournissant 6 bars de pression et 1800 m³/h de débit, ainsi que deux réservoirs anti-coup de bélier de 50 000 litres pour amortir les surpressions hydrauliques.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL



Figure IV. 8 : Bâtiment de captage. [42]

Les pompes, équipées de joints d'expansion et de dispositifs d'amorçage rapides, sont contrôlées via une salle électrique centralisant commande et surveillance. Les conduites de refoulement convergent vers un collecteur principal en polyester renforcé de fibre de verre (PRV) de 1800 mm de diamètre, acheminant l'eau vers l'unité de dessalement.

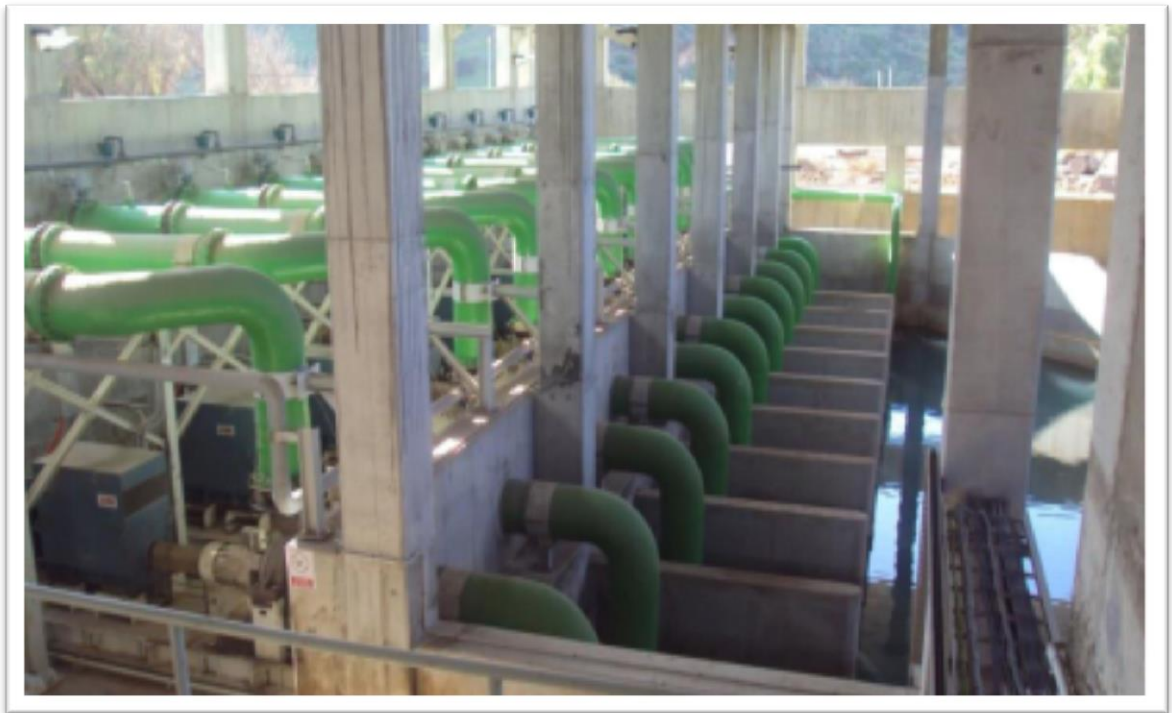


Figure IV. 9 : pompes de pompage et bassin de stockage, 16 mars 2025.

Pour assurer une désinfection préliminaire, deux réservoirs d'hypochlorite de sodium avec pompes doseuses injectent le produit soit dans la tour de captage, soit dans le bassin.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL



Figure IV. 10 : Réservoir de stockage d’Hypochlorite de sodium. [42]

Lors des opérations, les vannes motorisées sur les conduites de refoulement s’ouvrent ou se ferment automatiquement pour éviter reflux et variations brusques de pression, tandis que les amortisseurs de chocs hydrauliques pressurisés protègent le système lors des démarrages simultanés des pompes.

IV.6.2-Prétraitement de l’eau de mer

Le prétraitement vise à éliminer matières en suspension, substances organiques et micro-organismes, afin de préserver les équipements et les membranes d’osmose inverse.

a) Prétraitement chimique

- **Coagulation** : La coagulation consiste en l’injection de chlorure ferrique (FeCl_3) à partir de deux citernes de 60 m^3 chacune, afin d’agglomérer les particules fines et de faciliter leur élimination lors du prétraitement. L’ensemble des produits chimiques utilisés à cette étape est stocké et dosé dans un bâtiment dédié, qui regroupe deux réservoirs en plastique renforcé de fibres de verre (PRFV) pour le chlorure ferrique, deux pour le métabisulfite de sodium – employé à la neutralisation du chlore résiduel – et deux pour l’anti-incrustant, utilisé afin de prévenir la formation de dépôts minéraux sur les membranes d’osmose inverse.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL



Figure IV. 11 : Bâtiment de dosage chimique, 17 mars 2025.

- **Neutralisation du pH :** La neutralisation du pH est assurée par l'ajout d'acide sulfurique (H_2SO_4) en aval des filtres à sable, directement dans la conduite principale, afin de réguler le pH de l'eau de mer et prévenir la précipitation des carbonates et bicarbonates susceptibles d'entartrer les membranes d'osmose inverse ; cette acidification, réalisée à l'aide de deux réservoirs de stockage en acier de 100 m^3 chacun, permet également de générer une quantité suffisante de dioxyde de carbone (CO_2), indispensable au processus de reminéralisation de l'eau produite, notamment lors de son passage dans la tour de calcite.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL



Figure IV. 12 : Bâtiment d'acide sulfurique, 17 mars 2025.

- **Déchloration** : La déchloration consiste à injecter du métabisulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) en amont de la filtration sur sable afin de neutraliser le chlore libre résiduel issu de l'injection d'hypochlorite de sodium, cette étape étant indispensable pour protéger les membranes d'osmose inverse, très sensibles à l'oxydation par le chlore ; l'injection anticipée garantit un temps de contact suffisant et assure ainsi une déchloration complète avant les étapes sensibles du traitement.
- **Anti-incrustant** : L'anti-incrustant, ou anti-scalant, est injecté avant les filtres à cartouches afin de prévenir la formation de dépôts minéraux sur les membranes d'osmose inverse, ce traitement étant essentiel pour garantir la longévité et la performance optimale des membranes tout au long du processus de dessalement.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

b) Prétraitement physique



Figure IV. 13 : zone des filtres à sable et à anthracite de la SDEM de Béni Saf. [42]

La station dispose de deux zones de filtration :

- **Filtres à sable bicouche** (24 modules, 48 réservoirs) :

La filtration à la station de Beni Saf repose sur un système bicouche de filtres à sable de silice, constitué d'une couche inférieure de sable grossier servant de support et d'une couche supérieure de sable fin retenant les particules les plus fines en suspension ; organisée en deux trains identiques capables de traiter chacun 50 % du débit total, cette installation comprend 24 filtres répartis en 12 modules fonctionnant par paires, pour un débit nominal de 18 000 m³/h.

En amont, un mélangeur statique assure la dispersion homogène des produits chimiques et favorise la floculation, tandis que des manomètres placés à l'entrée et à la sortie de chaque train permettent de surveiller la perte de charge et d'optimiser le fonctionnement du système.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

Caractéristiques techniques des filtres à sable

Les filtres à sable de la station sont au nombre de 48 (24 par train), de type horizontal à fond bombé, fabriqués en acier carbone avec un revêtement intérieur en néoprène, mesurant 3,7 m de diamètre pour 11 m de longueur et conçus pour une pression de service de 6 bars.

Chaque module comprend un collecteur d'entrée équipé d'une vanne pneumatique et d'un débitmètre, ainsi qu'un raccordement à la ligne de drainage, tandis que le collecteur de sortie d'eau filtrée est relié à une ligne de rinçage, une entrée de saumure, une arrivée d'air et un turbidimètre.

La surveillance de la turbidité de l'eau filtrée est assurée séquentiellement par deux turbidimètres, un par train.



Figure IV. 14 : Débitmètre, 17 mars 2025.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

Caractéristiques du sable filtrant :

Le sable filtrant utilisé dans les filtres à sable de la station se compose d'un lit de 1 300 mm de hauteur, constitué d'une couche supérieure de sable fin de 1 000 mm d'épaisseur pour la filtration des particules les plus fines, reposant sur une couche support de sable grossier de 300mm

Le tableau suivant présente les caractéristiques de la couche filtrante :

Tableau IV. 2: les caractéristiques de la couche filtrante

Paramètre	Sable fin	Sable grossier
SiO ₂	>99,5 %	>99,5 %
Taille effective (mm)	0,9	2
Coefficient d'uniformité	1,4	1,4
Densité réelle (kg/m ³)	2 650	2 650
Densité apparente (kg/m ³)	1 600	1 600
Taille des grains (µm)	139	309

Procédé de filtration

L'eau de mer est acheminée vers les filtres à travers un collecteur supérieur, traverse le lit filtrant bicouche, puis est recueillie par le collecteur inférieur ; pendant la phase de filtration, seul le robinet d'entrée est ouvert, tandis qu'en phase de lavage, le collecteur inférieur sert d'entrée pour l'air ou la saumure et le collecteur supérieur devient la sortie dirigée vers le drainage.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

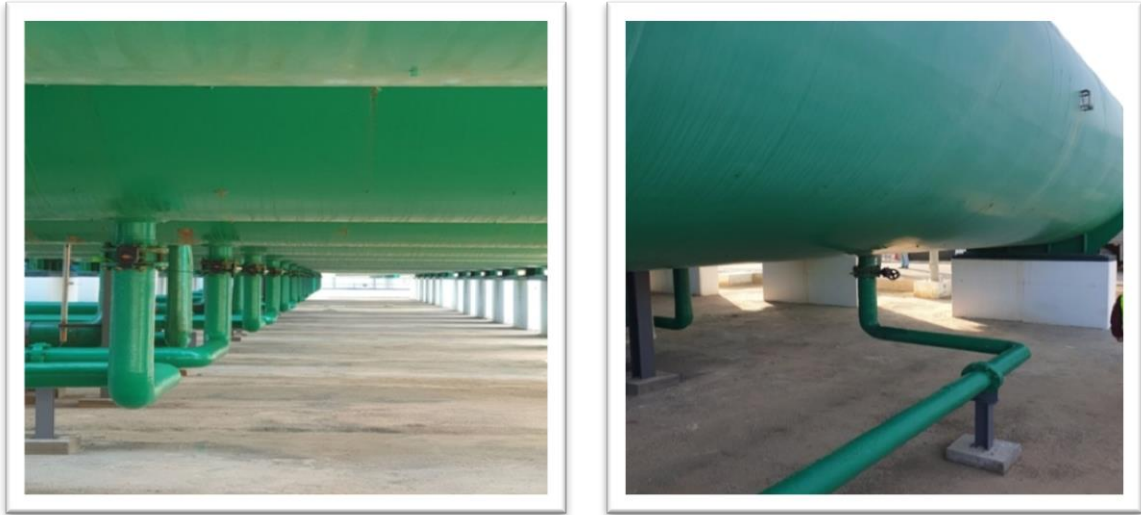


Figure IV. 15 : Les collecteurs des filtres à sable, 17 mars 2025.

- **Filtres à anthracite** (14 modules, 28 réservoirs) :

Les filtres à anthracite de la station, installés à l'extérieur du bâtiment de production au nord, se composent de 28 réservoirs horizontaux à fond bombé répartis en deux trains de 14 filtres (soit 7 modules de deux filtres chacun), conçus pour éliminer les composés organiques, les résidus cancérigènes ainsi que les agents responsables du goût et de l'odeur dans l'eau.

Fabriqués en acier carbone avec un revêtement intérieur en néoprène, ces filtres mesurent 3,7 m de diamètre pour 11 m de longueur et disposent d'une configuration technique identique à celle des filtres à sable (collecteurs, vannes, turbidimètres).

Chaque filtre contient un lit d'anthracite de 1 000 mm de hauteur, présentant une teneur en carbone supérieure à 90 %, une taille effective de 1,2 mm, un coefficient d'uniformité de 1,4, une densité réelle de 1 400 kg/m³, une densité apparente de 1 050 kg/m³ et une taille moyenne des grains de 186 µm (**Tableau IV.6.2.3**).

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL



Figure IV. 16 : échantillon d’anthracite

Le débit de traitement global atteint 17 996 m³/h, soit 643 m³/h par filtre, avec un débit porté à 692 m³/h par filtre en phase de lavage, l’ensemble étant alimenté par 11 pompes centrifuges horizontales (10 en fonctionnement et 1 en réserve).

Tableau IV. 3 : les caractéristiques de L’anthracite utilisé

Paramètre	Valeur
Teneur en carbone	>90 %
Taille effective (mm)	1,2
Coefficient d’uniformité	1,4
Densité réelle (kg/m ³)	1 400
Densité apparente (kg/m ³)	1 050
Taille des grains (µm)	186

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

- **Filtres à cartouches**

Après la filtration sur sable et anthracite, l'eau traverse des filtres à cartouches de précision, dernière barrière physique avant l'osmose inverse, qui retiennent les particules résiduelles supérieures à 5 microns et protègent ainsi efficacement les membranes contre le colmatage ; ces filtres, installés dans le bâtiment de production, sont répartis en deux lignes de dix filtres verticaux chacun (soit vingt au total), fabriqués en PRPV avec barrière isophthalique, mesurant 1,36 m de diamètre pour 4,285 m de hauteur et conçus pour une pression de service de 6 bars.

Chaque filtre contient 380 cartouches en polypropylène de type PP-5 (longueur 1 270 mm, diamètre extérieur 61 mm, surface filtrante 0,24 m², seuil de coupure 5 µm), l'eau entrant par le bas et traversant les cartouches avant d'être dirigée vers les groupes haute pression.



Figure IV. 17 : Filtres à cartouches [39]

L'encrassement est surveillé par la pression différentielle, et lorsque la perte de charge dépasse le seuil, les vannes d'entrée et de sortie sont fermées manuellement, les filtres vidangés, et les cartouches remplacées à l'aide d'un palan, garantissant ainsi une protection continue et optimale du procédé d'osmose inverse.

**CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE
DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL**



Figure IV. 18 : Des cartouches avant l'utilisation , 19 mars 2025.

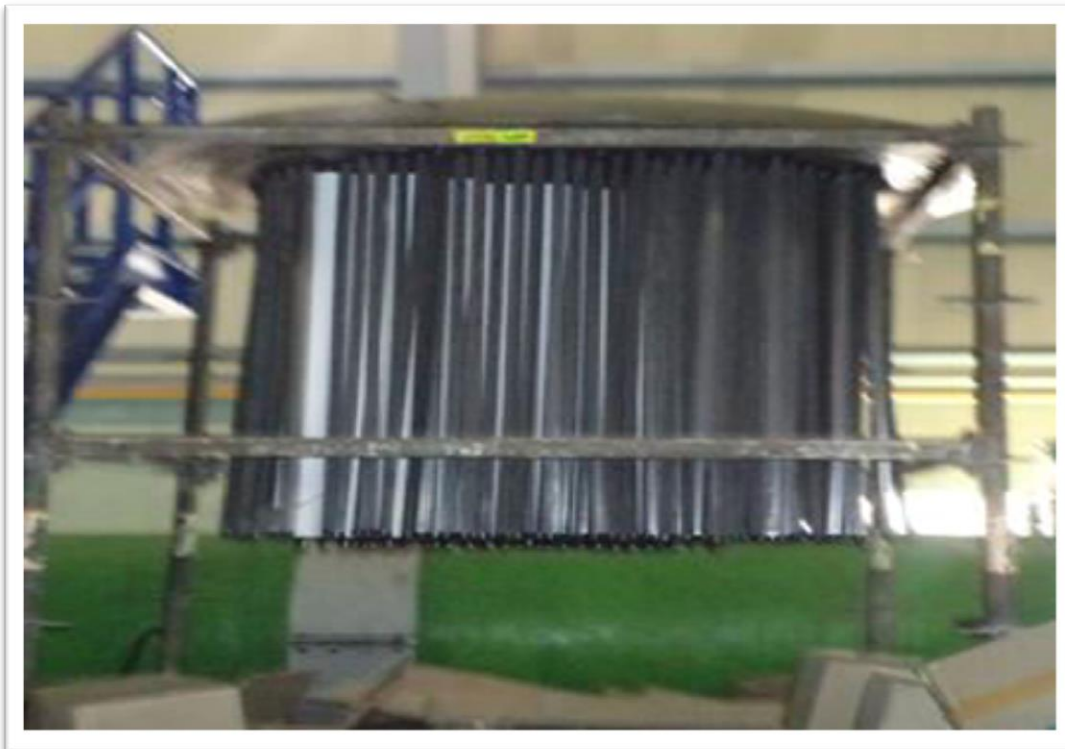


Figure IV. 19 : Les cartouches après utilisation, 19 mars 2025.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

IV.6.3-Osmose Inverse

IV.6.3.1-Principe général

Le système d'osmose inverse permet de dessaler l'eau de mer en la faisant passer à haute pression à travers des membranes semi-perméables. Le procédé se fait en une seule étape et en un seul passage.

Il se compose de 10 modules identiques, chacun contenant 246 tubes de pression répartis en deux blocs de six rangées parallèles. Ces tubes abritent les membranes où se produit la séparation entre l'eau douce (perméat) et la saumure (rejet).

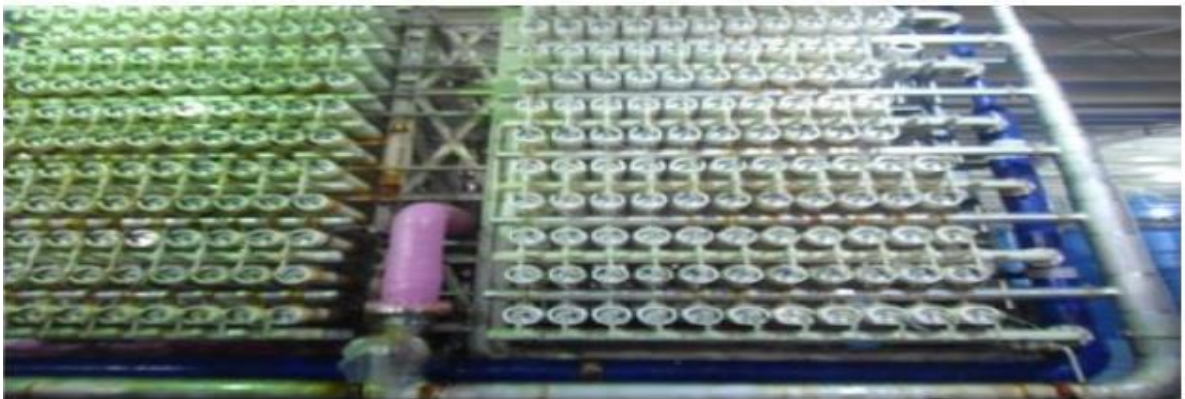


Figure IV. 20 : Les membranes d'osmose inverse, 19 mars 2025.

IV.6.3.2-Limites du système

Les limites physiques du système d'osmose inverse sont définies au niveau des modules :

- Tuyauterie d'arrivée d'eau de mer sous pression,
- Tuyauterie d'évacuation de la saumure sous pression,
- Tuyauterie de sortie de l'eau dessalée, en aval de la vanne de régulation du perméat.

Pour que l'eau de mer traverse les membranes, la pression appliquée doit être supérieure à la pression osmotique. Ainsi, l'eau de mer, plus concentrée en sels, est séparée en deux courants :

- Le perméat, eau dessalée avec une faible concentration en sels,
- La saumure, eau fortement salée issue du rejet.

IV.6.3.3-Description du système

Le système d'osmose inverse est installé dans le bâtiment de production et est divisé en trois sous-systèmes, chacun gérant un type de fluide spécifique. Chaque sous-système possède ses propres instruments de mesure et ses vannes.

a. Sous-système d'eau d'alimentation

- Ce sous-système comprend les collecteurs et les conduites qui amènent l'eau de mer pressurisée jusqu'aux tubes de pression.
- Avant d'atteindre les modules d'osmose, l'eau est mise sous pression par un système de pompage et de récupération d'énergie.
- Le collecteur d'entrée de chaque module est divisé en deux branches, alimentant chacun des deux blocs du châssis.
- L'eau de mer est distribuée à travers 24 tubes de pression connectés à un collecteur horizontal. Le collecteur supérieur de chaque bloc alimente uniquement 3 tubes.
- Chaque module comprend 246 tubes de pression actifs, avec 9 emplacements supplémentaires laissés en réserve par bloc.

b. Sous-système d'eau dessalée (perméat)

- Il regroupe les conduites qui transportent l'eau dessalée depuis les tubes de pression jusqu'aux lits de calcite.
- La structure du châssis est similaire à celle du circuit d'eau de mer, divisée en deux blocs contenant chacun 6 collecteurs horizontaux.
- Chaque collecteur reçoit l'eau de 24 tubes de pression, à l'exception des collecteurs supérieur et inférieur, qui en reçoivent 3.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

- La sortie du perméat de chaque tube se fait via une vanne trois voies raccordée au collecteur. Ces vannes permettent le prélèvement d'échantillons pour détecter d'éventuels défauts de membrane.
- Le collecteur final d'évacuation du perméat, en PRFV, est équipé :
 - D'un piquage pour échantillons manuels,
 - D'un transmetteur de pression avec alarme de surpression.

c. Sous-système de rejets (saumure)

- Ce sous-système collecte la saumure, eau non traitée n'ayant pas traversé les membranes, et la dirige vers les chambres de récupération d'énergie.
- Tout le circuit est conçu pour résister à la haute pression, la saumure conservant pratiquement la pression initiale de l'eau d'alimentation.
- La configuration en sortie est identique à celle du perméat : deux blocs, chacun composé de 6 collecteurs horizontaux raccordés à un collecteur vertical principal.
- Ce collecteur vertical s'élargit progressivement pour récupérer l'eau salée provenant des collecteurs horizontaux.
- Comme pour l'alimentation, chaque collecteur horizontal reçoit la saumure de 24 tubes de pression, sauf le supérieur qui en collecte seulement 3.
- On retrouve également 246 tubes actifs par module, avec 9 positions de réserve par bloc.

IV.6.4-Membranes

Les membranes utilisées dans la SDEM de Beni Saf sont de chez Hydranautics. Les membranes d'OI sont constituées de films de polyamide à enroulement en spirale avec une feuille de séparation entre deux membranes. Cette feuille se comporte comme un canal dans lequel circule l'eau d'alimentation/saumure qui alimente l'élément suivant de membrane à l'intérieur du tube de pression. Le modèle des membranes sélectionné est le SWC5 qui est approprié lorsque le courant d'eau d'alimentation est de l'eau de mer. Son pourcentage de rejet des sels est supérieur à 99,7%.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

IV.6.5-Système de pompage à l'osmose inverse et récupération d'énergie (ERI)

IV.6.5.1-Description générale

Le système de pompage et de récupération d'énergie a deux fonctions principales :

- Assurer le pompage de l'eau de mer filtrée vers les modules d'osmose inverse à la pression requise pour traverser les membranes.
- Récupérer l'énergie contenue dans la saumure rejetée, afin de réduire la consommation énergétique globale du procédé.

Ce pompage s'effectue par deux voies distinctes :

- Le débit correspondant à la production d'eau dessalée est pris en charge par les pompes haute pression.
- Le débit équivalent au rejet de saumure est pressurisé en utilisant la pression résiduelle de la saumure via les échangeurs de pression (SEP) et des pompes de recirculation.



Figure IV. 21 : Pompe de recirculation, 19 mars 2025.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

IV.6.5.2-Description détaillée

Installé à proximité des modules d'osmose inverse, à l'intérieur du bâtiment de production, le système de pompage et de récupération d'énergie reçoit l'eau de mer prétraitée. Il a pour mission de fournir, à l'entrée de chaque ligne d'osmose inverse :

- Le débit nécessaire d'eau de mer pour générer un débit de perméat de 833,3 m³/h par ligne (pour un total de dix lignes).
- La pression adéquate permettant à l'eau de traverser les membranes et d'atteindre, avec suffisamment d'énergie, les étapes postérieures jusqu'au stockage dans la cuve finale.



Figure IV. 22 : Chambres d'échange de pression, 16 mars 2025.

IV.6.5.3-Principe de fonctionnement

Pour atteindre la pression exigée par les membranes tout en optimisant le rendement énergétique, le flux d'eau de mer en entrée (à basse pression) est scindé en deux courants :

1. **Pompage direct via pompes haute pression**

Une partie du débit est dirigée vers les pompes haute pression.

- Il y a 10 pompes, une par ligne, plus une pompe de secours.
- Le débit de chaque pompe est contrôlé par une vanne de régulation associée à un débitmètre installé sur la ligne de perméat en sortie des modules d'osmose.

2. Récupération de pression via échangeurs ERI

L'autre partie du débit d'eau de mer est injectée dans les chambres d'échange de pression.

- Pour chaque ligne, le système comprend 22 échangeurs d'énergie identiques (de type ERI), montés en parallèle.
- Ces dispositifs permettent un transfert direct de pression de la saumure (rejetée par les membranes) vers l'eau de mer entrante, sans contact direct entre les deux fluides.

Le principe repose sur un mécanisme de déplacement positif :

- L'échangeur ERI de type PX-220 intègre un rotor cylindrique tournant à 1500 tours/min, muni de canaux longitudinaux.
- Lors de la rotation, la saumure sous pression transfère son énergie mécanique à l'eau de mer brute par l'intermédiaire de zones liquides isolées, agissant comme des "pistons virtuels".
- La saumure, après avoir cédé sa pression, est évacuée vers le collecteur de rejet à basse pression.

Ce système permet de réinjecter efficacement l'énergie hydraulique dans le processus, diminuant ainsi la consommation énergétique globale de l'installation.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL



Figure IV. 23 : La composition interne des ERI, 19 mars 2025.

IV.6.6-Post-traitement et reminéralisation

L'eau osmosée, très pure et agressive, doit être reminéralisée avant distribution pour la rendre potable et éviter la corrosion des réseaux.

a. Reminéralisation :

Après l'osmose inverse, l'eau dessalée, très pauvre en minéraux et donc agressive pour les réseaux, est soumise à une étape de post-traitement visant à rééquilibrer sa composition. Ce conditionnement s'effectue par passage à travers dix tours de calcite installées à l'extérieur du bâtiment de production.

Chacune de ces tours, constituée d'un bâti en béton équipé de buses de distribution à la base, contient un lit de calcite qui ajuste le pH et l'alcalinité de l'eau en y dissolvant du carbonate de calcium, tout en favorisant l'apport d'ions essentiels comme HCO_3^- , CO_3^{2-} , Ca^{2+} et Mg^{2+} . Dimensionnées pour traiter le débit de chaque ligne d'osmose inverse, ces tours assurent une redondance opérationnelle et garantissent un temps de contact d'au moins 10 minutes à une vitesse de passage de 15 m/h, avec une surface de filtration de 55 m².

L'eau dessalée est distribuée depuis les modules d'osmose inverse vers les tours de calcite via un réseau de collecteurs équipé de débitmètres et de vannes à piston, chaque tour disposant

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

également d'une conduite de drainage raccordée à un collecteur commun pour l'évacuation lors des opérations de maintenance. Ce système permet d'obtenir une eau conforme aux normes de potabilité, prête à être stockée puis distribuée.



Figure IV. 24 : La calcite, 23 mars 2025.

b. Correction du pH :

En raison de la fermeture de l'usine d'acide sulfurique de Ghazaouet, de la hausse importante de son coût d'importation (65 DA/kg contre 16 DA/kg précédemment) et des risques qu'il présente pour les équipements et la sécurité du personnel, la société Beni Saf Water Company a remplacé le système de dosage d'acide sulfurique par un dispositif de dosage de CO₂.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

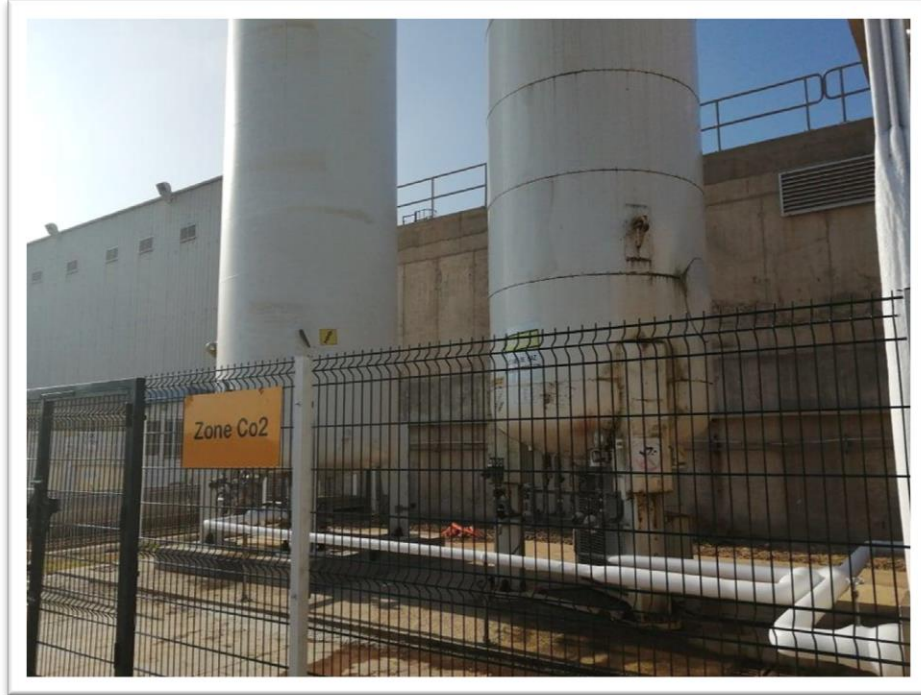


Figure IV. 25 : Zone de CO₂, 23 mars 2025.

Ce système permet de réguler précisément le pH de l'eau dessalée avant la reminéralisation, assurant ainsi une acidification contrôlée qui favorise la dissolution des minéraux et stabilise le pH autour de 8 à 8,5, condition essentielle pour garantir la qualité de l'eau potable.

Le CO₂ liquide est stocké dans une citerne verticale de 30 tonnes composée de deux récipients sous pression (un interne en acier inoxydable et un externe protégé contre la corrosion) et est équipé de vannes, soupapes de sécurité, régulateurs de pression, indicateurs de niveau et d'un évaporateur ambiant.

Le CO₂ est prélevé sous forme liquide, acheminé vers deux évaporateurs où il est transformé en gaz, puis dosé automatiquement et injecté dans l'eau dessalée en amont des lits de calcite à l'aide de mélangeurs statiques et d'une pompe de régulation, garantissant un mélange homogène et efficace grâce à l'effet turbulent.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL



Figure IV. 26 : Evaporateur de CO₂, 23 mars 2025.

c. Désinfection finale :

Pour garantir la sécurité microbiologique de l'eau distribuée, une injection d'hypochlorite de sodium (eau de Javel) est réalisée avant l'acheminement vers le réseau.

IV.6.6.3- Stockage et distribution de l'eau potable :

Après le post-traitement, l'eau traitée est stockée dans un réservoir tampon de 5 000 m³, garantissant un temps de contact suffisant pour assurer une désinfection efficace par injection d'hypochlorite de sodium avant son envoi vers le réseau. La distribution vers les wilayas d'Aïn Témouchent et d'Oran est assurée par un système de refoulement composé de 11 pompes (10 en fonctionnement, 1 en secours), chacune délivrant 833 m³/h pour un débit total de 8 334 m³/h sous une pression maximale de 30 bars.

La gestion automatisée du système permet d'ajuster en temps réel la production en fonction de la demande et d'assurer une qualité d'eau constante jusqu'aux points de distribution.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

IV.6.7-Equipement de nettoyage

IV.6.7.1-Nettoyage des filtres

Le lavage des filtres à sable et à anthracite est réalisé à l'aide d'eau de mer, grâce à une pompe de lavage dédiée et une pompe de secours.

L'intégration d'un groupe soufflant permet d'optimiser l'efficacité du lavage tout en réduisant considérablement la consommation d'eau. Ce groupe soufflant est équipé d'un filtre à air assurant la qualité de l'air injecté durant le processus.



Figure IV. 27 : bâtiment de lavage des filtres. [39]

IV.6.7.1-Nettoyage des membranes

Le nettoyage des membranes est une opération indispensable en cas d'encrassement significatif, généralement détecté par une chute de pression indiquée par les manomètres. Ce nettoyage est réalisé à l'aide d'une solution de réactif mélangée à de l'eau produite, préparée dans un réservoir dédié.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL

Cette solution est aspirée par deux pompes, passe par la ligne d'alimentation, traverse les filtres à cartouches, puis circule dans les tubes de pression avant d'être dirigée vers le réservoir de nettoyage.

Avant son rejet en mer, la solution usée est neutralisée à l'aide de soude. Enfin, les modules sont soigneusement rincés à l'eau dessalée. L'eau de rinçage, considérée comme saumure, est ensuite évacuée vers le système de drainage général de l'installation.

IV.6.8-Bâtiment de saumure

Les eaux de rejet, composées de la saumure issue du procédé d'osmose inverse ainsi que des eaux usées provenant des opérations de nettoyage, sont collectées et dirigées vers un point de rejet en mer.

L'évacuation se fait par une canalisation de diamètre DN 1800 mm, s'étendant sur 500 mètres à partir de la côte. Le site de déversement a été choisi sur la base d'une étude marine approfondie, visant à minimiser l'impact environnemental sur le milieu marin.



Figure IV. 28 : Bâtiment de saumure où l'eau de rejet de saumure. [39]

IV.6.9-Le laboratoire

Le laboratoire est doté des équipements nécessaires pour assurer la surveillance et le contrôle du procédé de dessalement.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL



Figure IV. 29 : Le laboratoire de la SDEM de Béni Saf. [39]

Des analyses quotidiennes y sont réalisées afin de garantir la qualité de l'eau produite et de répondre aux exigences du client.

Tableau IV. 4 : contrôle de qualité de l'eau commercialisée.

Analyse effectuée	Unité	Qualité garantie
Ph		8 à 8.5
Alcalinité	Ppm CaCO ₃	65
Dureté	Ppm CaCO ₃	50 à 65
Indice de Langelier		0 à 0.4
Chlore résiduel	Ppm	0.5

IV.6.10-Salle de contrôle

La salle de commande est équipée d'un système de contrôle numérique (DCS) de marque YOKOGAWA, permettant de superviser et de piloter l'ensemble des équipements de la station à distance.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL



Figure IV. 30 : la salle de contrôle de la SDEM de Béni Saf [39]

IV.6.11-Autres composants de la station

La station comprend également plusieurs infrastructures essentielles au bon fonctionnement de l'ensemble du système :

- Des salles électriques ;
- Des salles des automates ;
- Un système numérique de contrôle et de commande (SNCC) ;
- Une station électrique dédiée, conçue pour alimenter l'ensemble de la SDEM, avec deux lignes électriques de 220 000 kV ;
- Deux bâtiments administratifs en R+1 ;
- Un poste d'entrée à la station ;
- Un poste de sécurité ;
- Un poste de lutte contre les incendies ;
- Des ateliers de maintenance et de réparation mécanique, électrique et d'instrumentation.

CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION DE DESSALEMENT DE CHATT EL HILAL



Figure IV. 31 : Salle d'électricité de la SDEM de Béni Saf. [39]

IV.7-Conclusion

En conclusion, la station de dessalement de Chatt El Hilal constitue une infrastructure stratégique essentielle pour répondre aux besoins en eau potable de l'Ouest algérien. Grâce à l'utilisation de la technologie avancée de l'osmose inverse et à une organisation rigoureuse, elle assure une production fiable et de qualité. Malgré certains défis techniques et incidents ponctuels, la station joue un rôle clé dans le développement socio-économique de la région tout en intégrant des pratiques respectueuses de l'environnement. Les perspectives d'amélioration portent sur l'optimisation énergétique, la gestion des risques et l'extension des capacités pour accompagner la croissance future.

CHAPITRE V :
ÉTUDE DES CAS
DE
DÉFAILLANCES
DE LA STATION DE
DESSALEMENT DE
BÉNI SAF

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

Introduction :

Ce chapitre s'attache à une analyse approfondie des défaillances rencontrées au sein de la station de dessalement de Béni Saf, un maillon essentiel dans l'approvisionnement en eau de la région. La performance et la fiabilité de cette infrastructure sont primordiales pour garantir un accès continu à une eau de qualité. Nous débiterons par un diagnostic technique détaillé des dysfonctionnements, en identifiant les problèmes spécifiques liés à chaque étape du processus, depuis le captage de l'eau de mer jusqu'aux traitements finaux. Ensuite, nous mettrons en œuvre des outils d'analyse des causes racines, tels que le diagramme d'Ishikawa et la méthode des 5M, afin de remonter aux origines profondes de ces défaillances.

L'objectif est de ne pas se contenter d'identifier les symptômes, mais de comprendre les facteurs sous-jacents — qu'ils soient d'ordre matériel, humain, environnemental ou méthodologique — qui compromettent l'efficacité et la durabilité de la station. Enfin, nous évaluerons la qualité de l'eau traitée par rapport aux normes établies, afin de confirmer l'atteinte des objectifs de production et de sécurité sanitaire.

Cette démarche analytique est essentielle pour proposer des actions correctives et préventives ciblées, visant à optimiser le fonctionnement de la station et à assurer une production d'eau potable stable et fiable.

V.2- Diagnostic technique des défaillances de la station

V.2.1- Les défaillances liées au captage d'eau de mer

Le captage, première étape du processus, conditionne la qualité et la continuité de l'alimentation en eau brute. Il repose sur une prise d'eau immergée, équipée de grilles et de filtres, et sur des pompes d'aspiration adaptées pour transférer l'eau vers la station.

Principaux dysfonctionnements identifiés :

- **Colmatage des grilles et filtres**

Ce phénomène, dû à l'accumulation d'algues, de sédiments, de déchets flottants et de matière organique, limite le passage de l'eau et réduit le débit d'aspiration. Il impose

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

des opérations de nettoyage fréquentes, parfois manuelles, qui entraînent des arrêts partiels ou complets du captage.

- **Défaillances mécaniques des pompes d'aspiration :**

L'usure prématurée des roulements, la cavitation et la corrosion – accentuées par la salinité élevée – provoquent des pannes et des baisses de performance, compromettant la continuité de l'alimentation de la station.

- **Variabilité de la qualité de l'eau brute**

Les épisodes de tempête, de houle ou de prolifération d'algues augmentent la turbidité et la charge organique de l'eau, compliquant le travail des unités de traitement en aval.

- **Intrusion d'organismes marins**

Malgré la filtration primaire, certains petits organismes parviennent à franchir les grilles, ce qui peut endommager les équipements et exiger des interventions de maintenance.

- **Facteurs environnementaux**

La sédimentation excessive et les variations saisonnières modifient la configuration des fonds marins, rendant l'accès à l'eau plus difficile et nécessitant parfois des travaux de dragage.

Conséquences :

Les dysfonctionnements au niveau du captage, tels que le colmatage des filtres ou les pannes de pompes, entraînent une diminution du débit d'eau brute, ce qui peut provoquer une baisse de la production d'eau dessalée ou des arrêts temporaires de la station, tout en augmentant les coûts d'exploitation en raison des opérations de nettoyage plus fréquentes.

Par ailleurs, la dégradation de la qualité de l'eau brute, notamment la présence accrue d'algues et de micro-organismes, favorise le développement de biofilms dans les conduites et sur les membranes, ce qui réduit leur efficacité et leur longévité. Enfin, le rejet de saumure concentrée, s'il n'est pas suffisamment dilué, peut perturber l'équilibre des écosystèmes marins environnants.

V.2.2- Les pannes et dysfonctionnements de pompe haute pression

Les pompes haute pression (HP) assurent la pression nécessaire à l'osmose inverse. Elles sont dimensionnées pour fonctionner entre 60 et 70 bars et sont équipées de capteurs de pression, température et débit pour un suivi précis.

V.2.2.2- Analyse des causes de pannes (usure, cavitation, corrosion)

Les pompes haute pression de la station peuvent présenter divers dysfonctionnements d'origine mécanique, hydraulique ou liée à la surveillance.

- L'usure prématurée des roulements et les fuites de garniture résultent souvent d'un temps de fonctionnement excessif ou d'un défaut de lubrification, se manifestant par des fuites, des bruits ou des vibrations anormales.
- La cavitation, provoquée par la formation de bulles de vapeur lors d'une chute de pression à l'aspiration, survient généralement en cas de filtre colmaté, de niveau d'eau trop bas ou de désamorçage, ce qui conduit à l'érosion des turbines et à une perte de rendement.
- La corrosion interne, quant à elle, est favorisée par un pH instable ou l'absence d'inhibiteur de corrosion, fragilisant les pièces et pouvant entraîner des fuites ou des ruptures.
- Un déséquilibre hydraulique, causé par un défaut de régulation ou la dégradation d'une vanne ou d'un presseur, provoque un débit irrégulier entre les pompes ou les racks, ce qui surcharge les équipements restants et diminue le débit global.
- Un défaut de surveillance, lié à l'absence de capteurs ou à un contrôle-commande mal paramétré, retarde la détection des anomalies et peut aggraver les pannes, allant jusqu'à des arrêts graves du système.

V.2.2.3- Impacts sur la chaîne de production

Les pannes des pompes haute pression ont des conséquences directes et importantes sur la production d'eau dessalée :

- **Réduction ou arrêt du débit** : Une pompe défaillante réduit la pression d'alimentation des membranes, ce qui diminue le débit d'eau traitée ou provoque un arrêt complet du module concerné.
- **Augmentation de la consommation énergétique** : Les pompes en mauvais état nécessitent plus d'énergie pour maintenir les débits, ce qui augmente les coûts d'exploitation.
- **Risque de dommages aux membranes** : Les variations brutales de pression ou les coups de bélier dus à des arrêts/reprises non maîtrisés peuvent endommager les membranes, entraînant des coûts de remplacement élevés.
- **Interruption de la production** : Les pannes majeures peuvent provoquer des arrêts prolongés de la station, affectant l'approvisionnement en eau potable.

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

- **Coûts de maintenance élevés** : La réparation ou le remplacement des pompes, ainsi que les interventions liées aux conséquences des pannes (nettoyage chimique, remplacement de membranes), engendrent des coûts importants.

V.2.3- Les défaillances des systèmes de prétraitement

Le prétraitement, composé de filtres à sable, anthracite, cartouches et unités de dosage chimique, protège les membranes d'osmose inverse.

Types de défaillances :

V-2.3.1- Colmatage des filtres à sable et à cartouche

Le colmatage est une **défaillance récurrente** dans le prétraitement à Béni Saf, souvent causée par :

- Une **augmentation de la turbidité** de l'eau de mer brute (notamment après des tempêtes ou en période estivale),
- Un **lavage insuffisant ou inefficace** des filtres (retrolavage mal déclenché ou incomplet),
- Une **saturation des cartouches filtrantes**, sans remplacement dans les délais.

Conséquences

- Hausse du **SDI** (Silt Density Index) en sortie de prétraitement, parfois $> 3,0$, ce qui dépasse la norme admissible pour protéger les membranes,
- **Réduction du débit filtré** vers les racks,
- **Encrassement prématuré** des membranes et augmentation des fréquences de nettoyage chimique (CIP).

V-2.3.2- Pannes des unités de dosage de coagulant ou de neutralisant

Le prétraitement chimique utilise plusieurs produits : chlorure ferrique comme coagulant, acide sulfurique pour la neutralisation du pH, hypochlorite de sodium pour la désinfection, et métabisulfite pour neutraliser le chlore libre. Les unités de dosage de ces produits sont essentielles pour garantir la qualité de l'eau avant osmose inverse.

Défaillances observées à Béni Saf :

- Pompes doseuses grippées ou désamorçées,
- Blocage des injecteurs ou des tuyauteries,
- Défaut de régulation automatique : dosage insuffisant ou excessif non corrigé.

Conséquences

- Mauvaise agglomération des particules → efficacité du filtre réduite,
- PH non stabilisé → corrosion des conduites ou formation de tartre (LSI positif),
- Variabilité de la qualité d'eau en entrée OI.

V.2.3.3 – Manque de redondance et automatismes limités

Un autre point critique identifié à la station de Béni Saf est l'absence de redondance sur certains équipements critiques, notamment :

- Filtres à sable en série unique (pas de dérivation possible en cas de maintenance),
- Pompes doseuses sans doublement systématique,
- Commande manuelle nécessaire pour plusieurs basculements ou retrolavages.

Impacts constatés

- ✓ Temps d'arrêt prolongés en cas de défaillance d'un seul élément,
- ✓ Intervention humaine nécessaire, ce qui peut retarder la réponse face à une alarme,
- ✓ Automatisation insuffisante du système de protection en cascade.

V.2.4- Le colmatage des membranes d'osmose inverse

Malgré un prétraitement rigoureux, les membranes subissent divers types de colmatage, affectant leur efficacité et leur durée de vie.

V.2.4.1- L'encrassement biologique

Dans les systèmes de traitement d'eau, et particulièrement dans les installations de dessalement par osmose inverse comme la SDEM de Béni Saf, la stabilité des paramètres physico-chimiques est cruciale. Même de **légères variations** de ces paramètres, qui pourraient sembler insignifiantes de prime abord, peuvent en réalité avoir des conséquences majeures sur le développement de **biofilms** et l'accélération de l'**encrassement biologique** des membranes.

1. Développement Accru des Biofilms

Un **biofilm** est une communauté de microorganismes (bactéries, algues, champignons, etc.) qui adhèrent à une surface et s'enrobent dans une matrice polymérique extracellulaire (EPS). Ce "bouclier" protecteur leur confère une grande résistance aux désinfectants et aux contraintes environnementales.

De légères variations dans les conditions peuvent créer un environnement propice à leur prolifération :

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

- **Température** : Même une faible augmentation de la température (quelques degrés Celsius) de l'eau brute ou du système peut significativement accélérer les taux de croissance métabolique de nombreuses souches bactériennes. Des températures légèrement plus élevées favorisent une reproduction plus rapide et une production plus abondante d'EPS, entraînant une formation de biofilm plus dense et plus rapide.
- **Nutriments (DBO5, Carbone Organique Total - COT)** : Une légère augmentation des concentrations en nutriments organiques, même si elle reste dans les limites "acceptables" pour l'eau brute, peut fournir une source de nourriture supplémentaire inattendue pour les bactéries. Ces variations, souvent cycliques ou saisonnières, peuvent stimuler la croissance des populations bactériennes et la formation des biofilms sur les surfaces des membranes.
- **pH** : Le pH optimal pour la croissance de nombreux microorganismes se situe dans une plage neutre à légèrement alcaline. De légères déviations du pH d'un côté ou de l'autre peuvent perturber l'équilibre microbien et favoriser la croissance de certaines espèces plus résistantes ou opportunistes qui formeront des biofilms. Un pH fluctuant peut également affecter la charge de surface des membranes, rendant l'adhésion bactérienne plus facile.
- **Turbidité et Matières En Suspension (MES)** : Une légère augmentation des MES ou de la turbidité dans l'eau d'alimentation peut apporter davantage de "sites d'ancrage" physiques pour les bactéries ou des agrégats organiques qui serviront de niches protectrices pour le développement initial du biofilm. Ces particules peuvent également fournir des nutriments adsorbés.

2. Déséquilibres Physico-Chimiques et Encrassement Biologique

Les biofilms ne sont pas le seul problème. De légères variations peuvent aussi créer des conditions propices à d'autres formes d'encrassement qui sont souvent synergiques avec l'encrassement biologique :

- **Précipitation de sels (scaling)** : Si les paramètres de l'eau (température, pH, concentration en sels comme le carbonate de calcium ou le sulfate de baryum) s'écartent légèrement des seuils de saturation, même sans atteindre une précipitation massive, des micro-précipitations peuvent se former. Ces dépôts microscopiques créent des surfaces rugueuses et des sites d'adhésion idéaux pour les microorganismes, aggravant l'encrassement biologique.

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

- **Interaction biofilm-scaling** : Un biofilm peut modifier le micro-environnement à la surface de la membrane (par exemple, en changeant localement le pH ou en consommant des inhibiteurs d'entartrage), favorisant ainsi la précipitation de sels. Inversement, les dépôts de sels peuvent créer des rugosités qui facilitent l'ancrage et la croissance des biofilms.
- **Encrassement organique (fouling organique)** : Des variations dans la concentration de matière organique dissoute (provenant de la décomposition d'algues ou d'autres organismes, par exemple) peuvent entraîner une adsorption de ces composés sur la surface des membranes. Cette couche organique sert non seulement de nutriment pour les bactéries, mais elle peut aussi altérer les propriétés de surface de la membrane et augmenter sa propension à l'encrassement.
- **Changements dans la chimie des désinfectants** : Si la concentration ou l'efficacité des agents pré-désinfectants (chlore, UV) est légèrement altérée par ces variations, cela peut laisser passer un plus grand nombre de microorganismes vivants qui pourront coloniser le système en aval.

V.2.4.2 – Le colmatage organique et particulaire

Ce type de colmatage est lié à la présence résiduelle de matières organiques dissoutes (MO) ou de particules fines mal retenues par le prétraitement. Les causes fréquentes incluent :

- **Défaillances des filtres à cartouches ou sous-dosage de coagulant**,
- Intrusion de **matières humiques, colloïdes, huiles** ou microplastiques dans le flux d'alimentation,
- Turbidité élevée en période estivale (eaux chargées en phytoplancton).

Effets observés à Béni Saf

- **Colmatage lent mais progressif**, difficilement détectable sans surveillance fine du SDI,
- **Diminution du débit de perméat**, sans variation marquée de ΔP ,
- Baisse de rendement membranaire malgré des pressions nominales.

V.2.4.3- Échecs des lavages chimiques et durée de vie réduite

Le nettoyage chimique périodique des membranes (CIP) est crucial pour restaurer les performances. Toutefois, plusieurs limites ont été observées dans le cas de Béni Saf :

- **Fréquence inadaptée des lavages** (soit trop espacés, soit trop rapprochés),
- **Choix des produits non optimisé** (pH, concentration, temps de contact),
- Système de lavage **manquant d'automatisation**, dépendant d'opérateurs.

Conséquences

- **Restauration partielle des performances** après lavage (ΔP toujours élevé),
- **Dégradation irréversible de membranes**, nécessitant des remplacements prématurés,
- **Coûts accrus** de maintenance et d'achat de modules neufs.

V.2.5– Problèmes électriques et de contrôle-commande

Les défaillances liées au contrôle-commande (SCADA, automates, capteurs) représentent une source critique de dysfonctionnement dans la station de dessalement. La fiabilité de ces systèmes conditionne la sécurité de l'exploitation, la stabilité des paramètres de process, et la réactivité face aux dérives.

V.2.5.1– Pannes SCADA et pertes de télémétrie

Le système SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) assure le **pilotage en temps réel** de la station via une interface centrale. Lors de certaines pannes observées à Béni Saf, des incidents significatifs ont été constatés :

- **Perte temporaire de l'affichage en salle de contrôle,**
- **Absence d'alarme lors de variations critiques (pH, chlore, température),**
- **Enregistrement incomplet des données historiques, empêchant l'analyse a posteriori.**

Ces défauts ont été souvent liés à :

- **Défauts d'alimentation électrique (microcoupures, surtensions),**
- **Défaillances de communication entre serveurs et postes opérateurs,**
- **Absence de redondance (pas de serveur de secours opérationnel en 2024).**

Conséquences techniques

- Retards de réaction aux dérives critiques (ex. arrêt de pompe sans alerte),
- Impossibilité d'activer manuellement certains systèmes à distance,
- Risques accrus de colmatage ou de mauvaise qualité d'eau.

V.2.5.2 – Défauts de communication entre automates

Les automates programmables (API/PLC) gèrent localement chaque section (pompes, vannes, unités chimiques). À Béni Saf, des **pertes de communication intermittentes** ont été relevées entre :

- L'automate de prétraitement et celui de pompage HP,
- L'automate des dosages chimiques et le superviseur SCADA.

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

Problèmes diagnostiqués

- Câblage réseau vétuste (connecteurs RJ45 ou fibres dégradés),
- Interférences électromagnétiques non protégées dans les armoires,
- Adresses IP conflictuelles ou mal configurées.

Effets concrets

- **Non-exécution de séquences automatisées**, ex. rinçage ou CIP bloqué,
- **Faux états logiques** (vanne considérée ouverte alors qu'elle est fermée),
- **Risque de dysfonctionnement en cascade**, affectant la chaîne complète (ex. arrêt total des pompes HP par défaut d'information de niveau).

V.2.6- Problèmes liés au dosage chimique (NaOCl, antiscalant, acide, etc.)

Le bon fonctionnement du **système de dosage chimique** est essentiel pour garantir la qualité de l'eau, la protection des membranes et la stabilité du procédé d'osmose inverse. À Béni Saf, plusieurs incidents ont mis en évidence les conséquences d'un dosage incorrect, qu'il soit insuffisant, excessif ou irrégulier.

V.2.6.1- Dysfonctionnements des pompes doseuses

Les unités de dosage chimique peuvent présenter divers dysfonctionnements qui perturbent la régulation du traitement de l'eau, notamment ;

- Un débit de dosage instable, souvent lié à l'usure du diaphragme ou à des clapets grippés, entraînant une mauvaise maîtrise du pH ou du taux de chlore ;
- Une pompe désamorcée, généralement causée par la présence d'air dans la ligne ou un niveau de réactif trop bas, provoque l'interruption de l'injection et la dérive des paramètres de traitement ;
- Un encrassement des buses d'injection, dû à la précipitation chimique ou à la formation de biofilms, réduit l'efficacité de la distribution des réactifs et engendre une surconsommation de produits chimiques ;
- Une commande non exécutée, résultant d'un problème électrique ou d'un automate défaillant, bloque totalement l'injection et entraîne une dérive rapide du procédé, compromettant ainsi la qualité de l'eau produite.

Conséquences techniques observées

- Diminution du débit de production de 12 % sur la tranche concernée,
- Colmatage partiel sur trois modules de membranes spiralées,
- Nettoyage chimique (CIP) réalisé sous 24 h pour éviter l'endommagement permanent.

V.2.6.2- Erreurs de concentration ou de fréquence de dosage

Différentes erreurs de dosage chimique ont été constatées à la station de Béni Saf, chacune ayant des conséquences spécifiques sur le procédé de dessalement :

- Une surestimation de la concentration, comme un surdosage d'hypochlorite de sodium dépassant 1,5 ppm, accélère la dégradation des membranes.
- Un sous-dosage d'acide, qui maintient le pH en amont des membranes au-dessus de 8,5, augmente le risque d'entartrage calcaire.
- Une fréquence d'injection trop basse, notamment pour l'antiscalant, favorise la formation de dépôts et le colmatage des membranes.
- Une erreur humaine, telle qu'une confusion entre la soude et l'acide, provoque un choc de pH susceptible d'endommager gravement les équipements.

V.2.7- Cas de rejets anormaux ou non conformes

Les rejets issus de la station de dessalement, principalement la **saumure concentrée** et les eaux de nettoyage chimique, doivent respecter des **normes strictes environnementales** avant leur dispersion en mer. Toute défaillance dans la gestion de ces rejets peut avoir un impact écologique important sur l'écosystème marin local.

V.2.7.1-Épisodes de dépassement des seuils de rejet autorisés

Les rejets de saumure sont soumis à des normes environnementales strictes définissant des seuils limites pour la salinité, le pH, la concentration en métaux lourds et autres paramètres chimiques.

Observations

Des épisodes de dépassement de ces seuils ont été enregistrés, notamment lors de pics de production, de dysfonctionnements des systèmes de traitement ou de perturbations du réseau électrique.

Cause

- Mauvaise gestion des dosages chimiques.
- Défauts dans le contrôle en continu des paramètres de rejet.
- Incidents techniques conduisant à des rejets non conformes temporaires.

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

Impacts

- Non-conformité réglementaire pouvant entraîner des sanctions administratives.
- Dégradation de la qualité de l'eau marine aux abords de l'émissaire.
- Effets négatifs sur la biodiversité locale et la pêche artisanale.

Mesures correctives

- Renforcement des systèmes de surveillance et d'alerte.
- Optimisation des procédures d'exploitation et de maintenance.
- Mise en place de plans d'urgence pour limiter les rejets en cas d'incident.

V.2.8 – Synthèse des principales défaillances observées

Le tableau suivant résume les principales défaillances techniques identifiées à la station de dessalement de Chatt El Hillal – Béni Saf, avec les équipements concernés, les effets associés et les conséquences sur le fonctionnement.

Tableau V. 1: Synthèse des défaillances techniques observées dans la station de dessalement de Béni Saf

Poste	Équipement concerné	Défaillance identifiée	Conséquence principale
Captage	Grilles, pompes de prise d'eau	Encrassement par algues et déchets	Diminution du débit, usure prématurée
Prétraitement	Filtres à sable / anthracite	Colmatage des filtres	Perte d'efficacité, turbidité élevée
Osmose inverse	Membranes OI	Colmatage, biofouling, scaling	Baisse du débit et de la qualité du perméat
Système de pompage	Pompes haute pression	Surchauffe, vibration, désamorçage	Arrêt de production, risque d'endommagement
Injection chimique	Doseurs (acide, NaOCl, antiscalant)	Surdosage / sous-dosage	Corrosion, colmatage, qualité d'eau non conforme
Électricité / Automatisation	Armoires de contrôle, DCS	Dysfonctionnements de commande	Arrêts non planifiés, dérèglements de fonctionnement

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

Rejets	Émissaire de saumure	Débit ou concentration anormale de rejet	Impact environnemental sur le milieu marin
Post-traitement	Reminéralisation, CO ₂ , calcite	Réglage incorrect de la dureté	Dureté finale < norme OMS, risque de corrosion dans le réseau
Cas pratique 1	Pompes HP	Surcharge entraînant arrêt total	Interruption complète du traitement
Cas pratique 2	Réseau perméat	Contamination bactérienne	Eau non potable, mise en danger sanitaire
Cas pratique 3	Tuyauterie inox	Corrosion accélérée	Fuites, coût de remplacement élevé

V.3- Études de cas pratiques de défaillances critiques

Dans cette section, nous présentons trois cas concrets de défaillances majeures survenues à la station de dessalement de Béni Saf. Ces incidents permettent d'illustrer les effets cumulés de certaines dégradations techniques, ainsi que l'importance d'une maintenance préventive rigoureuse.

V.3.1- Étude de cas n°1 : Arrêt total du système par surcharge des pompes

Les débits élevés et constants (Q entrée = 18 000 m³/h, Q sortie perméat = 8 460 m³/h, Q saumure = 9 540 m³/h) indiquent un fonctionnement proche de la capacité maximale des pompes, avec une température d'aspiration stable autour de 21°C, un pH d'environ 8,66, une conductivité de 55 000 µS/cm et une turbidité stable à 1,06 NTU, sans pics anormaux.

Toutefois, cette stabilité masque un fonctionnement prolongé à haut régime, ce qui peut fatiguer les pompes et, en cas d'augmentation de la demande ou de colmatage partiel, entraîner une surcharge dépassant leur capacité et provoquant un arrêt automatique.

Il est donc crucial d'assurer une surveillance rigoureuse des débits et une maintenance préventive pour éviter un arrêt total du système par surcharge dans ces conditions de fonctionnement à pleine capacité.

V.3.2- Étude de cas n°2 : Contamination bactérienne du réseau de perméat

Analyse des données

- pH du perméat : Très stable, entre 6,40 et 6,44.
- Conductivité du perméat : Entre 809 et 868 $\mu\text{S}/\text{cm}$, sans variation brutale.
- Turbidité : Stable à 1,06 NTU (mais valeur constante suspecte, possible défaillance du capteur).

Interprétation

- Aucune indication directe de contamination bactérienne dans les paramètres physico-chimiques fournis.
- Limite des données : L'absence d'analyses microbiologiques (coliformes, germes totaux) ne permet pas de conclure avec certitude.
- Risque : Si la désinfection est insuffisante ou si une stagnation se produit dans le réseau, une contamination bactérienne pourrait survenir sans être détectée par ces seuls paramètres.

Conclusion : Il est impératif d'ajouter un suivi microbiologique régulier pour détecter toute contamination bactérienne du perméat.

V-3.3 Étude de cas n°3 : Corrosion accélérée des tubes en acier inoxydable

Analyse des données

- Conductivité élevée dans tout le réseau (entrée saumure $\sim 96\,700\ \mu\text{S}/\text{cm}$, sortie saumure $\sim 93\,800\ \mu\text{S}/\text{cm}$).
- pH du perméat : Légèrement acide ($\sim 6,4$).
- Température : Stable autour de 21°C .

Interprétation

L'interprétation met en évidence deux facteurs aggravants : une conductivité élevée, caractéristique d'un environnement très agressif pour l'acier inoxydable, notamment en présence de chlorures issus de l'eau de mer, et un pH acide du perméat, qui favorise l'accélération de la corrosion lorsque la couche passive de l'inox est compromise.

Conséquences

Les conséquences incluent un risque de fuite, une contamination du perméat ainsi qu'une défaillance mécanique des tubes.

La figure ci-dessous présente une conduite d'osmose inverse (OI) affectée par une corrosion localisée. Ce phénomène, visible sur la paroi externe, est typique des effets combinés d'un pH légèrement acide et d'un défaut de neutralisation chimique en sortie de membrane.



Figure V. 1: Corrosion localisée sur une conduite d'osmose inverse (OI), 26 mars 2025.

V.4- Utilisation des outils fondamentaux de l'analyse des causes racines (RCA) pour l'identification des défaillances.

L'identification et la résolution durable des dysfonctionnements nécessitent une approche structurée et méthodique. Pour remonter aux origines profondes des problèmes, l'**Analyse des Causes Racines** (Root Cause Analysis - RCA) s'appuie sur une panoplie d'outils complémentaires. Parmi eux, le **diagramme d'Ishikawa**, également connu sous le nom de diagramme en arêtes de poisson, se distingue par sa capacité à visualiser et à catégoriser les multiples causes potentielles d'un problème. En s'appuyant sur la méthode des **5M (Main-d'œuvre, Milieu, Matériel, Méthode, Matière)**, cet outil offre un cadre exhaustif pour explorer toutes les facettes d'une défaillance. Complétée par une analyse détaillée de chaque catégorie et l'**arbre des causes** qui reconstitue la séquence des événements, cette

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

combinaison d'outils permet d'aller au-delà des symptômes pour cibler les véritables facteurs critiques et élaborer des actions correctives efficaces et pérennes.

V.4.1- Utilisation du diagramme d'Ishikawa (causes multiples)

La construction du diagramme commence par l'inscription de l'effet (le problème ou la défaillance) à l'extrémité droite de la "tête du poisson". Ensuite, les causes potentielles sont catégorisées le long des "arêtes" principales qui se ramifient de l'axe central. La **méthode des 5M** est la plus couramment utilisée pour définir ces catégories :

- **Main-d'œuvre** : Concerne les facteurs humains tels que le manque de formation, les erreurs de manipulation, la fatigue, le non-respect des procédures, ou l'absence de compétences adéquates.
- **Milieu** : Fait référence à l'environnement dans lequel le problème se manifeste. Cela peut inclure des conditions environnementales (température, humidité, poussière), l'organisation de l'espace de travail, ou des facteurs externes imprévus.
- **Matériel** : Désigne l'équipement, les machines, les outils ou les infrastructures impliqués dans la défaillance. Cela peut concerner des pannes d'équipement, des dysfonctionnements, une maintenance insuffisante ou un matériel inadapté.
- **Méthode** : Se rapporte aux procédures, aux processus de travail, aux instructions opérationnelles, ou à l'absence de normes établies. Des méthodes de travail inefficaces, obsolètes ou mal appliquées peuvent être des causes profondes.
- **Matière** : Englobe les matières premières, les consommables, les composants ou les produits semi-finis utilisés. Des matières de mauvaise qualité, des spécifications incorrectes ou des problèmes de stockage peuvent entraîner des défaillances.

Pour chaque catégorie, les causes spécifiques sont ensuite ajoutées sous forme de branches secondaires et tertiaires, permettant une **analyse de plus en plus détaillée**. Cet outil favorise une approche collaborative, encourageant le brainstorming et la visualisation des interconnexions entre les différentes causes, ce qui facilite grandement l'orientation de l'analyse vers les véritables causes racines.

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

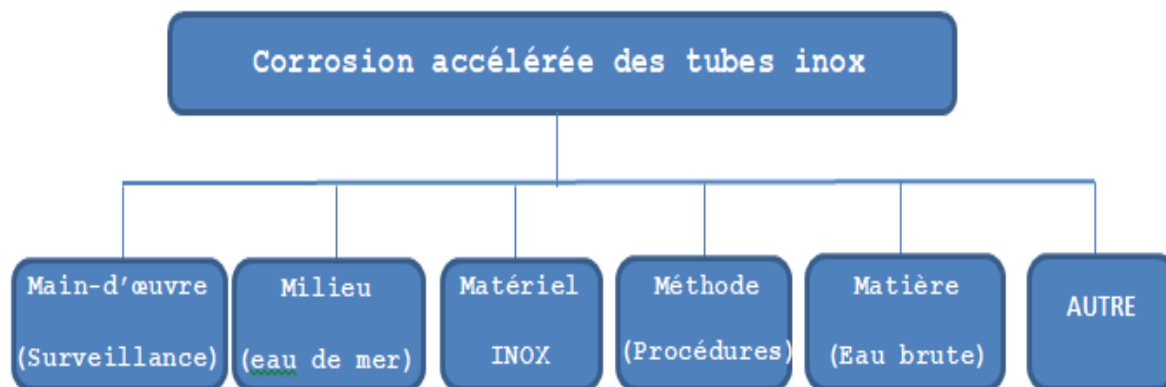


Figure V. 2: Diagramme d'Ishikawa spécifique à la corrosion des tubes en inox la SDEM de Béni Saf.

V.4.2- Analyse 5M Détaillée

Pour compléter l'analyse des causes racines, au-delà de la structuration visuelle offerte par le diagramme d'Ishikawa, il est essentiel de procéder à une **analyse approfondie de chaque catégorie des 5M**. Cette démarche permet d'identifier les **causes profondes** et spécifiques qui contribuent aux défaillances observées. Le **Tableau V. 1** présente une compilation d'exemples de causes racines identifiées dans le cadre de notre étude, classées selon les cinq catégories clés : Main-d'œuvre, Méthode, Matériel, Milieu, et Matière. Cette approche structurée garantit une exploration exhaustive de tous les facteurs potentiels influençant la performance du système

Tableau V. 2: Exemples de causes racines identifiées selon la méthode des 5M.

5M	Exemples de causes racines dans vos données
Main-d'œuvre	<ul style="list-style-type: none"> • Manque de formation spécifique sur la maintenance préventive et les opérations de nettoyage des membranes • Erreurs de manipulation lors des lavages chimiques ou des réglages des équipements • Absence ou insuffisance de suivi microbiologique et de contrôle qualité
Méthode	<ul style="list-style-type: none"> • Procédures opérationnelles incomplètes ou non respectées • Mauvaise gestion des paramètres critiques (pH, température, dosage chimique) • Défaut dans les protocoles de prétraitement de l'eau (coagulation, filtration)

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

	<ul style="list-style-type: none"> • Absence de planification pour la maintenance préventive et corrective
Matériel	<ul style="list-style-type: none"> • Pompes et équipements fonctionnant en limite ou au-delà de leur capacité nominale • Membranes sensibles à l'encrassement, colmatage ou dégradation prématurée • Défaillance ou imprécision des capteurs (turbidité, pression, conductivité) • Usure ou panne des systèmes de dosage chimique et des filtres
Milieu	<ul style="list-style-type: none"> • Environnement agressif (eau de mer très salée, présence de chlorures, températures élevées) • Conditions de travail difficiles affectant la fiabilité des équipements • Absence d'un environnement contrôlé pour le stockage des produits chimiques et des pièces de rechange
Matière	<ul style="list-style-type: none"> • Eau brute avec forte salinité, présence de matières en suspension (MES), contaminants organiques (DBO5), fluor, métaux lourds en traces • Variabilité de la qualité de l'eau d'alimentation impactant les performances du procédé • Contaminants non détectés ou mal traités pouvant provoquer corrosion ou colmatage

V.4.3- Identification des points critiques par arbre des causes

L'**arbre des causes** est une méthode d'analyse séquentielle et graphique qui permet de **reconstituer la chaîne des événements et des conditions** ayant conduit à une défaillance. À l'inverse du diagramme d'Ishikawa qui identifie de multiples causes possibles, l'arbre des causes vise à **décomposer une défaillance spécifique** en remontant étape par étape les liens de causalité jusqu'aux origines les plus fondamentales.

Cette approche consiste à partir du fait générateur (la défaillance majeure) et à se poser la question "Qu'est-ce qui a été nécessaire pour que cela se produise ?". Chaque réponse conduit à une nouvelle cause, qui à son tour est analysée de la même manière, créant ainsi une structure arborescente.

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

Exemple Détaillé :

- **Arrêt total du système** (Défaillance majeure)
 - → **Surcharge des pompes** (Cause directe de l'arrêt)
 - → **Obstruction des filtres** (Cause de la surcharge)
 - → **Défaut de nettoyage périodique des filtres** (Cause de l'obstruction)
 - → **Absence de procédure claire pour le nettoyage des filtres** (Failles organisationnelles)
 - → **Manque de formation du personnel sur les procédures de nettoyage** (Cause racine humaine/compétence)

Cet outil est particulièrement efficace pour :

- Mettre en évidence les **liens de causalité directs et indirects** entre les événements.
- Identifier les **failles organisationnelles, techniques ou humaines** qui n'apparaissent pas toujours au premier abord.
- Déterminer les **points critiques d'intervention** où une action corrective aura le plus grand impact pour prévenir de futures occurrences de la défaillance.

En combinant ces trois outils – le **diagramme d'Ishikawa** pour l'exhaustivité des causes potentielles, l'**analyse 5M** pour une structuration rigoureuse, et l'**arbre des causes** pour la traçabilité des enchaînements – il est possible de mener une **RCA approfondie et efficace**, menant à des actions correctives véritablement durables.

V.5- Impacts des défaillances sur la production

Les défaillances au sein d'un système de production d'eau, tel que la SDEM de Béni Saf, ne sont pas de simples incidents isolés. Elles engendrent une cascade de conséquences négatives qui affectent directement l'efficacité opérationnelle, la qualité du produit final et la viabilité économique de l'installation. Comprendre ces impacts est crucial pour justifier la mise en place de mesures correctives et préventives robustes.

V.5.1- Réduction de débit de production

L'une des conséquences les plus immédiates et critiques des défaillances est la **baisse significative du débit d'eau produite**. Lorsque des composants essentiels du système subissent des dysfonctionnements, la capacité globale de production est directement compromise. Par exemple :

- **Arrêt des pompes** : Une pompe défaillante, qu'il s'agisse de la pompe d'alimentation en eau brute, des pompes haute pression des membranes, ou des pompes de transfert, peut entraîner un arrêt partiel ou total du processus de filtration. Cela se traduit instantanément par une diminution drastique du volume d'eau traitée disponible.
- **Encrassement (fouling) et endommagement des membranes** : Les membranes d'osmose inverse, cœur du processus de dessalement, sont particulièrement sensibles à l'encrassement (dépôt de particules, microorganismes) ou aux dommages physiques. Un encrassement réduit leur perméabilité, diminuant ainsi le flux de perméat (eau produite) et augmentant la pression nécessaire pour maintenir un certain débit. Des dommages irréversibles peuvent même nécessiter leur mise hors service, réduisant la surface de filtration active.

Ces réductions de débit ont des répercussions directes sur l'**approvisionnement en eau potable** conforme aux besoins, pouvant provoquer des pénuries temporaires, perturber la gestion des ressources en eau et compromettre la satisfaction des consommateurs.

V.5.2-Détérioration de la qualité de l'eau produite

Au-delà de la quantité, les défaillances peuvent gravement altérer la **qualité de l'eau produite**, la rendant potentiellement impropre à la consommation ou à l'usage prévu, et nécessitant des interventions correctives coûteuses. Les problèmes courants incluent :

- **Contamination bactérienne** : Des ruptures d'intégrité du système, des défauts dans les processus de désinfection ou un biofilm excessif dans les canalisations peuvent introduire des bactéries ou autres microorganismes pathogènes dans l'eau traitée. Cela rend l'eau non conforme aux normes sanitaires et un risque direct pour la santé publique.
- **Corrosion et relargage de substances** : La corrosion des matériaux, comme les tubes en inox mentionnés précédemment, peut entraîner le relargage de métaux lourds ou

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

d'autres composés indésirables dans l'eau. Ces substances altèrent non seulement la pureté de l'eau mais peuvent aussi être toxiques à certaines concentrations.

- **Augmentation de la turbidité ou de la salinité :** Des problèmes au niveau des pré-traitements (filtres défaillants) ou des dommages aux membranes peuvent laisser passer davantage de Matières En Suspension (MES) ou de sels dissous, augmentant la turbidité ou la salinité de l'eau produite au-delà des limites acceptables.

Ces altérations rendent l'eau impropre à la consommation humaine, exposant à des risques sanitaires et nécessitant la mise en place de traitements complémentaires coûteux et complexes pour garantir la potabilité.

V.5.3- Augmentation des coûts d'exploitation et d'entretien

Les défaillances provoquent une hausse notable des coûts opérationnels, notamment par :

- Le remplacement prématuré des membranes, souvent onéreux, dû à leur détérioration accélérée par l'encrassement ou la corrosion ;
- L'augmentation de la fréquence des lavages chimiques nécessaires pour restaurer la performance des membranes, ce qui engendre une consommation accrue de produits chimiques et une interruption plus fréquente de la production ;
- La mobilisation supplémentaire de main-d'œuvre qualifiée pour effectuer des interventions manuelles, des réparations d'urgence et un suivi renforcé, augmentant ainsi les charges salariales et les risques d'erreur humaine.

Ces impacts combinés compromettent la fiabilité, la rentabilité et la durabilité de la station de dessalement, soulignant l'importance d'une maintenance rigoureuse et d'une gestion proactive des risques.

V.6-Évaluation de la qualité de l'eau produite

V.6.1- Définition et principe de mesure des paramètres de qualité

Avant d'entamer l'étude, nous définissons brièvement les paramètres utilisés dans les analyses d'eau, afin de mieux comprendre leur importance et leur méthode de mesure.

- **PH**

Le PH représente la concentration d'ions hydrogène dans l'eau, déterminant ainsi son acidité ou sa basicité. Il interagit avec divers paramètres de qualité, tels que la dureté, l'alcalinité, la turbidité et la conductivité, influençant ainsi les réactions chimiques complexes au sein du système aquatique. En raison de son rôle crucial dans l'équilibre physico-chimique de l'eau et la qualité de l'eau produite, son suivi rigoureux est indispensable à chaque étape du processus de dessalement.



Figure V. 3: pH mètre VWR [14]

Principe

La mesure du potentiel chimique hydrogène (PH) consiste à immerger une électrode de PH, reliée à un PH-mètre, dans un bécher contenant l'eau à analyser. À la station de dessalement de Chatt El Hillal, le PH est mesuré à l'aide d'un pH-mètre de marque VWR.

- **Température**

La température joue un rôle très important dans le traitement des eaux. Sa variation peut affecter les caractéristiques physico-chimiques de l'eau.

Principe

La température est mesurée au même temps que le pH par l'utilisation de l'appareil pH mètre VWR du laboratoire de la station de dessalement. Les valeurs obtenues sont exprimées en degrés Celsius (°C).

- **La conductivité**

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant électrique. Elle reflète le degré de minéralisation de l'eau, car la plupart des substances dissoutes s'y trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. Plus l'eau contient d'ions, plus sa conductivité est élevée. Ce paramètre est directement influencé par la température. Elle s'exprime en microsiemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Principe

Au niveau de laboratoire de la station, la conductivité électrique est mesurée par un conductimètre de marque VWA EC300 (fig.V.4). Ainsi, aux niveaux des points de prélèvement, il y a des conductimètres installés sur site qui mesurent directement la conductivité électrique.



Figure V. 4: Conductimètre VWA EC 300 [14].

- **solides dissous totaux (TDS)**

Les solides dans l'eau se trouvent soit en solution ou en suspension, et se distinguent par le passage de l'échantillon de l'eau à travers un filtre de fibres de verre. Par définition, les matières en suspension sont retenues sur le dessus du filtre, et les solides dissous passent à travers le filtre avec de l'eau. Lorsque la partie filtrée de l'échantillon d'eau est placée dans une coupelle, puis évaporé, les solides dissous dans l'eau restent comme résidu dans la capsule d'évaporation. Cette matière est appelée matières totales dissoutes ou TDS.

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

Principe

La conductivité est un paramètre directement lié à la minéralisation de l'eau, elle-même corrélée au TDS (total des solides dissous) et à la salinité. Une conductivité élevée peut entraîner, selon le cas, un goût salé ainsi qu'une accélération de la corrosion ou la formation de dépôts dans les canalisations.

La relation entre le TDS et la conductivité à 25 °C s'exprime par la formule suivante :

$$\text{TDS} = k \times \text{Conductivité } (\mu\text{S/cm})$$

Où le coefficient K dépend du type d'eau :

- K=0,55 pour le perméat,
 - K=0,70 pour l'eau de mer,
 - K=0,75 pour le concentrât.
- **La turbidité**

La turbidité renseigne sur la teneur en matières colloïdales d'origine organique ou minérale, influençant la transparence de l'eau. Elle s'exprime en unités de turbidité néphélométrique (Nephelometric Turbidity Unit, NTU).



Figure V. 5: Turbidimètre TURB 550 IR [14].

Principe :

La mesure de la lumière diffusée et de la lumière transmise permet de détecter les matières en suspension non dissoutes. Cette analyse est réalisée à l'aide d'un turbidimètre modèle TURB 550IR (fig.V.6). La turbidité est mesurée au laboratoire de la station.

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

• Standard Density Index(SDI)

Le **pouvoir colmatant d'un liquide**, ou **indice de colmatage**, plus connu sous l'abréviation **SDI (Silt Density Index)**, est l'un des indicateurs les plus couramment utilisés dans le domaine de la **filtration membranaire**. Il permet d'évaluer la tendance d'une eau à obstruer les membranes, en particulier dans les procédés d'osmose inverse.

Principe

Le test SDI consiste à mesurer le temps nécessaire pour filtrer un volume d'eau donné à travers une membrane filtrante standard (diamètre 47 mm, pores de 0,45 µm), sous une pression constante de 2,1 bars. En enregistrant la variation du temps de filtration sur une durée de 15 minutes, on peut évaluer l'encrassement progressif de la membrane causé par les particules colloïdales en suspension.

Mode de calcul

Le pouvoir encrassant P(%) est calculé à partir de la formule suivante :

$$P(\%) = 100 \times (1 - t_0/t)$$

Où :

- t₀ est le temps initial nécessaire pour filtrer un volume donné (en secondes),
- t est le temps mesuré à un instant donné (5, 10 ou 15 minutes).

Le calcul se fait généralement avec t=t₁₅ (temps mesuré à 15 minutes).

- Si P > 80% avec t = t₁₅, refaire le calcul avec t = t₁₀.
- Si P > 80% avec t=t₁₀, refaire le calcul avec t = t₅.

L'indice de colmatage (IC) est ensuite calculé par :

$$IC = P(\%) / T$$

Où :

T= est la durée totale de mesure (5, 10 ou 15 minutes selon le cas).

Valeurs repères pour l'interprétation du SDI :

CI (SDI)	Interprétation	Action recommandée
0 à 3	Eau non colmatante	Utilisation directe sans traitement
3 à 6	Eau peu colmatante	Nécessite un traitement physique (préfiltres)
6 à 20	Eau très colmatante	Traitement d'eau plus poussé obligatoire

- **Ion calcium (Ca²⁺)**

Le **calcium** est un élément essentiel, dont **environ 99 %** se trouve dans le squelette humain. Dans le contexte de la qualité de l'eau, le calcium est l'un des principaux contributeurs à la **dureté**. C'est un métal **alcalino-terreux** très répandu dans la nature, notamment dans les roches calcaires où il est présent sous forme de **carbonates**. Les sels de calcium sont couramment retrouvés dans presque toutes les **eaux naturelles**.

La concentration de calcium dans l'eau peut être exprimée de deux manières :

- **Concentration en calcium ionique (Ca²⁺)** : $[Ca^{2+}] = V \times 8,016$ (en mg/l)
- **Concentration en équivalent carbonate de calcium (CaCO₃)** :
 $[CaCO_3] = V \times 20,04$ (en mg/l)

Où **V** est le volume de réactif utilisé lors du titrage.

Remarque : Le calcium est souvent analysé en parallèle avec le magnésium (Mg²⁺), car tous deux constituent la **dureté totale (TH)** de l'eau.

La relation utilisée pour déterminer le magnésium est la suivante :

$$TH \text{ (mg/l)} = [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] \Rightarrow [Mg^{2+}] = TH - [Ca^{2+}]$$

- **la Dureté Total (TH)**

Le titre hydrotimétrique (TH) permet de mesurer la concentration des ions alcalino-terreux, principalement le calcium (Ca²⁺) et le magnésium (Mg²⁺), responsables de la dureté de l'eau. Ainsi, le TH quantifie cette propriété qualitative qu'est la dureté de l'eau.

Principe

Le dosage s'effectue en milieu neutre, à un pH proche de 6,7 à 7. Une solution contenant les ions à doser est traitée par une solution titrante de nitrate d'argent (AgNO₃) sur un volume d'échantillon connu, en présence de chromate de potassium (K₂CrO₄), qui sert d'indicateur coloré.

En premier lieu l'ion d'argent réagit avec l'ion chlorure pour former le précipité blanc << AgCl », ensuite ion argent réagit avec l'ion CrO₄²⁻ (chromate) pour former le précipité rouge brique Ag₂CrO₄ qui indique la fin de dosage.

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

Calcul simplifié

La concentration en chlorure (exprimée en mg/L) est calculée à partir du volume VV (en mL) de nitrate d'argent utilisé, corrigé par un facteur de 0,2 mL (volume blanc) :

- En mg/L de chlorure :

$$\text{Concentration}=(V-0,2) \times 7,0906$$

- En mg/L de chlorure exprimé en équivalent CaCO_3 :

$$\text{Concentration}=(V-0,2) \times 10$$

- **Titre alcalimétrique complet (TAC)**

Le TAC est une mesure de l'alcalinité totale de l'eau, déterminée par la concentration en hydroxydes, carbonates et bicarbonates.

Principe

Les ions alcalino-terreux présents dans l'eau réagissent avec le sel disodique de l'acide éthylène diaminotétracétique, formant un complexe de type chélate. La disparition des dernières traces d'éléments libres est mise en évidence par le changement de couleur d'un indicateur spécifique.

Calcul simplifié

La dureté de l'eau, exprimée en mg/L de CaCO_3 , est obtenue par la formule : $\text{TH (mg/L CaCO}_3) = V \times 20$.

- **Indice de Langelier (LSI)**

L'indice de Langelier, ou indice de saturation, est une méthode simple et couramment utilisée pour évaluer le potentiel corrosif ou incrustant d'une eau vis-à-vis du carbonate de calcium. Cet indice permet de déterminer si l'eau est susceptible de dissoudre ou de déposer du calcaire.

- **Si l'indice est négatif**, l'eau est dite agressive : elle a tendance à dissoudre le carbonate de calcium et peut attaquer les matériaux en contact, provoquant corrosion ou dégradation des installations.

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

- Si l'indice est positif, l'eau est dite calcifiante : elle favorise la formation de dépôts de carbonate de calcium (entartrage).
- Si l'indice est nul ou proche de zéro, l'eau est en équilibre calcocarbonique, c'est-à-dire stable, sans tendance notable à corroder ou à s'entartrer.

Principe

L'indice de Langelier est un outil efficace pour évaluer l'équilibre chimique de l'eau et déterminer si elle est corrosive ou susceptible de provoquer des dépôts calcaires (incrustante).

Si $IL = 0$, eau en équilibre chimique,

Si $IL < 0$, eau ayant tendance à être corrosive,

Si $IL > 0$, eau ayant tendance à être incrustante.

Le résultat du calcul de l'indice de Langelier devra se situer entre $\pm 0,5$.

V.6.2- Résultats des analyses physico-chimiques et interprétation

Les données d'exploitation analysées couvrent une période de 24 semaines consécutives, réparties entre janvier et juin 2024.

V.6.2.1-Température

Tableau V. 3: La température d'eau brute et d'eau filtrée.

Température (C°)			
Paramètre de prélèvement	Eau brut	Entré OI	Normes
S1	16	21,3	>25
S2	16,2	21,1	
S3	16,5	21,0	
S4	17	21,1	
S5	17,4	21,1	
S6	18	21,0	
S7	18,5	21,0	
S8	19	21,2	
S9	19,6	21,2	
S10	20	21,2	
S11	20,5	21,2	
S12	21	21,3	

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

S13	21,6	21,3	
S14	22	21,3	
S15	22,5	21,3	
S16	23	21,3	
S17	23,4	21,4	
S18	23,7	21,4	
S19	24	21,3	
S20	24,2	21,0	
S21	24,3	20,3	
S22	24	20,4	
S23	23,5	21,0	
S24	23	21,3	

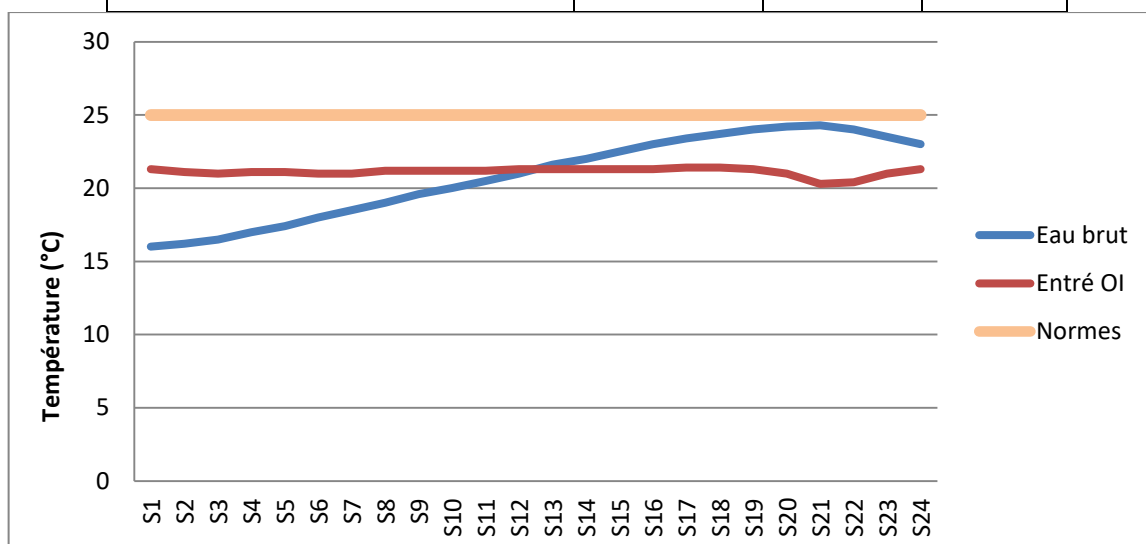


Figure V. 6: L'évolution de la température d'eau brute et d'eau filtrée.

Discussion

- L'eau brute subit une variation de température de près de 52 %.
- Le système de prétraitement thermique assure un ajustement efficace (réchauffement jusqu'à +33 % ou refroidissement jusqu'à -16 %).
- L'eau en entrée OI reste toujours en dessous de la norme (>25 °C), avec une marge de sécurité moyenne de 10 à 15 %.
- La température en entrée OI est très stable (variation <6 %), assurant une performance optimale des membranes.

**CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE
DESSALEMENT DE BÉNI SAF**

V.6.2.2- Le PH

Tableau V. 4: Résultats des analyses de PH

PH						
Paramètre de prélèvement	Eau brut	Entrée OI	Perméat	Concentra	Eau traitée	Normes
S1	8,12	8,66	6,40	7,83	8,31	7 à 8,5
S2	8,1	8,66	6,40	7,76	8,21	
S3	8,08	8,66	6,41	7,86	8,43	
S4	8,06	8,66	6,41	7,91	8,37	
S5	8,04	8,66	6,41	8,01	8,24	
S6	8,02	8,66	6,41	7,83	8,29	
S7	8	8,66	6,41	7,83	8,13	
S8	7,98	8,66	6,42	7,79	8,31	
S9	7,95	8,66	6,42	8,11	8,06	
S10	7,93	8,66	6,42	7,8	8,34	
S11	7,9	8,66	6,42	7,8	8,33	
S12	7,88	8,66	6,42	7,88	8,04	
S13	7,89	8,66	6,42	7,93	8,2	
S14	7,91	8,66	6,42	7,76	8,1	
S15	7,94	8,66	6,42	7,82	8,05	
S16	7,97	8,66	6,42	8,03	8,38	
S17	7,99	8,66	6,42	8	8,13	
S18	8,01	8,66	6,42	7,5	8,04	
S19	8,03	8,66	6,42	7,86	8,32	
S20	8,05	8,66	6,42	7,74	8,17	
S21	8,07	8,67	6,41	7,82	8,08	
S22	8,09	8,66	6,43	7,69	8,3	
S23	8,11	8,66	6,44	7,51	8,43	
S24	8,13	8,66	6,44	7,99	8,46	

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

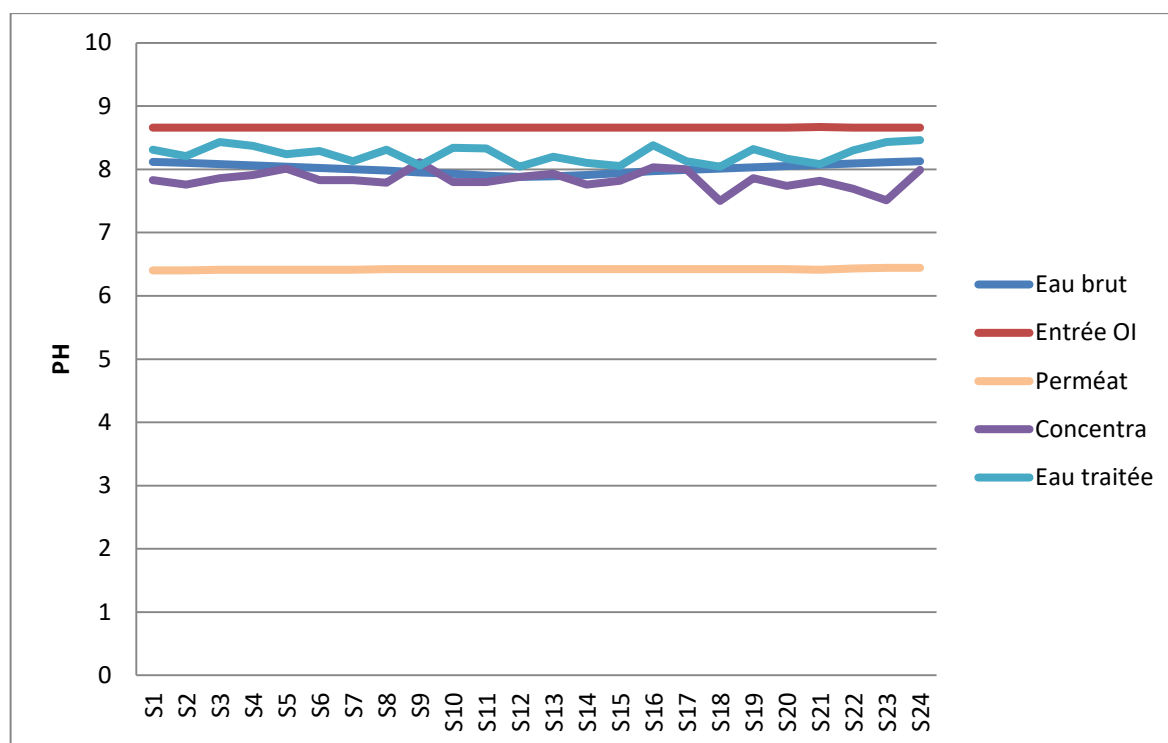


Figure V. 7: variation de PH en fonction de la période d'analyse.

Discussion

L'analyse des valeurs de pH tout au long du processus de traitement de l'eau à la station de dessalement de Chatt El Hillal montre une régulation chimique rigoureuse, essentielle au bon fonctionnement de l'installation. Le pH de l'eau brute varie faiblement entre 7,88 et 8,13, soit une fluctuation d'environ 3,1 %, ce qui indique une eau naturellement légèrement basique. En entrée de l'osmose inverse, le pH est volontairement augmenté jusqu'à une valeur constante de 8,66 (voire 8,67), soit une augmentation moyenne de 7,8 % par rapport à l'eau brute. Cette alcalinisation vise à limiter la formation de dépôts sur les membranes et à prévenir les risques de corrosion. En sortie des membranes, le perméat affiche un pH beaucoup plus faible, variant entre 6,40 et 6,44, soit une chute de près de 26 %, conséquence directe de la rétention des ions minéraux par les membranes d'osmose inverse. Quant au concentrat, son pH reste globalement autour de 7,8, soit environ 9,6 % de moins que celui de l'eau d'entrée, traduisant une légère neutralisation au cours du passage membranaire. Finalement, le pH de l'eau traitée est ajusté entre 8,04 et 8,46 par un processus de reminéralisation, ce qui représente une augmentation d'environ 28 % par rapport au perméat acide. Cette étape finale permet de respecter les normes de qualité de l'eau potable (pH entre 7 et 8,5) et garantit une eau stable, non agressive pour les réseaux de distribution. Ces variations maîtrisées démontrent l'efficacité du système de traitement et de régulation chimique mis en place dans la station.

**CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE
DESSALEMENT DE BÉNI SAF**

V.6.2.3- La conductivité

Tableau V. 5: Résultats des analyses de La conductivité

Conductivité (uS/cm)					
Semaine	Entrée OI	Perméat	COND.ENTR. SAUM.SIP-01	Concentrât	COND.COL.ASP. POMP.H.PRES
S1	56427	868	96769	93777	55023
S2	56396	850	96713	93754	54982
S3	56520	845	96790	93879	54996
S4	56357	845	96761	93764	55068
S5	56373	847	96793	93841	55046
S6	56532	846	96854	93970	55047
S7	56605	848	96899	94024	55063
S8	56533	851	96780	93843	55055
S9	56590	858	96817	93893	55029
S10	56746	864	96898	94055	55020
S11	56588	864	96833	93903	55010
S12	56667	865	96824	93977	54963
S13	56579	863	96791	93900	54935
S14	56337	859	96619	93644	54921
S15	56442	862	96683	93789	54918
S16	56386	864	96722	93898	54924
S17	56283	865	96735	93825	54972
S18	56257	866	96705	93809	54924
S19	56584	866	96759	93947	54938
S20	56604	849	96757	93915	54988
S21	56591	809	96684	93848	55029
S22	56727	813	96800	93961	55112
S23	56728	846	96841	93924	55143
S24	56591	863	96736	93817	55024
Normes	2800				

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

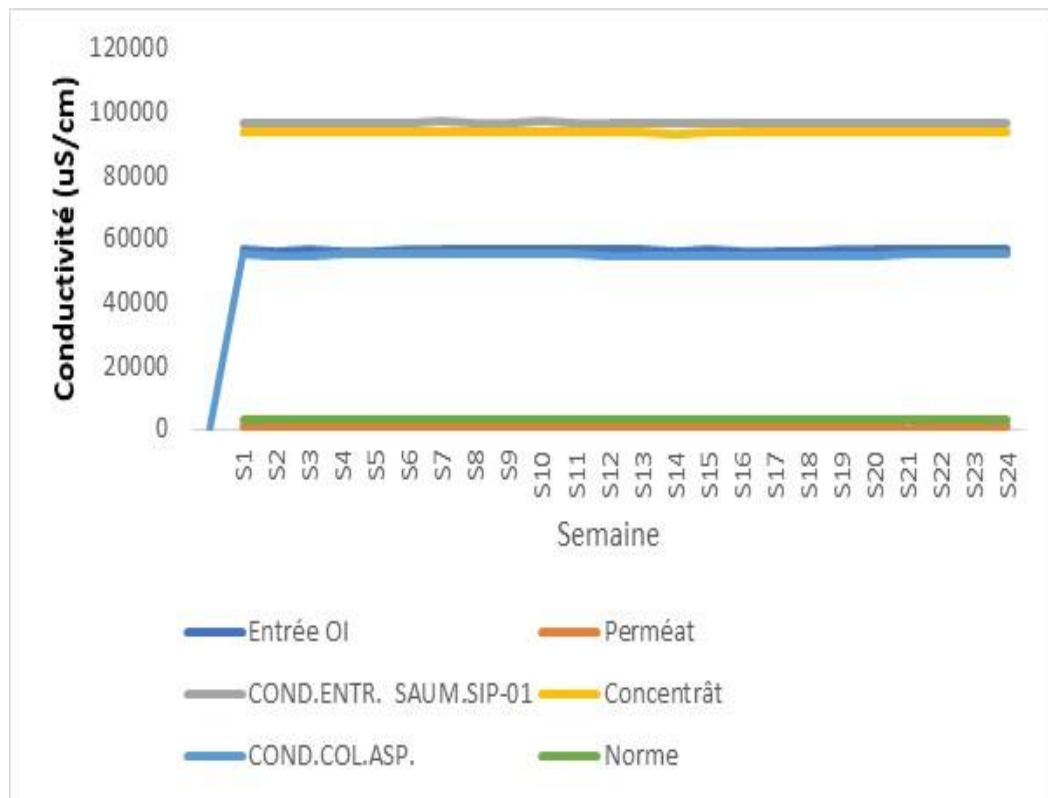


Figure V. 8: variation de la conductivité en fonction de la période d'analyse..

Discussion

Les mesures de conductivité révèlent un contraste net entre l'eau d'entrée de l'osmose inverse ($\approx 56\,500 \mu\text{S}/\text{cm}$) et le perméat produit ($\approx 850 \mu\text{S}/\text{cm}$). Ce taux de réduction représente une baisse d'environ 98,5 %, traduisant une excellente efficacité des membranes pour éliminer les sels dissous. Cependant, la conductivité du perméat reste légèrement supérieure à la norme de potabilité ($2800 \mu\text{S}/\text{cm}$), ce qui peut être corrigé par post-traitement ou dilution. La conductivité du concentrat et des rejets ($\approx 93\,800$ – $96\,800 \mu\text{S}/\text{cm}$) est logiquement élevée, reflétant la concentration des sels retenus. Ces valeurs, bien que attendues, nécessitent une gestion environnementale rigoureuse pour limiter l'impact sur le milieu marin. Globalement, les résultats confirment une performance stable du procédé membranaire, avec une séparation ionique très efficace.

**CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE
DESSALEMENT DE BÉNI SAF**

V.6.2.4- Le TDS

Tableau V. 6: Résultats des analyses de TDS

TDS (mg/l)					
	Entrée OI	Perméat	Concentrât	Eau traitée	Norme
S1	39 499	477	70 333	477	150 à 500
S2	39 377	468	70 316	468	
S3	39 564	465	70 409	465	
S4	39 250	465	70 323	465	
S5	39 311	466	70 381	466	
S6	39 672	465	70 478	465	
S7	39 824	466	70 518	466	
S8	39 673	468	70 332	468	
S9	39 913	472	70 420	472	
S10	39 922	475	70 541	475	
S11	39 912	475	70 427	475	
S12	39 667	476	70 483	476	
S13	39 405	474	70 425	474	
S14	39 236	472	70 233	472	
S15	39 109	474	70 342	474	
S16	39 204	475	70 424	475	
S17	39 398	476	70 369	476	
S18	39 180	476	70 357	476	
S19	39 408	476	70 460	476	
S20	39 423	467	70 436	467	
S21	39 414	445	70 386	445	
S22	39 709	447	70 471	447	
S23	39 710	465	70 443	465	
S24	39 414	474	70 363	474	

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

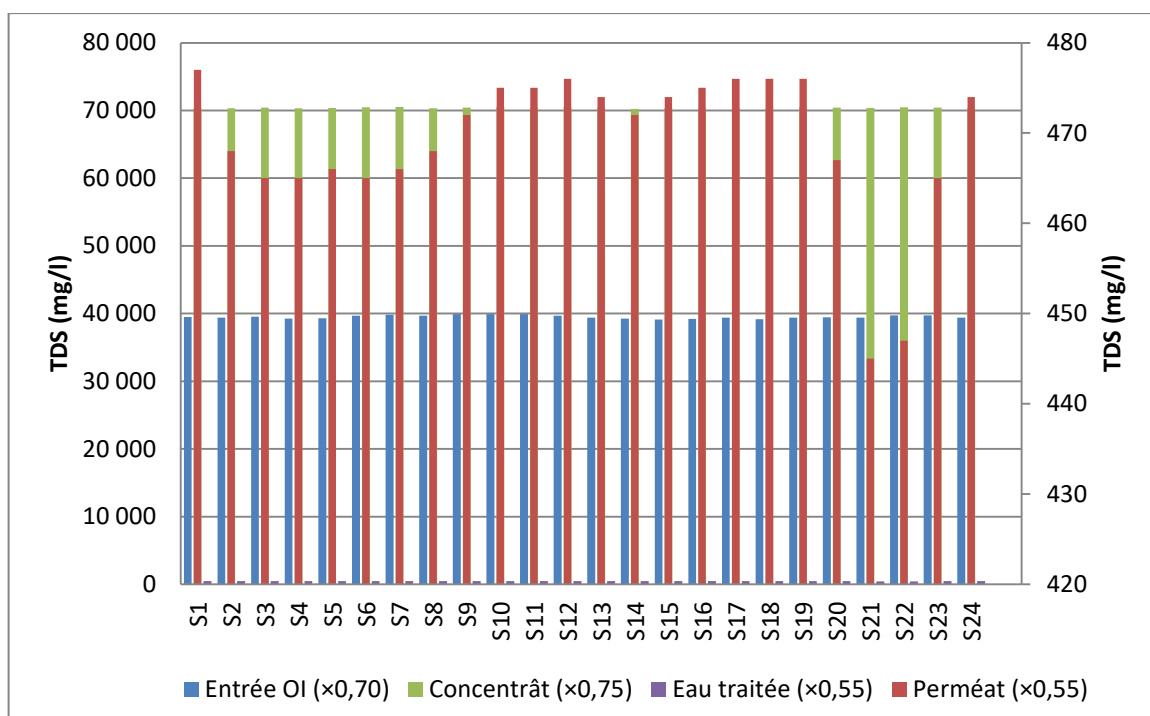


Figure V. 9: variation de TDS en fonction de la période d'analyse.

Discussion

Les valeurs de TDS mesurées à l'entrée de l'osmose inverse ($\approx 39\,500$ mg/L) confirment la forte salinité de l'eau de mer brute. Après traitement, le TDS du perméat chute fortement à environ 470 mg/L, soit une réduction moyenne de 98,8 %, illustrant une excellente efficacité de séparation des sels par les membranes. Cette valeur est globalement conforme aux normes de potabilité (150 à 500 mg/L), bien qu'elle reste proche de la limite supérieure. En sortie, l'eau traitée conserve le même TDS que le perméat, signe d'une absence de contamination secondaire. À l'opposé, le concentrat atteint des valeurs élevées ($\approx 70\,400$ mg/L), reflet de la concentration des rejets. Ces données confirment la stabilité et la performance du procédé, tout en soulignant la nécessité de surveiller les rejets pour préserver l'environnement marin.

**CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE
DESSALEMENT DE BÉNI SAF**

V.6.2.5- La turbidité

Tableau V. 7: La turbidité d'eau brute et d'eau filtré.

Turbidité (NTU)			
	TURB.EAU DE MER CHÂINE 2	Entrée OI	Norme
	NTU	NTU	NTU
S1	1,06	0,14	1
S2	1,06	0,14	1
S3	1,06	0,14	1
S4	1,06	0,14	1
S5	1,06	0,11	1
S6	1,06	0,12	1
S7	1,06	0,17	1
S8	1,06	0,13	1
S9	1,06	0,12	1
S10	1,06	0,15	1
S11	1,06	0,15	1
S12	1,06	0,11	1
S13	1,06	0,11	1
S14	1,06	0,13	1
S15	1,06	0,14	1
S16	1,06	0,12	1
S17	1,06	0,12	1
S18	1,06	0,17	1
S19	1,06	0,15	1
S20	1,06	0,15	1
S21	1,06	0,14	1
S22	1,06	0,14	1
S23	1,06	0,14	1
S24	1,06	0,11	1

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

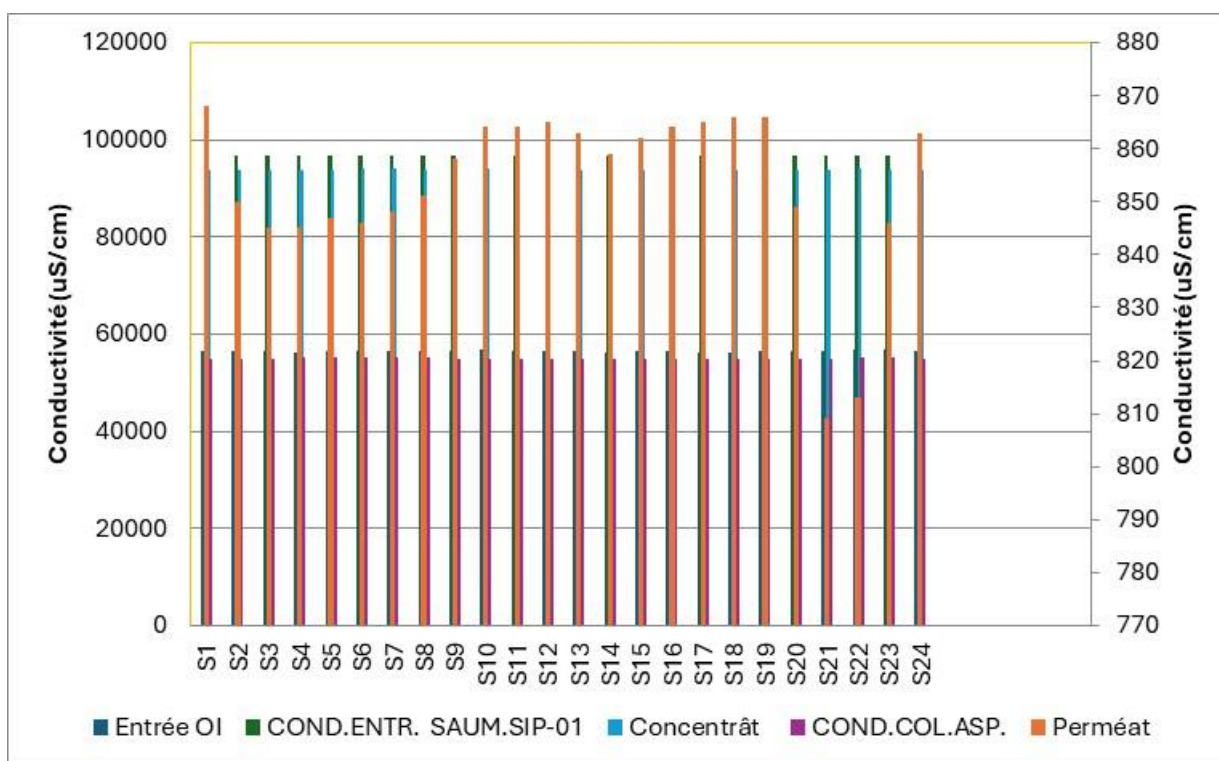


Figure V. 10: L'évolution de la turbidité d'eau brute et d'eau filtrée.

Discussion

La turbidité de l'eau de mer à l'entrée du traitement est constante à 1,06 NTU, légèrement au-dessus de la norme recommandée (≤ 1 NTU). Grâce au prétraitement (filtration, coagulation, etc.), elle est fortement réduite en entrée de l'osmose inverse, avec des valeurs variant entre 0,11 et 0,17 NTU, soit une réduction moyenne d'environ 86 %. Ces résultats démontrent une efficacité élevée du système de clarification en amont, garantissant une protection optimale des membranes contre le colmatage. La stabilité des valeurs obtenues confirme la fiabilité du procédé de prétraitement, essentiel pour assurer une performance durable de la station.

**CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE
DESSALEMENT DE BÉNI SAF**

V.6.2.6- Le SDI5 et SDI15

Tableau V. 8: SDI d'eau brute et d'eau filtré.

SDI5, SDI15			
	SDI5 eau de mer	SDI15 eau filtrée	Norme OMS SDI15
S1	10,6	1,1	<3
S2	10,8	1,09	
S3	12,5	0,97	
S4	7,7	1,14	
S5	9,2	0,13	
S6	13,1	1,04	
S7	13,4	1,08	
S8	10,8	0,87	
S9	11,2	1,07	
S10	9,41	1,15	
S11	11,5	1,03	
S12	10,4	1,14	
S13	12,8	1,14	
S14	10,2	1,02	
S15	10,5	1,07	
S16	7,2	1,07	
S17	12,2	0,91	
S18	12,6	1,04	
S19	13,6	0,88	
S20	11,7	1,07	
S21	9,5	1,11	
S22	11,41	1,14	
S23	12,54	1,04	
S24	13,84	1,01	

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

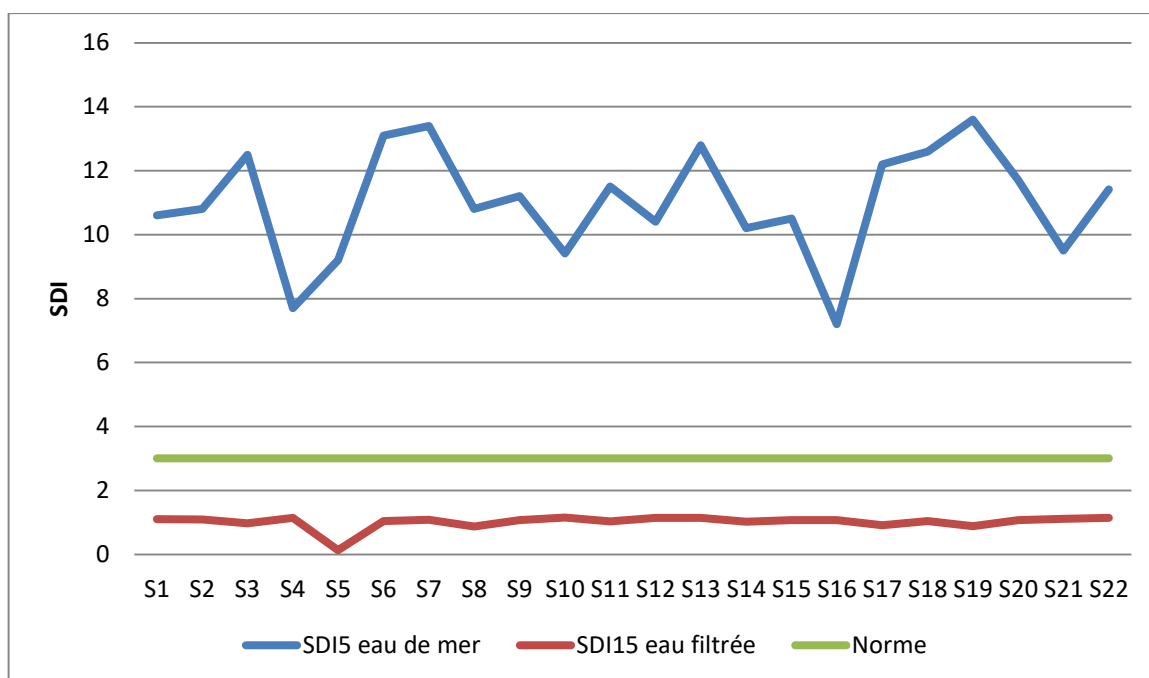


Figure V. 11: L'évolution du SDI d'eau brute et d'eau filtrée.

Discussion

Le SDI (Silt Density Index) est un indicateur clé de la quantité de matières colloïdales ou de particules fines présentes dans l'eau, influençant fortement la performance des membranes d'osmose inverse. Il est généralement mesuré à 5 et 15 minutes (SDI5 et SDI15).

- Les valeurs de SDI5 pour l'eau brute sont très élevées, allant de 7,2 à 13,84, bien au-delà du seuil acceptable pour une alimentation directe en osmose inverse. Cela souligne une forte charge en particules dans l'eau de mer avant traitement, ce qui justifie l'importance du prétraitement (filtration, coagulation, etc.).
- En revanche, les valeurs de SDI15 pour l'eau filtrée varient entre 0,87 et 1,15, toutes étant inférieures à la norme OMS (<3). Ces résultats montrent que le système de prétraitement fonctionne efficacement, en réduisant drastiquement la concentration des matières colloïdales avant l'entrée dans les membranes.
- Cette faible turbidité après filtration permet de protéger les membranes OI, de réduire le colmatage et de prolonger leur durée de vie.

**CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE
DESSALEMENT DE BÉNI SAF**

V.6.2.7-TAC

Tableau V. 9: Résultats des analyses de TAC

Échantillon	Entrée OI	Perméat	Concentrât	Eau traitée	Norme OMS (>60 mg/l)
S1	600	5	800	57	>60 mg/l
S2	650	5	800	55	
S3	800	5	900	59	
S4	1000	6.5	900	55	
S5	900	6.5	900	56	
S6	550	4	900	58	
S7	800	5	1000	57	
S8	700	4.5	750	58	
S9	1000	6	1000	62	
S10	900	6.5	850	56	
S11	850	5.5	950	58	
S12	750	4.5	800	56	
S13	700	5	850	58	
S14	650	4.5	900	59	
S15	800	6	950	60	
S16	750	5.5	950	58	
S17	600	5	800	57	
S18	850	6.5	1000	59	
S19	900	6.5	950	60	
S20	950	6	1000	61	
S21	700	5	800	59	
S22	750	5.5	850	60	
S23	800	6	900	61	
S24	850	6	950	62	

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

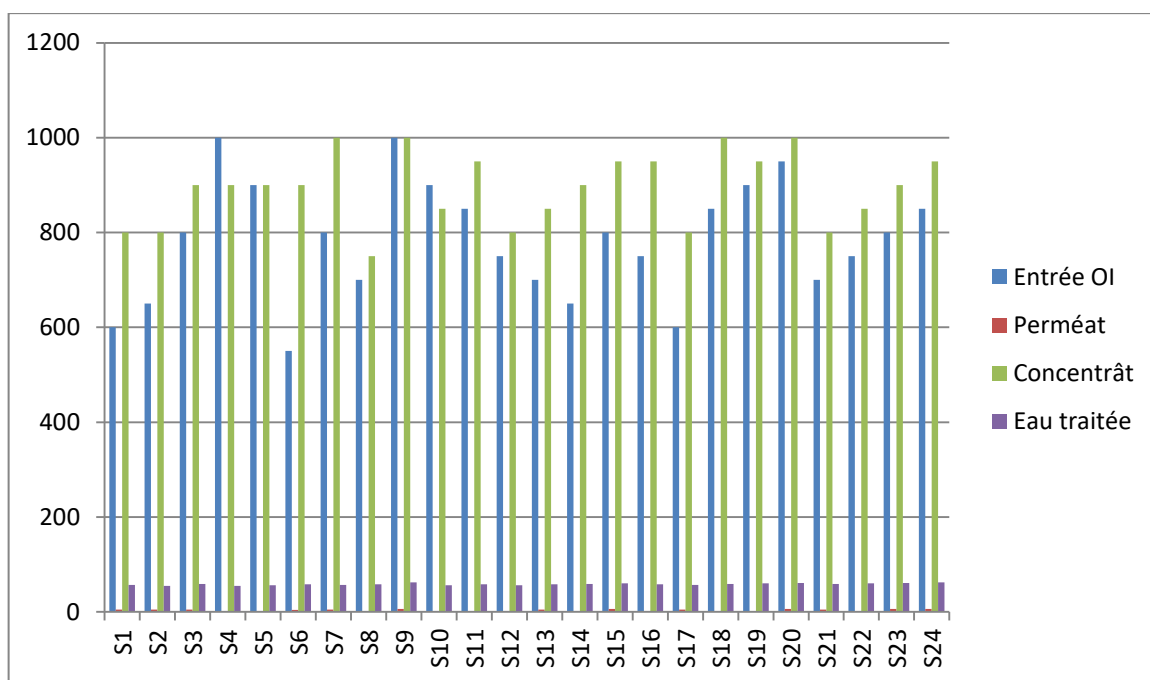


Figure V. 12: variation de TAC en fonction de la période d'analyse.

Discussion

Les valeurs de dureté mesurées en entrée de l'osmose inverse varient entre 550 et 1000 mg/l, ce qui est typique pour une eau de mer fortement minéralisée. Après passage par les membranes, le perméat est pratiquement dénué de dureté, avec des valeurs comprises entre 4 et 6,5 mg/l, soit une réduction de plus de 99 %. Cette déminéralisation importante est ensuite corrigée en post-traitement afin d'atteindre une dureté résiduelle dans l'eau traitée comprise entre 55 et 62 mg/l. Ces valeurs sont proches ou légèrement inférieures à la norme recommandée par l'OMS (>60 mg/l), ce qui peut poser un risque de corrosion pour les canalisations si la reminéralisation est insuffisante. Globalement, la stabilité des résultats montre un bon contrôle du traitement, mais une légère amélioration de la phase de reminéralisation pourrait être envisagée pour assurer une conformité plus systématique aux exigences de qualité de l'eau potable.

**CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE
DESSALEMENT DE BÉNI SAF**

V.6.2.8-Dureté Totale (TH, mg/L CaCO₃)

Tableau V. 10: Résultats des analyses de TH

Dureté Totale (TH, mg/L CaCO₃)				
Échantillon	Entrée OI	Perméat	Eau traitée	Norme OMS
S1	7000	10	93	≤100 mg/L
S2	7000	14	89	
S3	3750	12	92	
S4	6600	12	92	
S5	6600	10	88	
S6	6700	10	94	
S7	7200	12	76	
S8	7000	8	92	
S9	6400	14	82	
S10	6750	10	89	
S11	6600	12	77	
S12	7000	14	87	
S13	6800	10	85	
S14	6600	12	83	
S15	6700	10	91	
S16	6900	12	90	
S17	6750	11	88	
S18	7100	13	86	
S19	7200	12	89	
S20	7050	13	92	
S21	6900	10	90	
S22	6800	11	91	
S23	6600	9	87	
S24	6750	12	88	

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

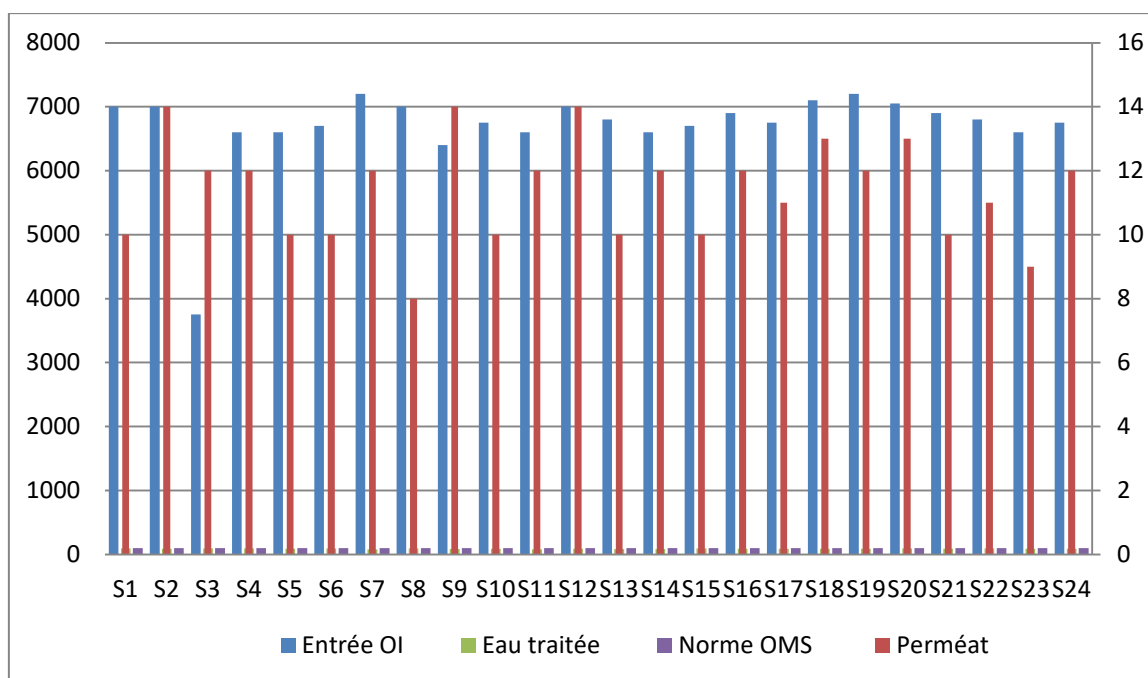


Figure V. 13: variation de TH en fonction de la période d'analyse.

Discussion

Les mesures de dureté totale à l'entrée de l'osmose inverse révèlent une eau fortement minéralisée, avec des valeurs variant entre 3 750 et 7 200 mg/L de CaCO₃, bien au-delà de la norme OMS recommandée (≤ 100 mg/L). Après traitement par osmose inverse, la dureté chute de façon drastique à des niveaux compris entre 8 et 14 mg/L, traduisant une efficacité d'élimination supérieure à 99 %. Toutefois, afin d'assurer une eau potable non agressive, une reminéralisation est appliquée : l'eau traitée finale présente une dureté située entre 76 et 94 mg/L, ce qui respecte largement la norme OMS. Cette reminéralisation bien maîtrisée garantit un équilibre satisfaisant entre qualité sanitaire et protection des réseaux de distribution. L'ensemble des résultats démontre la performance stable et efficace du processus de traitement en ce qui concerne la gestion de la dureté.

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

- **Conformité de l'Eau Traitée aux Normes :**

Le Tableau V.10 présente une comparaison des **paramètres physico-chimiques de l'eau traitée** avec les **normes établies**.

Tableau V. 11: Comparaison de l'eau traitée à la norme.

Paramètre	Unité	L'eau traitée	La norme
Température	°C	23,7	25
PH		8,46	8,5
Conductivité	μS/Cm	1248	2800
Turbidité	NTU	0,47	1
Ca ²⁺	mg/l CaCO ₃	52,1	200
TH	mg/l CaCO ₃	92	100
Cl ⁻	mg/l CaCO ₃	249,58	200-600
TAC	mg/l CaCO ₃	55	60
TDS	mg/l	699	1000

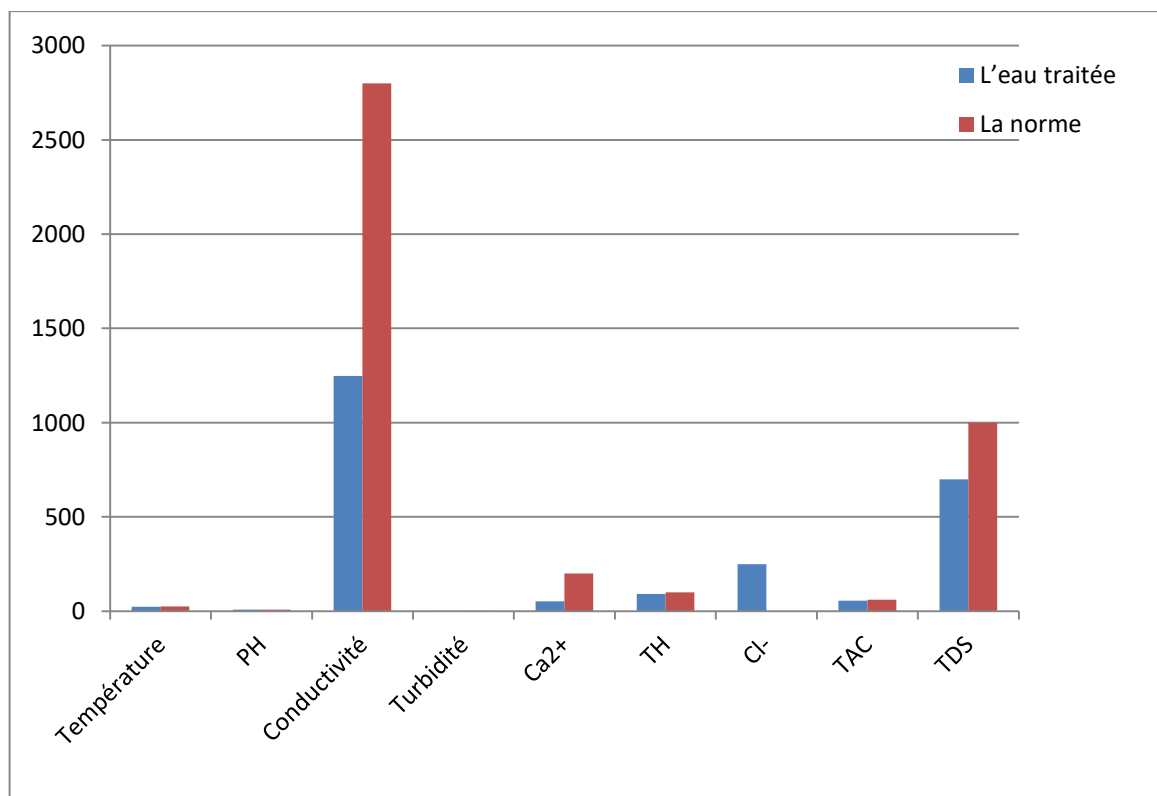


Figure V. 14: variation de TH en fonction de la période d'analyse.

CHAPITRE V : ÉTUDE DES CAS DE DÉFAILLANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT DE BÉNI SAF

Discussion

- **Température (23,7°C vs norme 25°C)** : La température de l'eau traitée est légèrement inférieure à la limite maximale recommandée, ce qui est favorable car une température plus basse limite la prolifération microbienne.
- **pH (8,46 vs norme 8,5)** : Le pH est très proche de la norme, indiquant une eau légèrement basique, ce qui est généralement acceptable pour la potabilité et limite les risques de corrosion.
- **Conductivité (1248 µS/cm vs norme 2800 µS/cm)** : La conductivité est bien en dessous de la limite, ce qui signifie une faible concentration en ions dissous, donc une eau moyennement minéralisée et conforme.
- **Turbidité (0,47 NTU vs norme 1 NTU)** : La turbidité est faible, indiquant une eau claire avec peu de particules en suspension, conforme aux exigences sanitaires.
- **Calcium Ca²⁺ (52,1 mg/l CaCO₃ vs norme 200 mg/l CaCO₃)** : Le taux de calcium est largement inférieur à la limite, ce qui réduit les risques d'entartrage et de dureté excessive.
- **Dureté totale TH (92 mg/l CaCO₃ vs norme 100 mg/l CaCO₃)** : La dureté est proche de la limite supérieure, indiquant une eau modérément dure, ce qui est acceptable mais à surveiller pour éviter les dépôts calcaires.
- **Chlorures Cl⁻ (249,58 mg/l CaCO₃ vs norme 200-600 mg/l CaCO₃)** : Le taux de chlorures est dans la fourchette normale, ce qui est compatible avec une eau potable sans goût salé excessif.
- **Titre Alcalimétrique Complet TAC (55 mg/l CaCO₃ vs norme 60 mg/l CaCO₃)** : Le TAC est proche de la norme, garantissant un bon pouvoir tampon de l'eau contre les variations de pH.
- **Solides Totaux Dissous TDS (699 mg/l vs norme 1000 mg/l)** : La concentration en solides dissous est bien inférieure à la limite, témoignant d'une eau de bonne qualité.

Conclusion : L'eau traitée respecte globalement les normes de potabilité avec des paramètres physico-chimiques bien maîtrisés. Les valeurs sont soit inférieures, soit très proches des limites fixées, assurant une qualité d'eau sûre, stable et adaptée à la consommation. Seul le taux de dureté approche la limite, ce qui peut nécessiter un suivi pour prévenir d'éventuels problèmes liés à l'entartrage

V.7- Conclusion :

Ce chapitre a mis en lumière la complexité des défis opérationnels auxquels est confrontée la station de dessalement de Chatt El Hillal – Béni Saf. Grâce à une approche diagnostique rigoureuse, nous avons identifié des défaillances récurrentes à différents niveaux, du colmatage des systèmes de captage et des dysfonctionnements des pompes, jusqu'aux défis liés à la variabilité de la qualité de l'eau brute et à l'encrassement des membranes.

L'application des outils d'analyse des causes racines, notamment le diagramme d'Ishikawa et l'analyse 5M, a permis de structurer ces problèmes et de révéler leurs origines profondes, qu'elles soient liées à la main-d'œuvre, aux méthodes, au matériel, au milieu ou aux matières premières. En décomposant ces causes, nous avons pu mettre en évidence l'interconnexion des facteurs contribuant aux défaillances.

Malgré ces défis, la comparaison de l'eau traitée aux normes a démontré une qualité de produit final globalement satisfaisante, avec des paramètres physico-chimiques respectant les exigences de potabilité. Ces résultats soulignent l'efficacité du système de traitement, malgré les obstacles rencontrés en amont.

En définitive, cette étude des cas de défaillances offre une base solide pour l'élaboration de recommandations concrètes et durables, visant à renforcer la résilience de la station, à optimiser ses performances et à garantir la pérennité de son approvisionnement en eau traitée de haute qualité.

CHAPITRE VI :
LES IMPACTS SUR
L'ENVIRONNEMENT
DU DESSALEMENT

CHAPITRE VI : LES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT DU DESSALEMENT

VI.1-Introduction

Les stations de dessalement peuvent générer des impacts environnementaux importants, tant durant leur phase de construction que lors de l'exploitation. Ces impacts touchent les zones littorales, provoquant des nuisances visuelles et sonores, des émissions atmosphériques, ainsi que des rejets dans les milieux aquatiques pouvant affecter la qualité de l'eau, de l'air, la flore et la faune marines.

Quel que soit le procédé utilisé (osmose inverse, distillation, électrodialyse, etc.), le dessalement produit un effluent concentré (saumure), plus salé que l'eau d'alimentation (1,2 à 3 fois), contenant aussi des produits chimiques utilisés dans le traitement de l'eau (antiscalants, désinfectants, etc.).

Ces rejets varient selon la qualité de l'eau brute, le procédé choisi et les objectifs de qualité de l'eau douce produite. En plus de la saumure, les stations peuvent rejeter des eaux chaudes, distillats et condensats, ainsi que produire des rejets thermiques et atmosphériques liés à la consommation d'énergie. [43]

VI.2-Origine et type des rejets

VI.2.1-Rejets atmosphériques

Les procédés de dessalement de l'eau de mer sont connus pour leur consommation énergétique élevée, bien que celle-ci tende à diminuer grâce aux progrès technologiques récents. Cependant, l'énergie utilisée pour alimenter ces installations provient majoritairement de sources fossiles, dont l'exploitation engendre des émissions polluantes nuisibles à l'environnement. Parmi ces rejets figurent notamment le dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes de soufre et d'azote, ainsi que des particules fines. Par exemple, le système de production espagnol génère environ 680 grammes de CO₂ par mètre cube d'eau dessalée, ce qui, à l'échelle d'une production quotidienne de plusieurs millions de mètres cubes, correspond à plusieurs milliers de tonnes de CO₂ émises chaque jour. Cette empreinte carbone importante contribue significativement à l'effet de serre, soulevant ainsi d'importantes préoccupations dans le contexte actuel de lutte contre le changement climatique.

VI.2.2-Les rejets chimiques

Toutes les usines de dessalement utilisent des produits chimiques pour le prétraitement de l'eau d'alimentation ainsi que le post-traitement de l'eau produite. La plupart des produits sont utilisés avant tout comme agents biocides, antitartre, antisalissure et anti mousse, et ils finissent par modifier la composition de la saumure concentrée. La présence de certains métaux, qui sont des produits de la corrosion du circuit, influent aussi sur la composition de la saumure concentrée. [43]

VI.2.3-La saumure concentrée

Les usines de dessalement rejettent en fait la même charge de constituants de l'eau de mer que celle qu'elles ont reçue, mais dans un volume d'eau moindre.

Avec le procédé MSF, un taux de récupération habituel sur la base de l'eau d'alimentation est de 10% et la salinité de la saumure concentrée est donc 1,1 fois plus élevée que celle de l'eau d'alimentation. De plus, le concentré est généralement dilué par deux avec l'eau de refroidissement avant d'être rejeté, et par conséquent le facteur de concentration est encore plus réduit, ce qui réduit les impacts sur l'environnement.

Avec le procédé OI, le facteur de conversion varie de 30 à 70%. Dans ce cas, la salinité du concentré est de 2 fois plus élevée que celle de l'eau d'alimentation. Nous pouvons voir dans le tableau VI.2.3 la différence de composition chimique entre la saumure concentrée et celle de l'eau de mer, en prenant en considération une usine type en Méditerranée. [44]

Tableau VI.2.3 : Composition chimique de la saumure par rapport à celle de l'eau de mer. [44]

Tableau VI. 1 : Composition chimique de la saumure par rapport à celle de l'eau de mer. [44]

Analyse	Eau d'alimentation mg/l	Saumure mg/l	Rapport entre les deux
Ca++	962	1.583	1.64
Mg++	1.021	1.09	1.87
Na+	11.781	19.346	1.64
K+	514	830	1.61
NH4 -	0.004	0.005	1.25
HCO3 -	195	256	1.31
CO3-	NIL	NIL	
SO4	3.162	5.548	1.75

CHAPITRE VI : IMPACTS DU DESSALEMENT SUR L'ENVIRONNEMENT

CL⁻	21.312	43.362	2.03
F⁻	1.5	1.9	1.26
NO₃⁻	2.6	4	1.54
PO₄⁻	0.08	0.4	5
NO₂⁻	0.03	0.05	1.67
Dureté totale en CaCO₃	6.600	11.800	1.78
Salinité Totale (TSD)	38.951	63.840	4.64
Fe⁺⁺⁺	0.04	0.05	1.25
AL⁺⁺⁺	0.001	0.007	7
PH	6.33	3.26	NA
Conductivité	46.200 iS	75.300 iS	NA

VI.3-Impacts sur l'environnement

Les procédés de dessalement peuvent engendrer divers impacts négatifs sur l'environnement, comme le résume le tableau ci-après. Les effets les plus marqués sont généralement liés à l'utilisation de produits chimiques (antiscalants, coagulants, biocides, etc.) et de désinfectants, qui peuvent provoquer des phénomènes d'eutrophisation dans les milieux aquatiques récepteurs. D'autres impacts, classés comme modérés, incluent la diminution de l'oxygène dissous causée par le rejet de saumure chaude, ce qui affecte la faune marine, notamment les espèces tolérantes au sel. Par ailleurs, l'augmentation de la turbidité et la réduction de la photosynthèse, dues à la remise en suspension des sédiments lors des opérations d'excavation et de dragage, sont également considérées comme des impacts environnementaux de niveau intermédiaire.

VI.3.1-Effets dus aux produits de la corrosion

Comme on l'a déjà relevé, les usines de dessalement par distillation rejettent des métaux tels que le cuivre, le nickel, le fer, le chrome et le zinc dans le milieu marin. Ces métaux ne se trouvent pas à l'état d'ions libres mais forment des complexes inorganiques et organiques qui sont adsorbés sur les matières en suspension et déposent en s'accumulant dans les sédiments. Comme, dans ce cas, le problème ne réside pas dans la concentration effective du métal mais dans sa charge totale atteignant l'environnement, on ne peut atténuer les effets en diluant le rejet. [45]

VI.3.2-Effets dus aux additifs antitartres

Les produits utilisés contre l'entartrage sont les phosphates polymères. Dans une zone marine oligotrophe comme la mer Méditerranée, le rejet de ces produits peut avoir des effets drastiques tels que des efflorescences algales, des proliférations d'algues macroscopiques, etc. Ces dernières années, les agents antitartres les plus largement utilisés ont été les polymères de l'acide maléique pour empêcher l'apparition d'effets néfastes de l'eutrophisation. [46]

VI.3.3-Effets des additifs antisalissure

Si le chlore est un agent antisalissure à large spectre, il présente aussi des effets étendus sur le milieu marin quand il est rejeté avec la saumure. Il occasionne des effets biologiques par son action stérilisante intrinsèque et des effets chimiques en halogénés les constituants organiques de l'eau de mer [47].

D'autres agents antisalissure comme les sels de cuivre entraînent des rejets de cuivre dans la saumure, et ce métal, même à de très faibles concentrations (moins de 1ppm), peut avoir des incidences sur l'environnement par suite de son accumulation [48].

VI.3.4-Effets des additifs antis mousses

Les agents anti mousse employés dans les procédés de dessalement sont principalement des composés détergents. Ces substances peuvent s'avérer toxiques pour les organismes aquatiques en perturbant l'intégrité des membranes cellulaires et en altérant des fonctions intracellulaires vitales. Bien que les données précises concernant leur impact sur les écosystèmes marins soient limitées, on considère que, à faibles concentrations et sans accumulation, leurs effets restent probablement faibles. Toutefois, une surveillance environnementale régulière est recommandée, notamment dans les zones écologiquement sensibles, afin de valider cette hypothèse.

VI.3.5-Effets du concentré (saumure)

L'eau de saumure issue du processus de dessalement présente, sur le plan physico-chimique (salinité, total des solides dissous (TDS), dureté, alcalinité, composition ionique, température, pH, conductivité, turbidité et concentration en gaz dissous), des caractéristiques qui la rendent impropre à tout usage, qu'il soit agricole ou industriel. Comme l'illustre le tableau VI.02, cette eau est fortement dégradée sur plusieurs paramètres clés et ne peut être considérée comme une ressource exploitable sans traitement supplémentaire intensif.

Il est unanimement reconnu que la saumure constitue la principale source d'impact environnemental des stations de dessalement sur le milieu marin. L'ampleur de ces effets

dépend en grande partie du volume total de saumure rejeté. Toutefois, au-delà de la quantité, les modalités de rejet ainsi que les caractéristiques du site d'émission jouent un rôle tout aussi déterminant dans l'évaluation des impacts. Des paramètres tels que la longueur de l'émissaire, sa distance par rapport à la côte, sa position verticale par rapport au fond marin, la présence d'un système de diffusion, ainsi que la profondeur du plan d'eau et les conditions hydrodynamiques locales (courants, vagues, turbulence) influencent fortement les mécanismes de dilution et de dispersion de la saumure. L'interaction de ces facteurs conditionne directement l'intensité et l'étendue spatiale des perturbations écologiques induites.

Lorsque la saumure est rejetée sans dilution ni traitement, elle induit une augmentation de la concentration en sel autour de la zone de rejet. Des travaux de recherche ont ainsi montré que les rejets de saumure issus des usines de dessalement du golfe persique augmentaient localement la concentration en sel de 5 à 10 mg/l, la concentration moyenne de l'eau de mer dans cette région avoisinant les 45 mg/l. La forte salinité des eaux de rejets est à l'origine des principaux impacts des usines de dessalement sur les écosystèmes marins, le rejet de saumure dans la mer aboutit en effet à la formation d'un système stratifié de couches de plus en plus salées en allant vers le fond, ce qui diminue les brassages entre eau de fond et eau de surface. Dans certains cas et en fonction des courants marins locaux, 40% de la zone environnante est recouverte de sel. [48]

Ce phénomène peut conduire à des modifications du milieu local (voir schémas ci-dessous) :

-Anoxie (absence d'oxygène) au niveau des fonds marins : la diminution des brassages associée à la présence d'espèces consommatrices d'oxygène peut conduire à des périodes d'anoxie du fond marin.

-Diminution de la lumière : la présence d'eau hypersalée provoque la formation d'un brouillard qui rend difficile le passage de la lumière, affectant ainsi la photosynthèse des espèces marines végétales. [50]

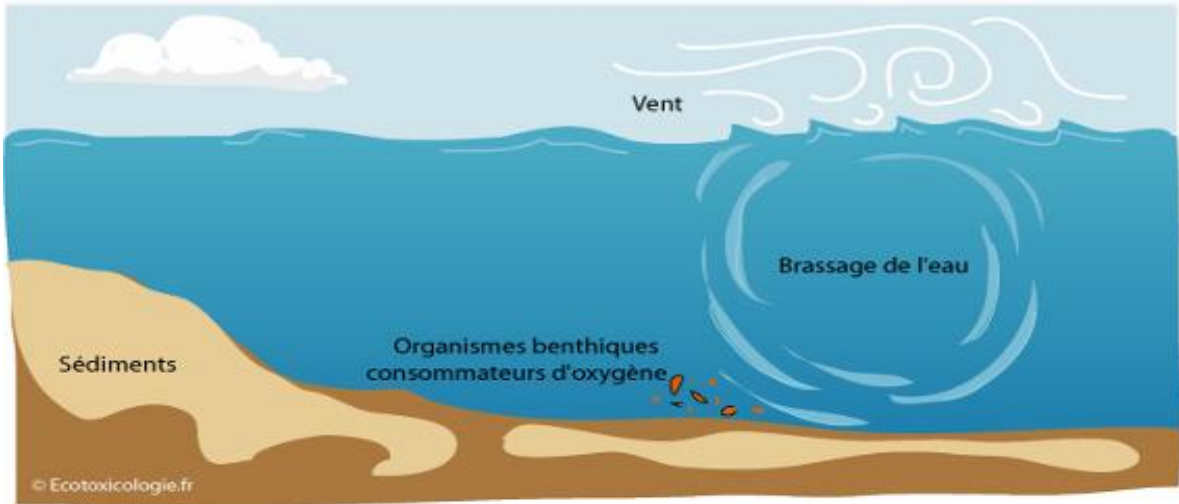


Figure VI. 1 : Etat initial du milieu (pas de rejet de saumure) [48]

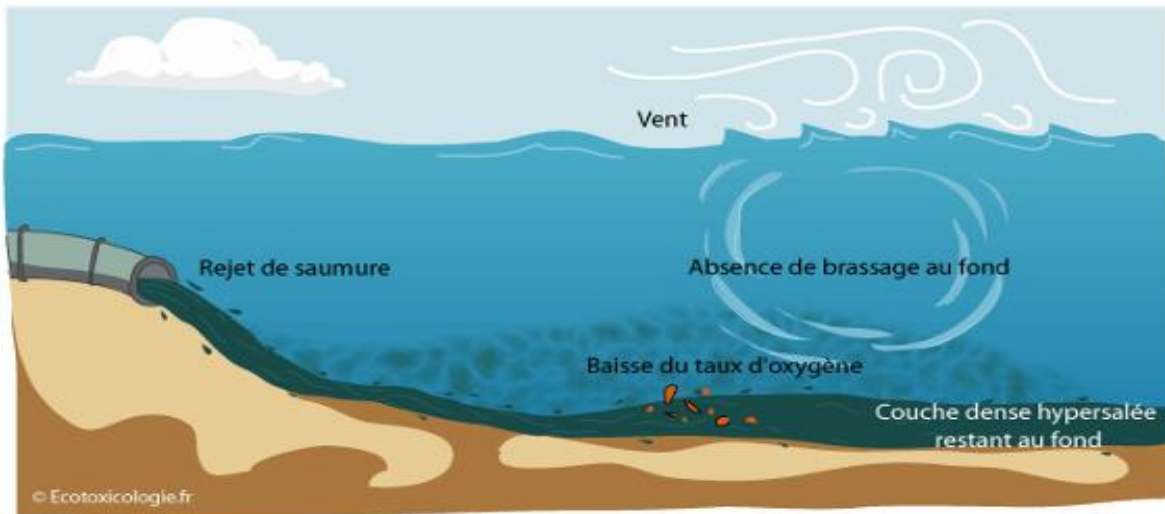


Figure VI. 2 : Etat du milieu après implantation de l'usine de dessalement (rejet de saumure) [48]

La majorité des organismes marins présentent une certaine capacité d'adaptation aux variations modérées de la salinité et de la température, et peuvent, dans certains cas, tolérer temporairement des conditions environnementales extrêmes. Toutefois, leur résistance diminue significativement en cas d'exposition prolongée à des conditions défavorables. Le rejet continu de saumure issue du dessalement, souvent caractérisée par une salinité élevée et une température supérieure à celle du milieu naturel, peut entraîner une réduction de la concentration en oxygène dissous. Cette situation peut s'avérer létale pour certaines espèces sensibles et provoquer une altération durable de la structure des communautés biologiques marines, avec des effets sur la diversité spécifique et l'abondance des populations dans la zone affectée.

Afin de mieux comprendre les différences entre les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer naturelle et celles de la saumure rejetée, le tableau suivant présente une comparaison des principales composantes.

VI.3.6-Effets sur la faune et la flore marine

Certains des composés chimiques rejetés par les usines de dessalement peuvent entraîner des conséquences sur les écosystèmes marins. Par exemple, il a été montré que les produits antitartres rejetés par les usines de dessalement étaient des éléments nutritifs qui stimulaient la productivité primaire. Ces produits peuvent donc induire une prolifération d'algues dans des milieux qui habituellement en comptent peu, comme en mer méditerranée. De même, les produits antisalissure rejetés par ces mêmes usines auraient des effets stérilisants sur certains organismes. [41]

La saumure rejetée contient des résidus de produits chimiques utilisés lors des prétraitements. Certains de ces composés peuvent acidifier localement l'eau de mer, affectant des espèces sensibles comme les coraux. Le métabisulfite de sodium, souvent utilisé pour la déchloration de l'eau ou comme biocide, est particulièrement toxique pour le phytoplancton. De plus, certaines de ces substances sont bioaccumulables, ce qui entraîne leur concentration progressive dans la chaîne alimentaire, notamment dans les tissus des poissons.

VI.3.7-Effets du bruit

Les usines d'osmose inverse utilisent des pompes à haute pression, des turbines et de récupérateurs d'énergie qui sont bruyantes et qui contribuent à la pollution sonore. Ces installations devraient donc être situées loin des régions peuplées à moins que des moyens de mitigation ne soient utilisés pour réduire leur niveau sonore. [49]

VI.3.8-Évolution des différents impacts du dessalement

Lorsqu'il est question des effets des stations de dessalement, l'attention se porte souvent sur leur impact environnemental. Cependant, cette technologie engendre des répercussions plus larges, touchant divers aspects techniques, économiques et sociaux. Le tableau suivant présente une synthèse de l'évolution de ces impacts à travers les différentes composantes du procédé d'osmose inverse.

Tableau VI. 2 : L'évaluation des impacts associés à l'osmose inverse [49]

Aspect	Critère	Description	Évaluation de l'impact
Economique	Coûts initiaux.	Moindre, en comparaison à d'autres procédés comme la distillation	+
	Coûts de maintenance et d'opération.	Nécessite un prétraitement.	-
Technique	Consommation énergétique.	Moindre que pour la distillation.	+
	Capacité de traitement.	Le procédé consomme moins d'eau de mer que la distillation pour produire la même quantité d'eau potable.	+
	Membrane : Colmatage ; Dégradation.	Susceptible au colmatage et à la dégradation.	-
Environnement	Écosystème marin.	Les produits chimiques utilisés lors du prétraitement peuvent contaminer le rejet.	-
	Bruit	Utilisation de turbines et de pompes à haute	-

		pression bruyantes.	
	Source d'énergie	Consommation moindre.	+
	Gestion des résidus	Les membranes ont une courte d'urée de vie et constituent des déchets.	-
Sociaux	Réponse au besoin	Possibilité d'usine à grande capacité.	+
	Main d'œuvre	Procédé répandu et bien connu.	+
	Acceptation	Procédé le plus populaire.	+
	Santé humaine	Eau produite convient bien aux usages domestiques.	+

Légende : + Impact positif, - Impact négatif.

VI.4-Mesures d'atténuation des impacts sur les ressources marines : Cas de la SDEM de Béni Saf

1. Cartographie écologique préalable : Avant la mise en service de la station, une campagne de prospection bathymétrique et écologique a été menée le long du littoral de Béni Saf afin d'identifier les zones sensibles : herbiers de posidonie, zones de frai et habitats essentiels pour la faune benthique. Cette cartographie a permis d'orienter les choix d'implantation du captage et de l'émissaire pour limiter les perturbations écologiques.
2. Emplacement optimisé des prises et rejets : Les prises d'eau de mer ont été positionnées en dehors des zones d'intérêt écologique, à une profondeur suffisante pour éviter l'aspiration de larves et organismes marins de surface. De même, l'émissaire de rejet de la saumure a été placé à une distance et une profondeur

permettant une dispersion efficace, tout en évitant les zones à faible renouvellement hydrodynamique.

3. Amélioration du brassage et de la dilution : La conception de la tête d'émissaire a intégré des diffuseurs multi-jets permettant d'assurer un brassage optimal avec l'eau ambiante. Cette stratégie vise à garantir une dilution immédiate d'au moins 3 volumes d'eau de mer pour un volume de saumure rejeté, minimisant ainsi l'impact de la salinité et des résidus chimiques.
4. Optimisation du prétraitement et du nettoyage des membranes : Le système de prétraitement de la SDEM de Béni Saf privilégie l'utilisation de coagulants et d'antiscalants à faible toxicité. Des cycles de nettoyage chimique (CIP) plus espacés ont été rendus possibles grâce à un contrôle rigoureux de la turbidité de l'eau d'alimentation (avec des seuils d'alerte autour de 1,5 NTU), réduisant ainsi les rejets de produits de lavage dans la saumure.
5. Neutralisation avant rejet : Un bassin de neutralisation a été intégré en aval du système pour traiter les effluents contenant du métabisulfite de sodium et d'autres résidus chimiques, assurant que les rejets atteignent des concentrations compatibles avec les normes environnementales (pH neutre, absence de substances actives nocives).
6. Suivi environnemental régulier : Un plan de surveillance environnementale est en place, incluant des prélèvements périodiques en mer autour de la zone de rejet afin de mesurer la salinité, la turbidité, la température et les concentrations en oxygène dissous. Ce suivi permet de détecter toute déviation et d'adapter rapidement l'exploitation de la station.

VI.5-Les mesures prises par la station de Béni Saf

La station de dessalement de Chatt El Hilal – Béni Saf dispose d'un système de réservoir d'effluents et d'un émissaire sous-marin destiné à neutraliser les rejets de saumure. Un système de diffusion est intégré afin de diluer efficacement l'eau salée rejetée dans le milieu marin, minimisant ainsi l'impact environnemental.

Les caractéristiques de l'effluent à rejeter dans l'émissaire sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau VI. 3 : Caractéristiques de l'effluent versé par l'émissaire sous-marin de la station de dessalement de Béni Saf.

Paramètre	Valeur
Salinité du rejet	66,5 g/l
Salinité de l'eau brute	37,0 g/l
Variation de salinité	29,5 g/l
Débit maximum	6.000 m ³ /h

Les paramètres techniques de la décharge par l'émissaire sous-marin de la station de dessalement de Béni Saf sont les suivants :

- Profondeur à l'extrémité de l'émissaire : 12 m
- Diamètre de la bouche d'émission : 1,5 m
- Vitesse de décharge : 1,6 m/s
- Débit de rejet vertical : 6.000 m³/h (1,67 m³/s)
- Salinité de calcul de l'eau de mer : 38,2 g/l
- Salinité moyenne en été (25 °C) : 30,1 g/l
- Salinité de l'effluent (25 °C) : 55,3 g/l
- Vitesse de courant environnemental : 6 cm/s

VI.6-Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les effets environnementaux liés au dessalement de l'eau de mer à la station de Béni Saf, notamment l'impact des rejets de saumure sur le milieu marin. L'analyse a révélé une augmentation significative de la salinité près des zones de déversement, pouvant perturber les écosystèmes locaux. Afin de réduire cet impact, la station utilise un bassin tampon pour réguler les effluents ainsi qu'un émissaire sous-marin diffusant la saumure de manière contrôlée. Ces mesures permettent une meilleure dilution du rejet et visent à limiter les effets sur la biodiversité marine. Malgré ces efforts, une surveillance environnementale reste essentielle pour évaluer l'impact à long terme du fonctionnement de la station sur le littoral.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce mémoire consacré à l'analyse et au diagnostic des cas de défaillances de la station de dessalement de Béni Saf – Chatt El Hilal, plusieurs enseignements majeurs ont pu être tirés, tant sur le plan technique qu'environnemental et organisationnel.

L'étude a mis en évidence l'importance stratégique du dessalement de l'eau de mer pour l'Algérie, un pays confronté à un stress hydrique structurel et à une demande croissante en eau potable. La station de Béni Saf, du fait de sa capacité de production et sa technologie d'osmose inverse, s'inscrit pleinement dans la politique nationale de diversification des ressources en eau et de sécurisation de l'approvisionnement des zones côtières.

L'analyse détaillée du fonctionnement de la station, des procédés de traitement, ainsi que des incidents et pannes enregistrés, a révélé que les principales défaillances sont liées à la complexité des installations, à la variabilité de la qualité de l'eau d'alimentation, aux contraintes de maintenance, ainsi qu'à la gestion des rejets. Les dysfonctionnements touchant les pompes, les systèmes de dosage chimique, les équipements de prétraitement et le contrôle-commande ont été identifiés comme des points critiques susceptibles de compromettre la continuité et la qualité de la production.

L'étude des paramètres physico-chimiques de l'eau d'alimentation et de la saumure a souligné la nécessité d'un suivi rigoureux et d'une adaptation continue des traitements pour préserver l'intégrité des membranes et limiter les impacts environnementaux, en particulier sur le milieu marin récepteur.

Au regard de ces constats, plusieurs recommandations s'imposent :

- Renforcer la maintenance préventive et l'automatisation des systèmes de surveillance ;
- Optimiser la gestion des produits chimiques et les protocoles de nettoyage des membranes ;
- Améliorer la formation du personnel et les procédures de gestion des situations d'urgence ;
- Intensifier le suivi environnemental des rejets et encourager la valorisation des saumures.

CONCLUSION GENERALE

En définitive, ce travail contribue à une meilleure compréhension des enjeux et défis liés à l'exploitation d'une station de dessalement moderne en Algérie. Il ouvre également des perspectives pour l'amélioration continue du fonctionnement des installations, dans l'optique d'assurer une production durable, fiable et respectueuse de l'environnement.

Enfin, au vu des résultats des analyses réalisées, il est possible d'affirmer que l'eau produite par la station de Chatt El Hilal présente une bonne qualité physico-chimique et bactériologique, et ne constitue aucun danger pour la consommation humaine.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Agence Presse Service. (Juillet 2022). Ressources en eau : 60 ans de réalisations pour assurer la sécurité hydrique. APS Algérie.
<https://www.aps.dz/economie/142929-ressources-en-eau-60-ans-de-realizations-pour-assurerla-securite-hydrique> Consulté le 14 janvier 2025.
- [2] Kachi Abdallah, A. (2016). L'eau superficielle en Algérie de sa naissance à sa gestion, mémoire de Master, Département de Biologie et Écologie, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université des Frères Mentouri - Constantine 1.
- [3] Demmak, A. (s.d.). Gestion des ressources en eau en Algérie : Problèmes et perspectives. Présentation dans le cadre de l'atelier régional sur la gouvernance des eaux souterraines, Amman, Jordanie. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO).
- [4] Boudjadja, A., Messahel, M., Pauc, H. (2003). Ressources hydriques en Algérie du Nord. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 16(3), 285–304.
- [5] El Watan. (2023, juillet 13). La nappe albiennaise s'étend sur trois pays : un impressionnant gisement d'eau à préserver.
<https://elwatan-dz.com/la-nappe-albienne-setend-sur-trois-pays-un-impressionnant-gisement-deau-a-preserver>. Consulté le 14 janvier 2025.
- [6] PROGRESS. (2016). Étude d'évaluation du secteur de l'eau en Algérie – État des lieux, Projet CREM (Coordination régionale pour une gestion durable des ressources en eau au Maghreb), GIZ/BGR /OSS, Version finale, décembre 2016.
- [7] **Centre d'information sur l'eau (C.I.eau)**. (2017). Où en sont les ressources en eau dans le monde ? [En ligne]. Disponible sur : <https://www.cieau.com/connaitre-leau/les-ressources-en-france-et-dans-le-monde/ou-en-sont-les-ressources-en-eau-dans-le-monde/> Consulté le 25 janvier 2025.
- [8] Ovive. (2024). Réutilisation des eaux usées industrielles. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ovive.fr/besoins/reutilisation-eau-industrielle/>
- [9] **Genesis Water Technologies**. (2024). Révolutionner la gestion des eaux industrielles : tendances en matière de traitement. Document en ligne. Disponible sur : <https://fr.genesiswatertech.com/article-de-ce-blog/gestion-des-eaux-industrielles/> Consulté le 27 janvier 2025.
- [10] **Organisation mondiale de la santé (OMS)**. (2017). Directives de qualité pour l'eau de boisson – Quatrième édition, premier additif. OMS, Genève.

- [11] **WWAP (Programme mondial pour l'évaluation des ressources en eau de l'UNESCO)**. (2020). Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2020 : L'eau et les changements climatiques. UNESCO.
- [12] Falkenmark, M. (1989). The Massive Water Scarcity Now Threatening Africa: Why Isn't It Being Addressed *Ambio*, 18(2).
- [13] Amitouche M., (2016). Impacts des rejets des stations de dessalement sur le milieu récepteur, Thèse de Doctorat en sciences en Hydraulique, université de BISKRA.
- [14] Tahar M A, Chebki M, (2020). Etude des performances de fonctionnement d'un ouvrage hydraulique : cas de la station de dessalement d'eau de Chatt El Hilal de Beni Saf ; Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Département Hydraulique.
- [15] Kameche H, Madani Kh, (2017). Gestion de la saumure de dessalement- cas de la station de Cap-Djinet- (W) Boumerdes ; Mémoire de Master, Université M'hamed Bouhrara, Boumerdes Département de Génie des Procèdes
- [16] Chekroud, Mohamed Reda (2014). Etude des performances de la station de dessalement de la wilaya de Skikda, Mémoire Ingénieur, ENSH.
- [17] Gleick, P. H. (2014). Water resources in the 21st century; United Nations Water Report, 2019.
- [18] UNESCO. (2020). The United Nations World Water Development Report: Water and Climate Change. p 85.
- [19] Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, Culture Sciences-Chimie. <https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-physique/thermodynamique-chimique/le-dessalement-de-l-eau-de-mer-et-des-eaux>. Consulté le 31 janvier 2025.
- [20] Anonyme. Techniques de dessalement. Eau potable : enjeux géopolitiques. Le dessalement est-il une solution d'avenir ?, 5 février 2012, <https://tpeorbleu.wordpress.com/techniques-de-dessalement-2/> Consulté le 04 février 2025.
- [21] Jean-Marie ROVEL. Dessalement de l'eau de mer. Journal de techniques de l'ingénieur (journal), P (W 5 700- 5). 10 février 2025.
- [22] Jean-Pierre Mérica. Distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilité de couplage avec l'énergie solaire (thèse de doctorat). Toulouse, INSA Toulouse, le 9 décembre 2009.
- [23] Séverine plantier. (2013). Procédé de prétraitement d'eau avant osmose inverse en présence d'efflorescences Algales, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Saint-Nazaire, 260 p.

- [24] SAIDI KH, CHENINE M., (2022). Distillation solaire des eaux saumâtres dans le sud algérien, influence des paramètres clés, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla Département Génie des Procédés.
- [25] Sadli, K., Chenine, M., Chettibi, S. (2022). Distillation solaire des eaux saumâtres dans le sud algérien, influence des paramètres clés (Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie).
- [26] FEDALI S, (2008). Modélisation et conception d'un distillateur solaire des eaux saumâtres à bas coût pour les communautés rurales, Mémoire de Magistère, Université de Batna, Département de Mécanique.
- [27] Anonyme. Une méthode de dessalement : l'électrodialyse. <http://dessaler.free.fr/electrodialyse.htm>. Consulté le 12 février 2025.
- [28] Mandri, Y. (2011). Étude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide, Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1 et Université Mohammed V Agdal, Rabat, Maroc.
- [29] Annik. Bouroche, Michèle le Bars. (1994). Techniques de séparation par membranes : Vocabulaire français-anglais. P 60.
- [30] Kumar, M., Culp, T., & Shen, Y. (2017). Dessalement de l'eau : Histoire, avancées et défis. Dans *Frontiers of Engineering : Rapports sur les avancées de l'ingénierie lors du symposium de 2016*. Washington, DC : The National Academies Press.
- [31] AMOURA Ch, TOUMI R, (2020) ; « Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse », Mémoire Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA, Génie des procédés.
- [32] MAUREL.A., (2006), Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, 2^e édition TEC&DOC286p
- [33] Merrouche, Samir, « Contribution à l'amélioration des procédés de prétraitement dans une station de dessalement », Mémoire de Master, Université Saad Dahlab-Blida 1, 2015.
- [34] Guitoun, S. (2017). Utilisation des procédés membranaires dans le traitement des eaux de surface. Mémoire de Master en Génie de l'Environnement, École Nationale Polytechnique, sous la direction de M. Drouiche.
- [35] Rahal Soraya. (2017). Traitement Membranaire des Rejets Industriels. Mémoire de Master II en Chimie, option Analyse Spectrale en Chimie, Université Abd El-Hamid Ibn Badis, Mostaganem

[36] Bouguerouche Moussa & Hamiche Koussaïla. (2014). Commande d'un Système de Dessalement d'Eau de Mer par Osмосes Inverse. Projet de Fin d'Études en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en Automatique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger.

[37] Fatima Zohra DAHMANI, « Caractérisation physico-chimique des eaux de la station de dessalement de Fouka (Tipaza, Algérie) », Mémoire de Master Professionnel en Géo-Ressources, Université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de l'Univers, Département des Sciences de la Terre et de l'Univers, 2022.

[38] Rézim, F., & Tachetaou, K. (2020). Étude des performances de la station de dessalement d'eau de mer de Fouka Wilaya de Tipaza. Mémoire de Master, Université Saad Dahlab - Blida 1, Faculté de Technologie, Département des Sciences de l'Eau et Environnement.

[39] KAMECHE H, MADANI Kh (2017) ; « Gestion de la saumure de dessalement- cas de la station de Cap-Djinet-(W)- Boumerdes » Mémoire de Master, Université M'hamed Bougara, Boumerdes Département de Génie des Procèdes.

[39] (BWC « Beni Saf Water Company », Station de dessalement d'Eau de mer de Beni Saf).

[40] Mansour, M., & Zireg, M. (2019). La performance de la station de dessalement Chatt El-Hilal–Béni-Saf [Mémoire de master, Université Oran 2 Mohamed Ben Ahmed]. Département de Sécurité Industrielle et Environnement.

[41]__Beni Saf Water Company. (2023). Brochure 2023 – Debrief 11 mai. <https://benisafwatercompany.dz/wp-content/uploads/2023/10/brochure-2023-debrief-11-mai-4.pdf>

[42] (www.veoliawatertechnologies.ca/.../degrillage-fin-stationnaire/)

[43] PNUE Athènes, 2001 (dessalement de l'eau de mer dans les pays méditerranéens : évaluation des impacts sur l'environnement et lignes directrices proposées pour la gestion de la saumure) volume 183, P 1-67.

[44] SEBKI, M. S., & AISSAOUI, L. (2016). Étude paramétrique pour le dimensionnement du diffuseur de saumure de la méga station de dessalement de Magtaa (Mémoire de fin d'études, École Nationale Polytechnique, Département Hydraulique, Algérie).

- [45] Ettore. A. (2011). Vieillesse chimique de membranes d'osmose inverse, Thèse de Doctorat, l'université de Toulouse, Toulouse, 240P.
- [46] BENKADDA, C. E., & SLAMANI, M. (2022). Audit de conformité réglementaire dans le domaine de l'environnement : cas de la station de dessalement des eaux de mer de Fouka, wilaya de Tipaza [Mémoire de Master, Université de Blida 1, Faculté de Technologie, Département de Génie des Procédés].
- [47] Rashad.D; 2007. Desalination Plants: Potential impacts of brine discharge on marine life, Final Project, the University of Sydney, Australia.
- [48] Hoepner. Danis.P ; 2003. Dessalement de l'eau de mer ». Techniques de l'Ingénieur, traité Génie des procédés, J2 700.
- [49] Plan bleu. (2008). Eau, énergie, dessalement et changement climatique en Méditerranée, Centre d'Activités Régionales du PNUE/PAM.
- [50] Ecotoxicologie.fr. (s.d.). Le dessalement de l'eau de mer : quels impacts sur l'environnement ? [En ligne]. Disponible sur : <https://ecotoxicologie.fr/impacts-dessalement-eau-mer> Consulté le 11 avril 2025.
- [51] Mesleh.F 2014 : « Etude d'impact du dessalement sur l'environnement. Thèse de Master, Université de Blida, » 107P.