

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE SAAD DAHLAB – BLIDA 1

Faculté de Technologie
Département des Sciences de l'Eau et Environnement



MEMOIRE DE MASTER

Filière : Hydraulique

Spécialité : Ressources Hydrauliques

Étude de la performance de la station de dessalement de Bou-smail utilisant l'osmose inverse

Présenté par :

BOUCHELAGHEME Soufiane

TERKIA Nihal

Devant le jury composé de :

M. BESSENASSE Mohamed	Pr	USD Blida 1	Président
M. FILALI BELKACEM Mohamed	MAA	USD Blida 1	Examineur
M. BOUACH Ahcene	MCA	USD Blida 1	Promoteur

Promotion 2023/2024

DEDICACE

Je dédie ce mémoire à mes parents, pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements constants. Sans leur amour et leur motivation, ce travail n'aurait pas été possible.

À mon encadrant, Dr. Bouach, pour sa patience, ses conseils avisés et son encadrement précieux tout au long de cette étude.

Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet.

Merci à tous.

BOUCHELAGHEM Soufiane

Je dédie cet humble et modeste travail avec grand amour, sincérité et fierté :

A ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui,

Particulièrement à ma mère, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être.

*A mon bien aimé et unique frère Ishak, qui a toujours été là pour moi.
A mes proches.*

A mes chères amis et collègues.

A mon cher confident zinou.

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

Terkia Nihal

REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le Tout-Puissant et Miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre encadrant, M. Bouach Ahcene, pour son aide, son encouragement, ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Nous souhaitons exprimer notre gratitude et nos sincères remerciements à tous les membres du jury pour avoir bien voulu donner de leur temps pour lire ce travail et faire partie des examinateurs. Leurs critiques et commentaires seront bénéfiques pour enrichir nos connaissances dans ce domaine.

Nous remercions l'ensemble du personnel de la station de dessalement de Bou-smaïl, à leur tête M. Chamleli Adel, de nous avoir donné la chance de faire notre stage au sein de la station. Nous tenons également à remercier M. Djouabi Brahim pour ses conseils et orientations qui nous ont aidés à rédiger notre mémoire.

Nos vifs remerciements vont aussi à tous nos professeurs pour leur orientation, leur confiance et leur patience, qui ont constitué un apport considérable pour notre formation et notre enseignement durant toutes ces années d'études.

Enfin, nous tenons aussi à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ملخص: تحلية المياه هي تقنية حاسمة في إدارة الموارد المائية، خاصة في المناطق التي تعاني من نقص المياه. من بين الطرق المختلفة، يُعد التناضح العكسي حلاً فعالاً واقتصادياً من حيث الطاقة. تستخدم هذه العملية أغشية شبه نفاذة لإزالة الأملاح الذائبة من المياه، مما ينتج مياه شرب عالية الجودة. في هذه الدراسة، قمنا بتحليل أداء محطة التحلية في بوسماعيل مع مراعاة ثلاثة معايير: معدل التحويل، تركيز المياه المحلاة، واستهلاك الطاقة الخاصة. كما قمنا بمحاكاة تشغيل المحطة باستخدام برنامج IMSDesign. أظهرت النتائج أن المحطة كانت فعالة مع استهلاك محدد للطاقة (SEC) بقيمة 2.73 كيلووات ساعة/م³، وتركيز المياه المنفصلة بقيمة 74.7 ملغم / لتر، ومعدل تحويل بنسبة 45%. سمحت لنا محاكاة العملية باستخدام برنامج IMSDesign باختيار غشاء (SWC6-LD) أكثر كفاءة من الغشاء الحالي. أظهرت المقارنة بين النظام المقترح والنظام الحالي أن الأخير يمكن تحسينه بشكل أكبر في المستقبل.

الكلمات المفتاحية: تحلية المياه، التناضح العكسي، موارد المياه، أغشية شبه نفاذة، IMSDesign

Abstract: Water desalination is a crucial technique in managing water resources, particularly in regions suffering from shortages. Among the different methods, reverse osmosis stands out as an effective and energy-efficient solution. This process uses semi-permeable membranes to remove dissolved salts from water, producing high-quality drinking water. In this study, we analyzed the performance of the Bousmaïl desalination plant by considering three parameters: the conversion rate, the permeate concentration, and the specific energy consumption. We also simulated the plant's operation using the IMSDesign software. The results showed that the plant performed well with a specific energy consumption (SEC) of 2.73 kWh/m³, a permeate concentration of 74.7 mg/l, and a conversion rate of 45%. The process simulation with IMSDesign allowed us to select a (SWC6-LD) membrane, which is more efficient than the current membrane. The comparison between the proposed system and the current system showed that the latter could still be further improved in the future.

Keywords : desalination, reverse osmosis, water resources, semi-permeable membranes, IMSDesign.

Résumé : Le dessalement de l'eau est une technique cruciale dans la gestion des ressources en eau, particulièrement dans les régions souffrant de pénurie. Parmi les différentes méthodes, l'osmose inverse s'impose comme une solution efficace et économique en termes d'énergie. Ce procédé utilise des membranes semi-perméables pour éliminer les sels dissous de l'eau, produisant ainsi de l'eau potable de haute qualité. Dans cette étude, nous avons analysé la performance de la station de dessalement de Bou-smaïl en tenant compte de trois paramètres : le taux de conversion (R), la concentration de perméat (Cp) et l'Énergie de Consommation Spécifique (ECS). Nous avons également simulé le fonctionnement de la station en utilisant le logiciel IMSDesign. Les résultats ont montré que la station était performante avec une consommation spécifique d'énergie (CSE) de 2.73 kWh/m³, une concentration de perméat de 74.7 mg/l et un taux de conversion de 45%. La simulation du processus avec le logiciel IMSDesign nous a permis de sélectionner une membrane (SWC6-LD) plus efficace que la membrane actuelle. La comparaison entre le système proposé et le système actuel a montré que ce dernier peut encore être amélioré à l'avenir.

Mots clés : dessalement, osmose inverse, ressources en eau, membranes semi-perméables, IMSDesign

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX	7
LISTE DES FIGURES.....	8
LISTE DES NOTATIONS	9
INTRODUCTION GENERALE	11
1 Généralité sur le dessalement.....	15
1.2 Historique de dessalement.....	15
1.3 Le dessalement dans le monde	16
1.3.1 Le dessalement au moyen orient	18
1.3.2 Le dessalement au Europe	20
1.3.3 le dessalement dans l’Afrique	21
1.4 Le dessalement en Algérie.....	22
1.5 Définition de l’eau saumâtre et de l’eau de mer.	24
1.6 Caractéristiques d’eau de mer	25
1.6.1 Salinité	25
1.6.2 Température.....	26
1.6.3 Matière en suspension	27
1.7 Les types de procédés industriels utilisés dans le dessalement	27
1.7.1 Procédés thermiques (distillation)	28
1.7.2 Procédés à membranes.....	32
1.8 Etapes de dessalement.....	34
2 Technique de l’osmose inverse	37
2.2 Procédés membranaires.....	37
2.3 Principe de l’Osmose Inverse	39
2.4 Caractéristiques principales d’osmose inverse	40
2.4.1 Mécanisme de transfert	40
2.4.2 Le taux de conversion.....	40
2.4.3 Le taux de rétention (sélectivité)	41
2.4.4 Densité de flux de perméat	41
2.4.5 Pression osmotique.....	41
2.5 Différents types des membranes	43
2.5.1 Membranes organiques	43
2.5.2 Membranes minérales ou inorganiques	43
2.5.3 Membranes composites.....	43

2.5.4	Membranes échangeuses d'ions	44
2.6	Les modules de l'osmose inverse.....	44
2.6.1	Modules tubulaires.....	44
2.6.2	Modules fibres creuses.....	45
2.6.3	Modules plans	46
2.6.4	Modules spirales.....	46
2.7	Domaines d'application de la technique membranaire	47
2.7.1	Osmose inverse (OI)	48
2.7.2	Nanofiltration (NF)	48
2.7.3	Ultrafiltration.....	48
2.7.4	Microfiltration	49
2.8	Colmatage des membranes.....	49
2.9	Nettoyage des membranes d'osmose inverse.....	51
2.10	Durée de Vie des Membranes.....	51
3	Présentation de la station de Bousmail.....	54
3.1	Localisation de la station de Bousmail	54
3.2	Capacité de la station.....	55
3.3	Installation et processus.....	56
3.4	La qualité d'eau d'entrée.....	57
3.5	Conditions environnementales de référence.....	58
3.6	Qualité de l'eau exigée aux différentes phases du processus.....	59
3.7	Description de l'installation.....	59
3.7.1	Prise d'eau de mer.....	59
3.7.2	Pompage d'eau de mer.....	60
3.7.3	Prétraitement	62
3.7.4	Système de dessalement.....	71
3.7.5	Post-traitement.....	75
3.7.6	La salle de contrôle.....	78
4	Etude de la performance de la station de Bousmail	81
4.1.	Analyse des paramètres physico-chimique.....	81
4.1.1.	Échantillonnage et méthodologie.....	81
4.1.2.	Résultats des analyses :.....	82
4.1.3.	Interprétation et discussion des résultats.....	83
4.2	Calcul des paramètres de performance de la station de dessalement.....	85
4.2.1	Taux de Conversion (R).....	85
4.2.2	Concentration de perméat (Cp) :.....	86

4.2.3	Énergie de Consommation Spécifique (ECS).	87
4.2.4	Discussion pour les résultats obtenant.	89
4.3	Simulation du processus de dessalement par le logiciel IMSDeseign.....	90
4.3.1	Configuration des Paramètres Chimiques.....	91
4.3.2	Sélection du Modèle de Membrane :.....	91
4.3.3	Calcul de l'Énergie de Consommation Spécifique.	92
4.3.4	Impact de l'Utilisation de la Pompe Booster.....	93
4.3.5	Comparaison entre les membranes SW30 HRLE400 et SWC6.....	94
CONCLUSION GENERALE		99
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		100

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. 1 : les usines de dessalement de l'eau de mer les plus importants au Monde.	17
Tableau 1. 2 : la capacité de quelque wilaya dans l'Algérie.	24
Tableau 1. 3 : la composition ionique de l'eau de mer Méditerranée.	26
Tableau 2. 1 : avantages et les inconvénients des procédés par osmose inverse.	39
Tableau 2.2 : avantages et inconvénients des membranes organiques suivant leur composition.	43
Tableau 3. 1 : capacité de la station de dessalement de Bou-smaïl.	55
Tableau 3. 2 : débits de conception utilisés pour la station.	56
Tableau 3. 3 : composantes chimiques d'eau de mer à l'entrée de la station.	57
Tableau 3. 4 : différentes conditions environnementales de référence.	58
Tableau 3. 5 : les équipements de la station du pompage d'eau de mer.	61
Tableau 3. 6 : les équipements de la station du pompage d'eau décantée.	63
Tableau 3. 7 : décanteur lamellaire.	64
Tableau 3. 8 : caractéristiques des filtres à sable.	65
Tableau 3. 9 : les équipements de système de nettoyage des filtres.	66
Tableau 3. 10 : filtres à cartouche 5 microns.	67
Tableau 3. 11 : caractéristiques de dosage d'hypochlorite de sodium en prétraitement.	69
Tableau 3. 12 : dosage d'hydroxyde de sodium.	69
Tableau 3. 13 : caractéristiques de dispersant.	70
Tableau 3. 14 : caractéristiques du bisulfite de sodium.	70
Tableau 3. 15 : Pompage à haute pression et récupération d'énergie.	71
Tableau 3. 16 : blocs d'osmose inverse.	73
Tableau 3. 17 : système de nettoyage chimique.	74
Tableau 3. 18 : système de rinçage (flushing).	75
Tableau 3. 19 : stockage et dosage d'hydroxyde de calcium.	76
Tableau 3. 20 : stockage et dosage d'hypochlorite de sodium.	77
Tableau 3. 21 : pompage d'eau traitée.	78
Tableau 4. 1 : analyse des paramètres d'eau brute/eau décanté au matin et à l'après midi.	82
Tableau 4. 2 : analyse de la turbidité d'eau filtrée au matin et à l'après midi.	82
Tableau 4. 3 : analyse de la turbidité d'eau micro-filtrée au matin et à l'après midi.	83
Tableau 4. 4 : analyse de la conductivité d'eau de perméat au matin et à l'après midi.	83
Tableau 4. 5 : analyse des paramètres d'eau traitée au matin et à l'après midi.	83
Tableau 4. 6 : caractéristiques des différents membranes	92
Tableau 4. 7 : consommation de l'énergie spécifique des différents types de membranes.	93
Tableau 4.8 : comparaison entre les membranes SW30 HRLE400 et SWC6.	96

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1. 1</i> : carte de capacité d'eau de mer dans le monde.	17
<i>Figure 1. 2</i> : station de dessalement Ras El Khairdans Arabie saoudite.	19
<i>Figure 1. 3</i> : carte des usines de dessalement de l'eau de mer dans les pays du golfe.	20
<i>Figure 1. 4</i> : évolution des capacités de dessalement d'eau de mer au Moyen-Orient	21
<i>Figure 1. 5</i> : production d'eau dessalée en méditerranée en millions de m ³ d'eau par an.	22
<i>Figure 1. 6</i> : répartition des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie.	23
<i>Figure 1. 7</i> : principaux procédés industriels de dessalement d'eau de mer.	27
<i>Figure 1. 8</i> : domaines d'utilisation des différentes techniques de déminéralisation.	28
<i>Figure 1. 9</i> : principe de distillation.	29
<i>Figure 1. 10</i> : principe de fonctionnement d'un système par détentes successives	30
<i>Figure 1. 11</i> : schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED).	31
<i>Figure 1. 12</i> : schéma de principe d'une unité d'évaporation simple-effet.	31
<i>Figure 1. 13</i> : principe de l'osmose inverse.	32
<i>Figure 1.14</i> : processus ED simplifié.	33
<i>Figure 1.15</i> : système de dessalement d'eau de mer.	34
<i>Figure 2. 1</i> : schéma de principe du fonctionnement d'une membrane permselective.	38
<i>Figure 2. 2</i> : schéma de fonctionnement de la membrane d'osmose inverse.	39
<i>Figure 2. 3</i> : principe d'osmose inverse.	40
<i>Figure 2. 4</i> : schéma général d'une installation d'osmose inverse	42
<i>Figure 2. 5</i> : schéma de principe d'un module tubulaire.	45
<i>Figure 2. 6</i> : schéma de principe d'un module à fibres creuses.	46
<i>Figure 2. 7</i> : configuration générale du module plan.	46
<i>Figure 2. 8</i> : membranes en spirale.	47
<i>Figure 2. 9</i> : différents composés rencontrés dans les eaux naturelles.	48
<i>Figure 2. 10</i> : types d'éléments à séparer de l'eau (avec l'échelle de taille).	49
<i>Figure 2. 11</i> : mécanismes de colmatage.	50
<i>Figure 2. 12</i> : schéma du système de nettoyage des membranes.	51
<i>Figure 3. 1</i> : station de dessalement Bou-smail.	54
<i>Figure 3. 2</i> : Image de la station de Bou-smail par Google Earth.	55
<i>Figure 3. 3</i> : prise d'eau.	60
<i>Figure 3. 4</i> : les pompes centrifuges à axe vertical de 500 m ³ /h.	61
<i>Figure 3. 5</i> : les pompes centrifuges à axe horizontal.	62
<i>Figure 3. 6</i> : décanteur lamellaire.	63
<i>Figure 3. 7</i> : filtres à sable fermés.	65
<i>Figure 3. 8</i> : dispositif de dosage d'hypochlorite de sodium.	68
<i>Figure 3. 9</i> : le bloc de l'osmose inverse.	73
<i>Figure 3. 10</i> : cuves de préparation de lait de chaux.	76
<i>Figure 3. 11</i> : salle de contrôle de la station.	79
<i>Figure 4. 1</i> : configuration des paramètres chimiques dans le logiciel IMSDesign.	91
<i>Figure 4. 2</i> : les différentes membranes proposées.	92

LISTE DES NOTATIONS

C	Concentration molaire du soluté
CE	Conductivité électrique
C _f	Concentration du sel dans l'eau d'alimentation (brute)
C _p	Concentration de perméat
E _c	Energie consommée
ED	Électrodialyse
ECS	Energie de Consommation Spécifique
<i>g</i>	Accélération de la gravité
<i>H</i>	Pression de pompage
HP	Haute Pression
I	Nombre d'espèces d'ions constituant le soluté ;
J _p	Densité de flux de perméat ;
LSI	Indice de Saturation de Langelier (Langelier Saturation Index)
MSF	Distillation éclair multi-étage (Multi-Stage Flash)
MRE	Ministère des Ressources en Eau
ME	Procédé à effets multiples (Distillation Multi-Effect)
NTU	Unité de Turbidité Néphélométrique (Nephelometric Turbidity Unit)
<i>OI</i>	Osmose Inverse
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
<i>Q</i>	Débit
Q _p	Débit de perméat
Q _f	Débit d'alimentation
pH	Potentiel Hydrogène
P _{h1}	Puissance hydraulique des pompes à haute pression
P _{h2}	Puissance hydraulique des pompes boosters.
P _{ht}	Puissance hydraulique totale
P _A	Puissance absorbée
P _{A1}	Puissance absorbée des pompes à haute pression
P _{A2}	Puissance absorbée des pompes boosters
P _{At}	Puissance absorbée totale
PLC	Contrôleur Logique Programmable (Programmable Logic Controller)
ppm	Parts per million
R	Taux de conversion.
R _p	la constante des gaz parfaits (8,31J/mol. K) ;
SCADA	Contrôle et Acquisition de Données (Supervisory Control and Data Acquisition"Supervision)
SDI	Indice de Densité de Boues (Silt Density Index)
S _M	Surface membranaire
SR	Taux de rejet de sel.
t	Temps de fonctionnement
T	Température
VC	Procédé par Compression de Vapeur (Vapor Compression)
V _p	Volume de perméat
Π	Pression osmotique
ρ	Masse volumique de l'eau

Introduction

générale

INTRODUCTION GENERALE

L'Eau douce est une matière essentielle dans notre vie quotidienne, sa disponibilité dans le monde diminue sous l'effet de la croissance démographique et du changement Climatique, Pour satisfaire la demande en eau douce dans des régions où les réserves Sont insuffisantes. Plusieurs pays ont fait appel au dessalement de l'eau de mer.

La croissance démographique dans le monde s'accompagne d'une augmentation de la demande d'eau potable tandis que l'industrialisation, l'irrigation des sols et l'élévation des niveaux de vie se traduisent par un accroissement supplémentaire de la consommation d'eau douce par habitant.

L'eau douce, facilement accessible dans les lacs, les fleuves et certaines nappes phréatiques, ne représente que 0,07 % de l'ensemble des ressources en eau, soit environ 1 million de kilomètres cubes. Toutefois, sa répartition est très hétérogène dans le monde. Par contre L'eau salée, présente partout sur notre globe. Elle représente environ 97 % de l'eau totale de la Terre et couvre la plus grande partie de notre planète dans les immenses océans et mers.

L'utilisation d'eau douce dans le monde a augmenté de près de 1 % par an, sous l'effet conjugué du développement socio-économique et de l'évolution consécutive des modes de consommation, notamment des régimes alimentaires. Alors que l'agriculture exploite environ 70 % des volumes d'eau douce prélevés, les usages industriels environ 20 % et la consommation domestique environ 10 % constituent les principaux facteurs d'augmentation de la demande en eau, au fur et à mesure que les économies s'industrialisent, que les populations s'installent en ville et que les systèmes de distribution d'eau et d'assainissement s'élargissent.

On estime que près de la moitié de la population mondiale est confrontée à de graves pénuries d'eau pendant au moins une partie de l'année. Un quart d'entre nous est exposé à des niveaux « extrêmement élevés » de stress hydrique alors que nous utilisons plus de 80 % des réserves annuelles renouvelables d'eau douce.

Les tensions pour l'eau ne peuvent que s'accroître en raison d'une part d'une croissance démographique mondiale absolue qui reste forte, et d'autre part du réchauffement climatique qui multiplie les épisodes de sécheresse et affecte les réserves d'eau douce de surface. Face à

cette situation, le dessalement de l'eau de mer est devenu une nécessité au niveau mondial (*Salomon*, 2012).

Selon divers rapports préparés par des experts et des organismes spécialisés dans le domaine des ressources en eau, plusieurs pays subissent une pénurie d'eau, parmi ces pays l'Algérie, qui est classé selon un rapport de la banque mondiale parmi les 17 pays africains qui souffrent de la pauvreté de l'eau à horizon 2025 (*Touidjeni & Benarab*, 2014).

La technologie de dessalement de l'eau de mer est considérée comme méthode importante, même si le débat est engagé autour de son coût, elle est utilisée aujourd'hui à l'échelle mondiale. Elle a contribué de manière significative à résoudre la crise de la pénurie d'eau pour un grand nombre de pays. En Algérie le dessalement d'eau de mer a contribué efficacement à améliorer l'accès à l'eau surtout dans les zones urbaines (*Touidjeni & Benarab*, 2014).

Parmi les différentes technologies de dessalement, l'osmose inverse est la plus répandue. Pour séparer les sels dissous de l'eau, elle utilise une membrane semi-perméable. L'eau traverse la membrane sous l'influence d'une forte pression, laissant derrière elle les impuretés et les sels. Cette technique est à la fois efficace et fiable, garantissant un taux de réjection des sels élevé et une qualité de l'eau traitée satisfaisante. Toutefois, elle requiert une consommation d'énergie considérable, ce qui pose un défi en termes de dépenses et d'impact sur l'environnement. Des progrès récents ont pour objectif d'optimiser l'efficacité énergétique et de diminuer les dépenses opérationnelles, ce qui rend l'osmose inverse encore plus intéressante pour les applications de dessalement.

Notre travail vise à évaluer la performance de la station de dessalement de Bou-smaïl, en se concentrant sur des paramètres clés tels que le taux de conversion, la concentration de perméat et l'énergie spécifique. En utilisant le logiciel IMSDesign, nous avons simulé et optimisé ces paramètres pour proposer des améliorations potentielles à la station. L'objectif est de fournir une analyse détaillée et des recommandations pratiques pour améliorer l'efficacité opérationnelle et la durabilité de la station de dessalement de Bou-smaïl. Notre travail se divise en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, des notions générales sur les systèmes de dessalement sont présentées, telles que les procédés membranaires et thermiques.

Dans le deuxième chapitre, le procédé d'osmose inverse est exposé en détail, incluant la membrane utilisée, ses différents types et caractéristiques.

Dans le troisième chapitre, la station de dessalement d'eau de mer de Bou-smaïl est présentée, avec une explication de ses caractéristiques.

Dans le quatrième chapitre, les résultats des différents échantillonnages, le calcul des indices de performance de la station de Bou-smaïl, ainsi que les résultats de la simulation via le logiciel IMSDesign sont présentés.

Chapitre 1

1 Généralité sur le dessalement

Introduction

La pénurie en eau semble devenir une perspective inquiétante pour l'humanité. Aujourd'hui les pays en situation de stress hydrique sont de plus en plus nombreux tandis que les besoins ne cessent de grandir. Face à ce constat, nombre de solutions technique sont été apportées dont celle du dessalement de l'eau de mer. Cette activité est en pleine expansion du fait d'une amélioration constante des techniques et d'un coût de plus en plus réduit. (*Salomon, 2012*)

1.2 Historique de dessalement

Depuis des temps anciens on avait constaté qu'en portant à ébullition de l'eau saline on obtenait, par condensation de la vapeur, de l'eau douce.

La première application industrielle de l'évaporation-condensation a été faite à bord des navires à vapeur vers 1880. Bien que en 1920 que la première usine de dessalement par voie thermique fut installée à Jeddah en Arabie Saoudite. Ce n'est qu'à partir de 1960 que des usines de grande capacité voient le jour, principalement au Moyen-Orient.

Les usines de dessalement d'eau de mer utilisant le principe de l'osmose inverse apparaissent à la fin des années 1970 (*Rezim & Tachetaoui, 2020*). Avant le XXIe siècle, la technologie des membranes d'osmose inverse était monopolisée par les pays développés mais ce n'est qu'à la fin des années 1990 que la chine a commencé à maîtriser la technologie de production des membranes d'osmose inverse (*Lzexport, 2003*).

Actuellement, d'après l'inventaire mondial de l'association internationale de dessalement dans le monde, les stations de dessalement produisent enivrent 56 millions de m³/j, dans 120 pays. Les pays de Moyen-Orient, et en particulier ceux du Golf-Persique, ont atteint 12 millions de m³/j : l'Arabie Saoudite dispose de 23.6 % du totale elle est suivie par les États-Unis avec 16.3 %, les Émirats Arabes Unis avec 16.3 % et le Koweït 6.4 % (*Rezim & Tachetaoui, 2020*).

1.3 Le dessalement dans le monde

En 2023, le nombre d'installations de dessalement de l'eau de mer en activité dans le monde s'élève à près de 23 000, ce qui représente le double du nombre d'il y a dix ans. Le secteur enregistre une croissance de capacité annuelle estimée entre 6 et 12 %. Ces installations varient considérablement en termes de volume de production, allant jusqu'à 900 000 mètres cubes d'eau par jour pour les plus grandes usines, entre 500 000 et 600 000 mètres cubes par jour pour les installations de taille très importante, et entre 200 000 et 300 000 mètres cubes par jour pour les centrales de taille significative. Il convient de noter qu'il existe également des dizaines de milliers d'unités de petite et moyenne taille, utilisant une gamme diversifiée de technologies.

Le dessalement est largement concentré dans les pays du Moyen-Orient qui représentent à peu près 50 % des capacités mondiales. Rien que dans les pays du Golfe, entre 2019 et 2020, la croissance des capacités installées est de l'ordre de 1,2 million de m³d'eau dessalée. Les États du Golfe se démarquent dans ce processus avec des immenses usines. Ainsi, l'Arabie Saoudite ou le Qatar ont construit des usines capables de dessaler plus de 200 000m³/j, par unité alors que d'autres usines se contentent de capacités inférieures à 1 000 m³/j. Par exemple, l'usine d'Umm al Houl au Qatar a une capacité de 282 000 m³/j ; celle de Jebel Ali aux Émirats Arabes Unis (EAU) a une capacité de 2 millions de m³ par jour. L'eau dessalée par ces nouvelles méga-usines permet majoritairement d'alimenter des centres urbains en expansion. Aux EAU, 90 % de l'eau potable vient du dessalement, 95 % au Koweït et 90 % au Qatar. D'autres marchés émergent progressivement ailleurs, alimentés par les sécheresses et la croissance démographique. C'est le cas en Afrique du Nord, en Amérique mais aussi dans certaines zones d'Asie (*Marc-Antoine & Élise*, 2022).

47 millions de m³ d'eau sont produits par jour à partir de la mer soit 660 000 litres, d'eau douce dessalée chaque seconde. Ce qui ne finalement que 0,45 % de l'eau douce consommée chaque jour mais au totale près de 1,8 milliards de m³ d'eau chaque année (*Tpe dessalement maroc*, 1975).

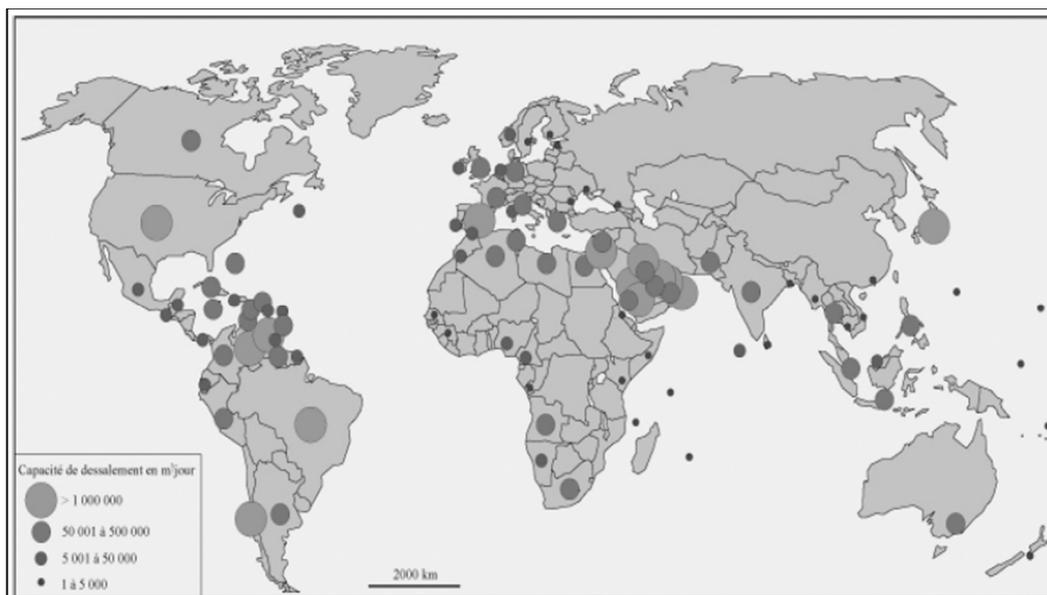


Figure 1. 1 : carte de capacité d'eau de mer dans le monde (*Salomon, 2012*)

Tableau 1. 1 : les usines de dessalement de l'eau de mer les plus importants au Monde (*Rowater, 2022*).

N° ordre	Usine	Pays	Capacité (m ³ /j)
01	Ras El Khair	Arabie saoudite	1036 000
02	Taweelah	Émirats Arabie unis	909 200
03	Shuaiba	Arabie saoudite	880 000
04	Jubail	Arabie saoudite	800 000
05	Umm al Quwain	L'émirat	682 900
06	Dewa station M	Dubaï	636 000
07	Sorek	Palestine	624 000
08	Jubail 3A IWP	Arabie saoudite	600 000
09	Sorek 2	Palestine	570 000
10	Fujairah 2	Émirats Arabie unis	591 000

11	Mactaâ	Algeria	500 000
----	--------	---------	---------

1.3.1 Le dessalement au moyen orient

Les pays du golfe sont ainsi devenus les plus gros consommateurs l'eau dessalée du monde : 816 m³ par personne et par an. En Arabie saoudite, par exemple, l'eau était gratuite jusqu'à 2017, alors qu'elle est une des plus chère du monde à produire. Au Koweït, sa consommation a été multipliée par cinq en trente ans, pour une population qui a doublé. À Oman, la demande progresse de 5% par an (*Jean-Claude*, 2018).

1.3.1.1 Dessalement aux Émirats Arabes Unis

Les EAU sont un pays désertique avec des ressources en eau douce très rares, nécessitant 650 m³ d'eau par jour. Aux Émirats Arabes Unis, il existe des aquifères salins estimés à huit fois la salinité de l'eau de mer, ce qui signifie qu'elle est impropre à la consommation humaine. Le gouvernement d'Abou Dhabi a investi massivement dans le dessalement de l'eau de mer et a établi huit stations dans le pays pour un coût de plus de 10 milliards dollars, Ces stations sont gérées par un partenariat d'investisseurs étrangers.

Au dernier temps, Abou Dhabi lance un appel d'offres pour la construction d'une station de dessalement de l'eau de mer (Jebel Ali), avec une capacité de traitement de 900 000 m³ par jour (*Diplomatie*, 2024).

1.3.1.2 Dessalement en Arabie saoudite

La plupart du territoire de l'Arabie saoudite est couverte par les déserts, c'est un pays avec des ressources d'eau potable très rares. Dans le domaine du dessalement de l'eau de mer, l'Arabie saoudite a toujours été le premier du Moyen-Orient. Pour résoudre le problème de manque d'eau des habitants. En 1928, ils avaient déjà construit deux usines de dessalement d'eau par distillation. Même si à l'époque, ces usines étaient rudimentaires, et la capacité de production était faible, ils avaient trouvé leur solution pour l'eau douce. Le dessalement à grande échelle à partir des années 60. Le premier producteur mondial d'eau dessalée (usine de Jubail) avec une capacité de production journalière de 117 000 m³. Le pays possède 30 stations de dessalement réparties de long du littoral du pays avec 21 situé le long de la mer rouge et six situées sur la côte Est. Les installations de dessalement utilisent trois procédés de dessalement différent avec sept usines utilisant le procédé de distillation à effets multiples, huit usines utilisant la technologie d'osmose inverse et 12 utilisant le processus de distillation

multi-étapes. Le pays possède la plus grande usine de dessalement flottante au monde (Ras Al Khair) d'une capacité de production allant jusqu'à 1036 000 m³/jour (*Weebly*, 2014).



Figure 1. 2 : station de dessalement Ras El Khair dans Arabie saoudite. (*Technology*, 2017)

1.3.1.3 Dessalement au Koweït

Il existe huit usines de dessalement au Koweït, situées le long de la côte, avec une capacité installée totale de 3,11 Mm³/j. (*Fanack*, 2024)

Le Koweït utilise principalement la distillation éclair multi-étages (MSF) de l'eau de mer pour fournir de l'eau potable. La majeure partie de cette eau est produite par des centrales de cogénération de dessalement d'énergie, dans lesquelles le pétrole ou le gaz est utilisé pour produire de l'électricité et la chaleur excédentaire est utilisée pour le processus MSF. (*Finan, & Kazimi*, 2013)

1.3.1.4 Dessalement au Qatar

Le Qatar est le 5^{ème} pays le plus pauvre en eaux naturelles avec un coefficient de disponibilité en eau par personne et par an de 94 m³. Ce pays a donc été l'un des premiers pays à désaliniser l'eau, depuis plus de 20 ans. La production quotidienne actuelle est d'environ 500 000 m³ et devrait atteindre 1.4 millions début 2011. La nouvelle usine Ras

Girtas, au sud de Ras Laffan représentera 20 à 30 % de la production nationale. (*Scribd*, 2011)

1.3.1.5 Dessalement à Oman

Oman c'est un pays de la péninsule d'Arabie, se compose d'un désert, d'oasis dans le lit de rivières et de longs littoraux sur le Golfe Persique, la mer d'Arabie et le golfe d'Oman.

En juin 2018, l'usine de Barka est mise en service, elle est considérée comme la plus grande station de dessalement de l'eau de mer du Sultanat d'Oman, avec environ 281 000 m³/jour, et 14 stations de dessalement de l'eau de mer sont en activité dans le Sultanat, et des appels d'offres ont été lancés pour trois usines, d'une capacité totale de 600 000 m³/j. (*Lesechos*. 2024)

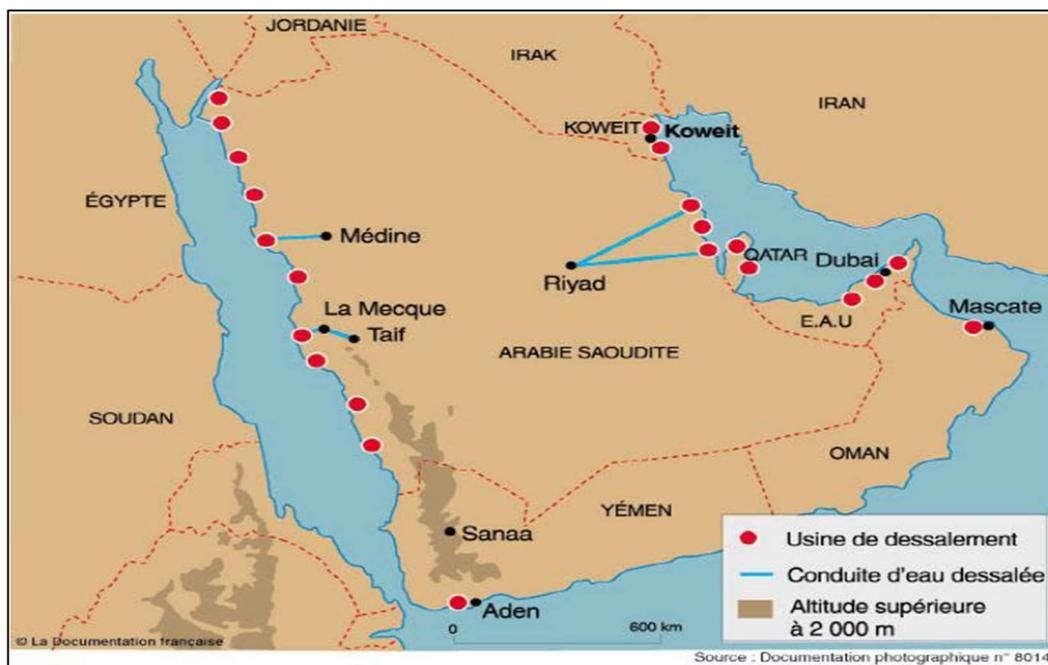


Figure 1. 3 : carte des usines de dessalement de l'eau de mer dans les pays du golfe (*Encyclo-Ecolo*, 2012).

1.3.2 Le dessalement au Europe

La plus grande usine d'Europe de dessalement de l'eau de mer est installée près de Barcelone, en Espagne. Elle transforme l'eau salée en eau douce potable. Elle a été construite après la sécheresse qui a frappé la Catalogne en 2008. De nombreux pays produisent de l'eau dessalée. Ce procédé est cependant coûteux en énergie selon le directeur de l'Office international de l'eau, Jean-François Donzier. (*Suezwaterhandbook*, 2024)

1.3.3 Le dessalement dans l'Afrique

L'ambition est forte. L'Égypte veut produire 3,3 millions de mètres cubes d'eau dessalée par jour en 2025 contre 800 000 aujourd'hui. Le Fonds souverain égyptien a été mandaté par le gouvernement pour mobiliser les trois milliards de dollars nécessaires à la construction de 21 usines. Cette première phase du plan dessalement est régulièrement annoncé à grand renfort de publicité par les autorités égyptiennes qui peinent cependant à convaincre les bailleurs (*Rfi*, 2024).

L'Algérie occupe la première place en Afrique et la deuxième dans le monde arabe (après l'Arabie saoudite) en termes de capacités de production de l'eau dessalée, selon Toufik Hakkar, PDG de la Sonatrach qui supervise ce programme à travers sa filiale "Algerian Energy Company" (*Aps*, 2024).

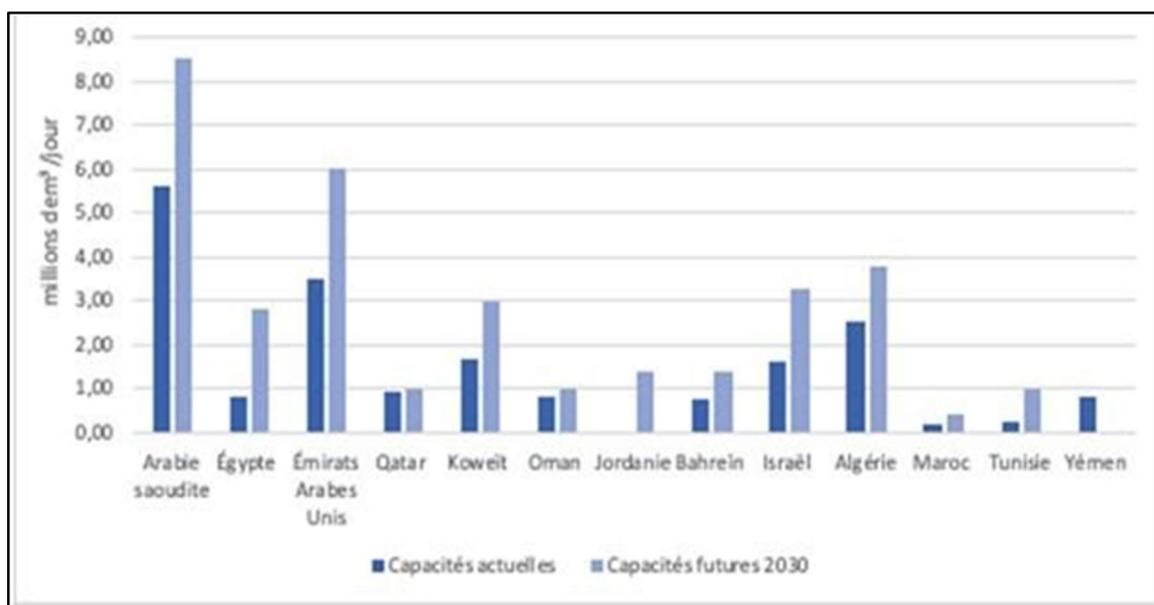


Figure 1. 4 : évolution des capacités de dessalement d'eau de mer au Moyen-Orient et en nord d'Afrique en millions de m³ par jour (*Marc-Antoine et Élise*, 2022).

La Méditerranée représente environ un quart du dessalement mondial. Les experts estiment que Vers 2030, la région pourrait approcher le chiffre du dessalement mondial actuel (soit environ de 30 à 40 millions de m³/j). (*Marc-Antoine et Élise*, 2022)

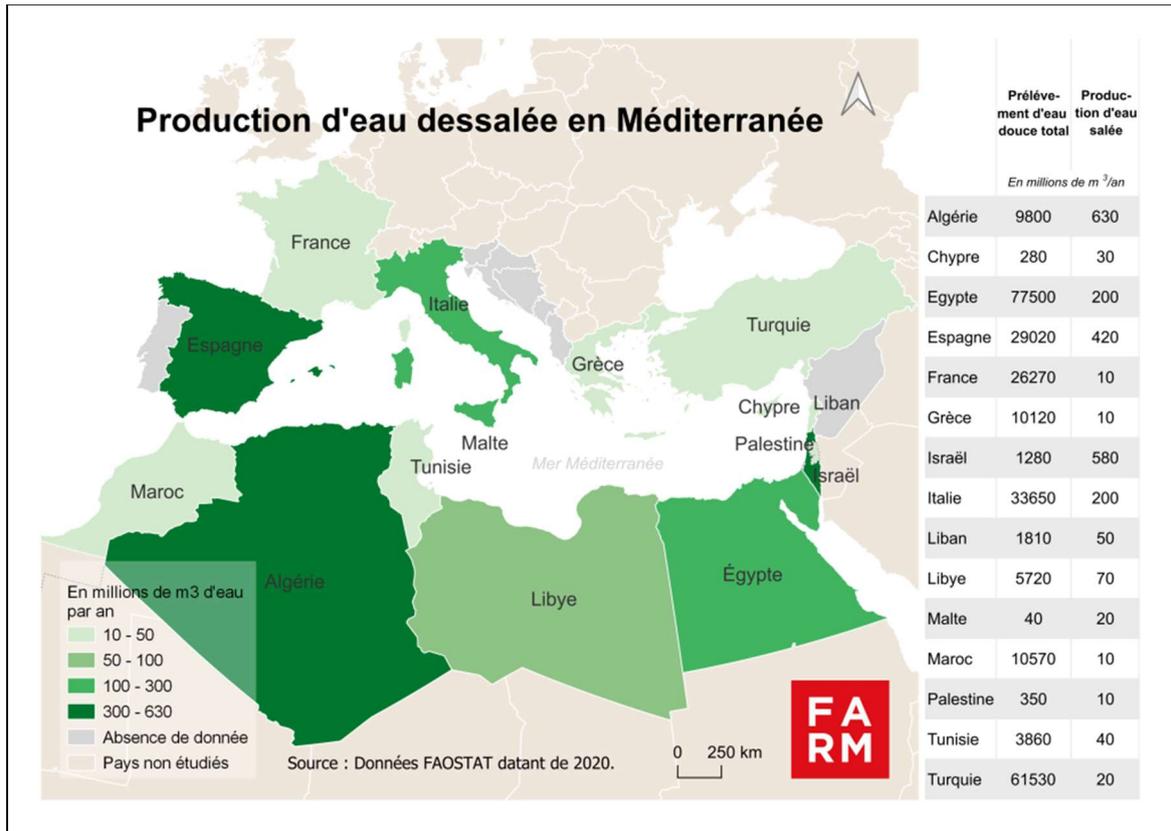


Figure 1. 5 : production d'eau dessalée en méditerranée en millions de m³ d'eau par an. (Sia-Partners, 2024)

1.4 Le dessalement en Algérie

L'Algérie a vécu plus d'une décennie la sécheresse, les ressources conventionnelles en eau étaient insuffisantes pour subvenir aux besoins de la population, ceux qui a incité les autorités algériennes à chercher d'autres ressources pour garantir l'alimentation en eau potable de cette population. La solution la plus adaptée et qui ne dépend pas des aléas climatiques, était le dessalement d'eau de mer.

L'expérience de l'Algérie dans le domaine du dessalement des eaux est directement liée au développement de son industrie pétrolière et sidérurgique. Le recours au dessalement dans le but exclusif de fournir de l'eau potable à la population est pratiquement inexistant. Cependant, une seule tentative a été entreprise dans une situation où aucune autre solution n'était disponible. Il s'agit de l'unité de déminéralisation d'Ouled Djellal, située dans la wilaya de Biskra, dans le sud-est de l'Algérie.

Dans le secteur industriel, la déminéralisation et le dessalement sont utilisés pour garantir l'approvisionnement en eau de chaudière, en eau de refroidissement et en eau de

traitement. En 1964, trois petits blocs de 8 m³/h chacun ont été installés au complexe du gaz liquéfié d'Arzew, une ville côtière à l'ouest du pays. Le procédé utilisé était "à tubes submergés", fonctionnant à basse pression. En 1969, une autre installation a été mise en place à Arzew, avec une capacité de production de 4560 m³/jour. Le procédé utilisé était le MSF « Multi-Stage Flash » (*Bessenasse & Filali, 2014*).

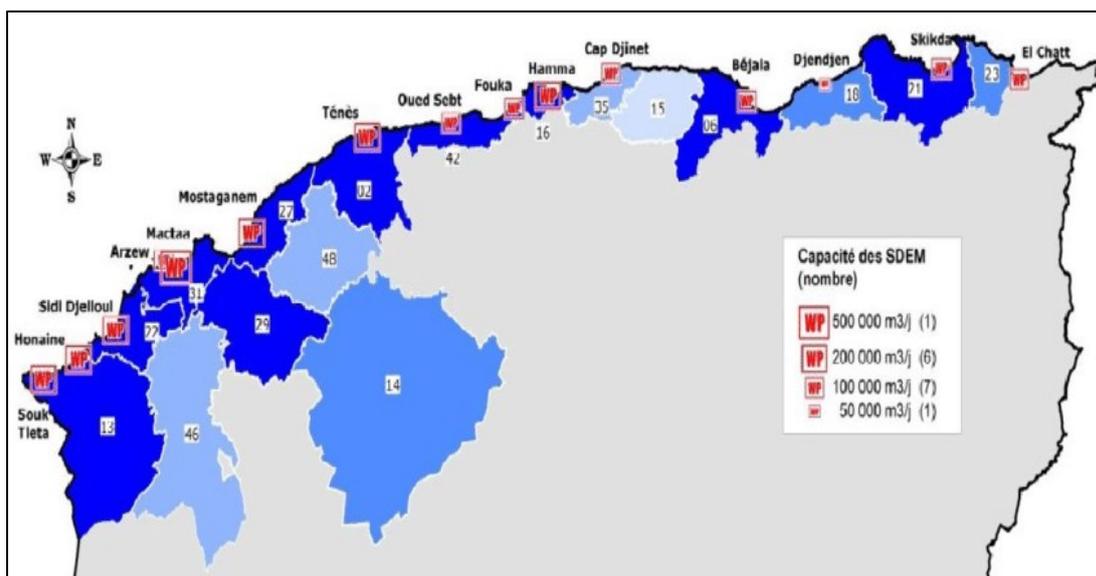


Figure 1. 6 : répartition des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie (*Salomon, 2012*).

Dés lors de nombreuses installations de dessalement et de déminéralisation ont été mises en place en parallèle avec les nouveaux complexes. D'autres installations ont été mises en exploitation pour les besoins en eau de haute pureté nécessaire à l'activité des complexes de production d'électricité (Cap Djanet à l'est d'Alger) et l'industrie de liquéfaction (Arzew et Skikda). Egalement quelques installations sont destinées, principalement dans le Sud, à fournir de l'eau de qualité pour la consommation humaine dans les bases pétrolières (*Bessenasse, 2006*).

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

Tableau 1. 2 : la capacité de quelque wilaya dans l'Algérie (*Bessenasse & Filali, 2014*).

wilaya	stations de dessalement	production
Tlemcen	Honaïe	200 000 m ³ /j
	Souk tléta	200 000 m ³ /j
Chlef	Ténès	200 000 m ³ /j
Mostaganem	Mostaganem	200 000 m ³ /j
Boumerdès	Cap djinet	100 000 m ³ /j
Aïn Témouchent	Béni saf	200 000 m ³ /j
Alger	El Hamma	200 000 m ³ /j
Tipaza	Fouka	200 000 m ³ /j
	Oued sebt	100 000 m ³ /j
	Bou-smaïl	10 000 m ³ /j
Oran	Arzew	90 000 m ³ /j
	Mactaâ	500 000 m ³ /j
	Ain turck	5 000 m ³ /j
El tarf	El tarf	5 000 m ³ /j
Jijel	Jijel	200 000 m ³ /j
Skikda	Skikda	100 000 m ³ /j
Annaba	Annaba	50 000 m ³ /j
Bejaïa	Bejaïa	100 000 m ³ /j
Tizi Ouzou	Tigzirt	2 500 m ³ /j

1.5 Définition de l'eau saumâtre et de l'eau de mer.

L'eau saumâtre est une eau salée non consommable dont de teneur de sel est inférieure à celle de l'eau de mer, la concentration totale de sel dissous y est généralement comprise entre 1 et 10 g/l.

Cependant, la mer est l'étendue d'eau salée qui couvre la plus grande partie de terre (environ 71 %), la salinité moyenne de l'eau de mer est de l'ordre 35 g/l. Cette valeur varie fortement selon les régions et la saison :

- Mer Méditerranée : 36 à 39 g.L⁻¹,
- Mer Rouge : environ 40 g.L⁻¹,
- Mer Caspienne : 13 g.L⁻¹,
- Mer Morte : 270 g.L⁻¹,
- Golfe Arabo-Persique : 36 à 39 g.L⁻¹.
- Mer morte : 270 g.l⁻¹.

Le pH moyen des eaux de mer varie entre 7,5 et 8,4 : l'eau de mer est un milieu légèrement basique. (*Viviane*, 2003)

1.6 Caractéristiques d'eau de mer

1.6.1 Salinité

La salinité mesure la concentration en sels dissous ; elle s'exprime en g/L. Du fait que les quantités de sels dissous sont souvent très inférieures au gramme, l'unité communément utilisée est le mg/L ou encore le ppm. Chez les Anglo-Saxons. On notera que cette dernière unité n'est pas strictement équivalente puisqu'elle exprime des mg/kg.

Les salinités les plus basses se rencontrent au voisinage des pôles. La quantité de sels dissous augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche de l'équateur. Elle peut dépasser 50 g/L, dans certaines zones, telles que la côte Est de l'Arabie Saoudite où la chaleur favorise l'évaporation.

L'eau de mer est principalement constituée de sodium, magnésium, potassium, chlorure et sulfates. Les proportions moyennes mesurées en mer Méditerranée sont données dans le **tableau 1. 3**. Elles correspondent à des mesures en surfaces. Cependant, la profondeur influe très peu sur leur concentration. Ces valeurs peuvent donc être considérées comme de bonnes estimations (*Meradji*, 2015).

Tableau 1. 3 : La composition ionique de l'eau de mer Méditerranée (*Bessenasse & Filali, 2014*).

COMPOSITION IONIQUE DE L'EAU DE MER							
CATIONS				ANIONS			
Nom	S	Mg/l	Meq/l	Nom	S	Mg/l	Meq/l
Calcium	Ca ⁺²	440	22	Chlorure	Cl ⁻	21130	603,71
Magnésium	Mg ⁺²	1410	117,5	Sulfate	SO ₄ ⁻²	2832	59
Potassium	K ⁺	450,4	11,54	Bicarbonate	HCO ₃	159,32	0,06
Sodium	Na ⁺	11830,1	514,35	Nitrate	NO ₃ ⁻	3,5	2,61
Ammonium	NH ₄ ⁺	0	0	Bromure	Br ⁻	0	0
Fer	Fe ⁺²	0	0	Nitrite	NO ₂ ⁻	0	0
Argent	Ag ⁺	0	0	Nitrite	NO ₃ ⁻	0	0
Manganèse	Mn ⁺²	0	0	Fluorure	F ⁻	0	0
Zinc	Zn ⁺²	0	0	Sulfite	SO ₃ ⁻²	0	0
Cuivre	Cu ⁺²	0	0	Bromure	Br ⁻	0	0
Aluminium	Al ⁺³	0	0	Phosphate	PO ₄ ⁻³	0	0
Fer	Fe ⁺³	0	0	Cyanure	CN ⁻	0	0
	Tol	14130,5	665,39		Tol	24121,8	665,39

1.6.2 Température

La température de l'eau de mer peut varier de quelques degrés sur les côtes sous influence des courants polaires jusqu'à 35 °C autour de la péninsule arabe.

Une température élevée avantage la distillation, tout en observant que cet avantage est minime du fait que la capacité thermique massique de l'eau est très faible comparée à son enthalpie (sa chaleur latente) de vaporisation (*Meradji, 2015*).

1.6.3 Matière en suspension

L'eau de mer est un milieu vivant, qui véhicule d'une part des matières minérales et d'autre part des organismes vivants souvent microscopiques. En pleine mer, le plancton prédomine. Près des côtes, la teneur en sable augmente. Elle varie selon les courants et la profondeur des fonds. La pollution par des rejets urbains ou industriels peut devenir prépondérante. Le site de la prise d'eau et sa conception seront choisis pour éviter toute pollution et limiter au mieux l'apport des matières en suspension (*Meradji*, 2015).

1.7 Les types de procédés industriels utilisés dans le dessalement

Les principales méthodes industrielles utilisées à ce jour sont des évolutions des techniques précédentes, et elles peuvent être classées en deux catégories : les méthodes de distillation et les méthodes basées sur des membranes.

La capacité de production varie en fonction du procédé utilisé, allant de quelques litres par jour à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes par jour. Le choix du procédé dépend de divers facteurs, notamment la nature de l'eau à traiter (eau de mer ou eau saumâtre), la capacité de production requise et la disponibilité de sources d'énergie. Comme la montre *la figure 1. 7* (*Meradji*, 2015).

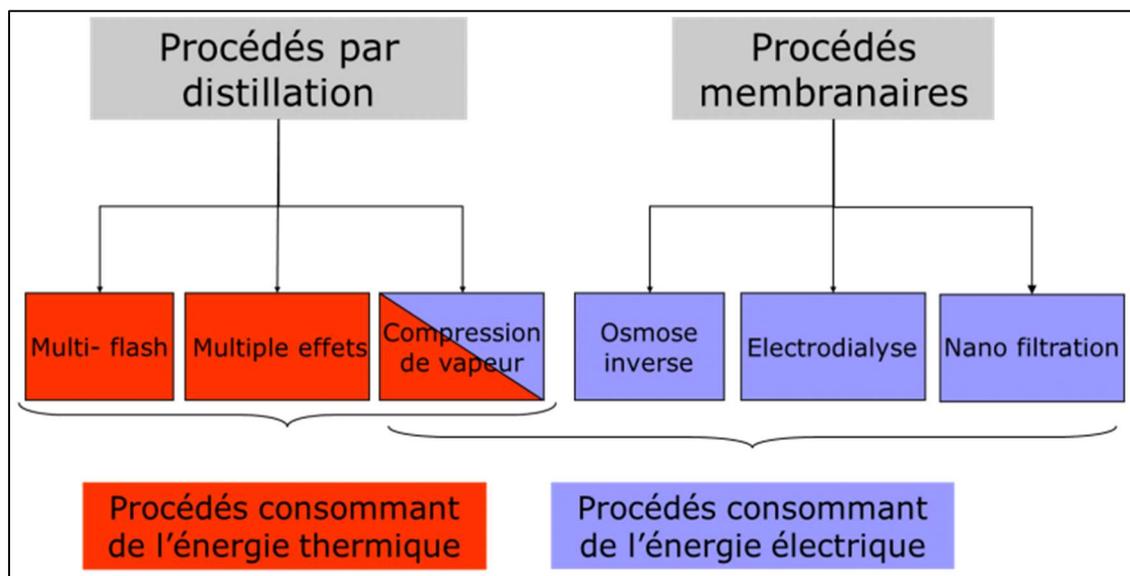


Figure 1. 7 : principaux procédés industriels de dessalement d'eau de mer (*Bandelier*, 2017).

La figure ci-dessous illustre les plages d'application de différentes techniques de dessalement en fonction de la salinité de l'eau à traiter.



Figure 1. 8 : domaines d'utilisation des différentes techniques de déminéralisation en fonction de la salinité de l'eau à traiter (*Benaissa, 2013*).

Les procédés de dessalement se divisent en deux grandes catégories : thermiques et à membranes.

1.7.1 Procédés thermiques (distillation)

Environ la moitié de l'eau dessalée dans le monde est produite au moyen de chaleur servant à distiller de l'eau douce à partir de l'eau de mer. Le procédé par distillation reproduit le cycle naturel de l'eau puisqu'il consiste à chauffer de l'eau salée est chauffée, avec production de vapeur d'eau qui est à son tour condensée pour former de l'eau douce.

Dans l'usine, l'eau est chauffée jusqu'à ébullition pour produire la quantité maximale de vapeur. Pour que le procédé soit économiquement rentable, la pression appliquée sur l'eau à bouillir est ajustée pour maîtriser le point d'ébullition (*Tata-Ducru, 2009*).

La méthode utilisée pour dessaler l'eau de mer est la plus ancienne, probablement en raison de sa grande simplicité. Il fonctionne en utilisant la chaleur d'une chaudière pour évaporer l'eau salée, ou, de manière plus basique, en utilisant l'énergie solaire. Pendant cette procédure, les sels et autres composés dissous restent en arrière pendant que la vapeur d'eau augmente. Par la suite, cette vapeur est condensée, ce qui permet de recueillir de l'eau douce.

Sur ce montage, l'eau de mer contenue en 2 est chauffée au moyen d'un bec bunsen (en 1). L'eau se transforme alors en vapeur et passe en 3, où sa température est évaluée à l'aide d'un thermomètre (en 4). La vapeur passe ensuite en 5 dans la colonne réfrigérante (alimentée en eau froide par le 6 et le 7). Elle est alors condensée et redevient donc liquide.

Ainsi en 8 on obtient de l'eau pure et parfaitement potable (*Wordpress*, 2008).

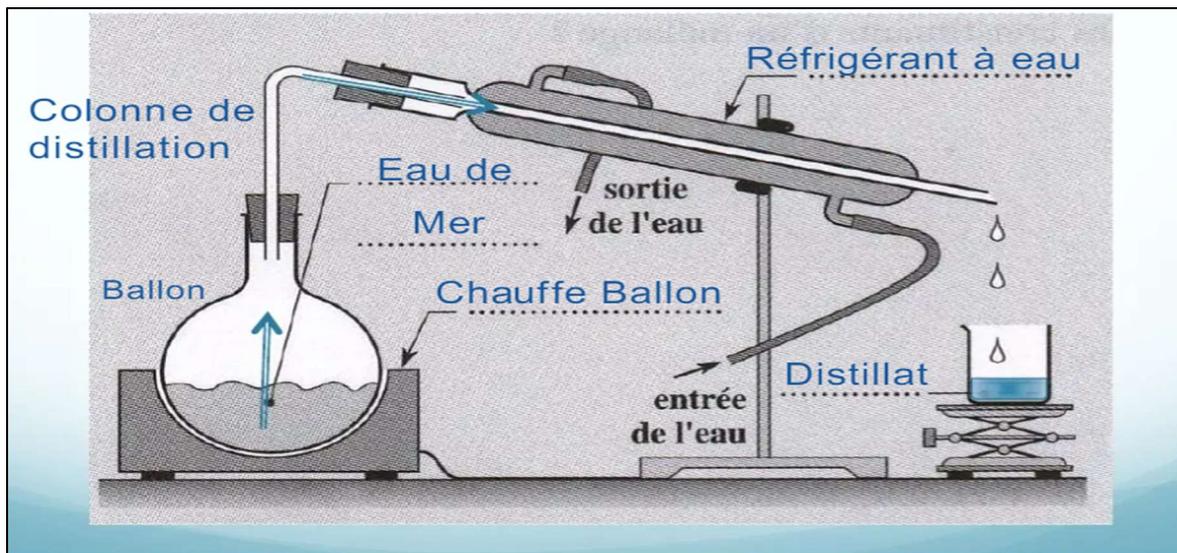


Figure 1. 9 : principe de distillation (*Scribd*, 2011).

La technique de distillation comprend trois types de procédés :

1.7.1.1 Procédé par détente successives ou procédé Flash (MSF)

Cette technologie est apparue en 1960 pour faire face aux problèmes d'entartrage que connaissent les procédés de distillation à multiples effets (*Tata-Ducru*, 2009).

Dans le procédé MSF, l'eau de mer est chauffée dans une chaudière. Cela est généralement fait en condensant la vapeur sur un faisceau de tuyaux véhiculant de l'eau de mer qui passe à travers la chaudière. Cette eau de mer chauffée coule alors dans une autre cuve correspondant à un autre étage où la pression ambiante est plus basse, si bien que l'eau commence aussitôt à bouillir. L'introduction soudaine de l'eau chauffée à chaque étage déclenche une détente et son évaporation instantanée (flash). En général, seule une petite fraction de cette eau est convertie en vapeur, en fonction de la pression maintenue à l'étage, étant donné que l'ébullition continuera jusqu'à ce que l'eau retombe au point d'ébullition (*Athenes*, 2003).

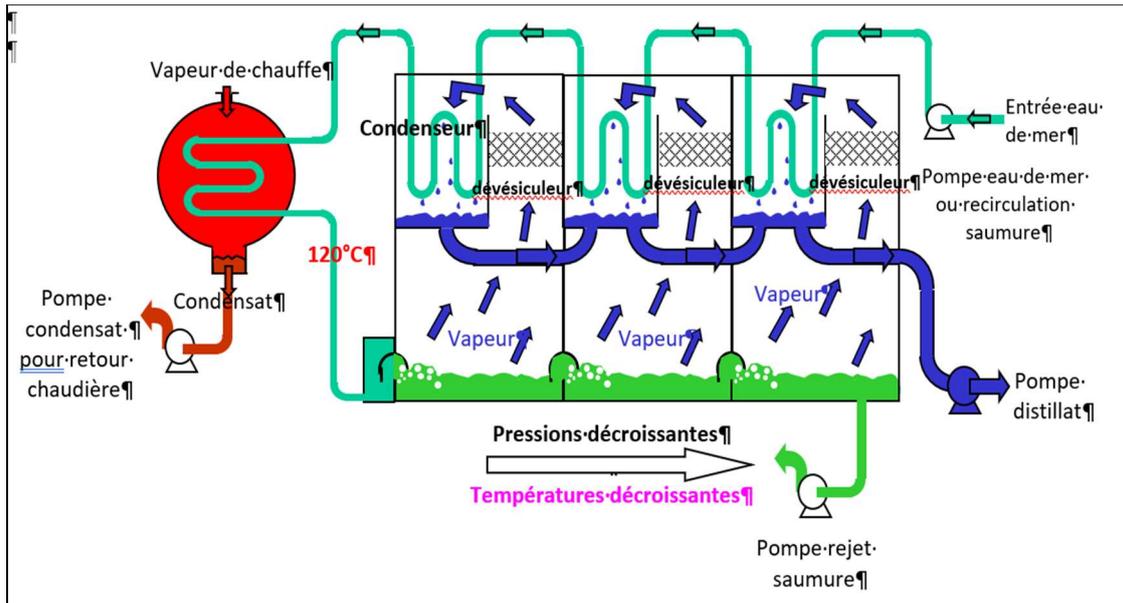


Figure 1. 10 : principe de fonctionnement d'un système par détonées successives (MSF) à 3 étages (Viviane, 2003).

1.7.1.2 Procédé à effets multiples (Distillation « Multi-Effect » ou ME).

Dans des évaporateurs à effets multiples (ME), la vapeur provenant du premier évaporateur se condense dans le second, et la chaleur de sa condensation sert à faire bouillir l'eau salée dans celui-ci. Par conséquent, le second évaporateur agit comme un condenseur de la vapeur provenant du premier, et l'action de cette vapeur dans le second évaporateur est identique à celle de la vapeur de chauffage dans le premier. De même, le troisième évaporateur agit comme condenseur pour le second, et ainsi de suite. Chaque évaporateur d'une telle série correspond à un (effet).

Certaines des premières usines de distillation d'eau utilisaient le procédé ME, mais les unités MSF, en raison de leur meilleure résistance à l'entartrage, ont remplacé ce procédé. Cependant, à partir des années 1980, le procédé ME, a connu un regain de faveur et il a été mis en place des installations de conception nouvelle introduisant une exploitation à des températures plus basses, ce qui a permis de réduire au minimum la corrosion et l'entartrage (Athenes, 2003).

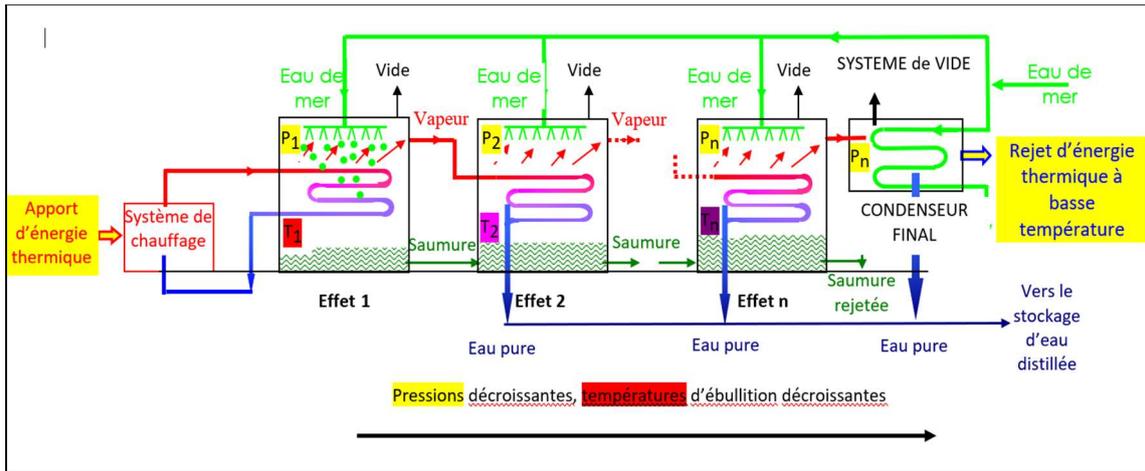


Figure 1. 11 : schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED) (Viviane, 2003).

1.7.1.3 Procédé par compression de vapeur (« Vapor Compression » ou VC) :

Dans ce procédé, l'eau à dessaler est portée à ébullition dans une enceinte isolée thermiquement. La vapeur produite est aspirée par un compresseur qui élève sa température de saturation. Cette vapeur traverse ensuite un faisceau tubulaire et se condense en provoquant l'ébullition de l'eau salée (Tata-Ducru, 2009).

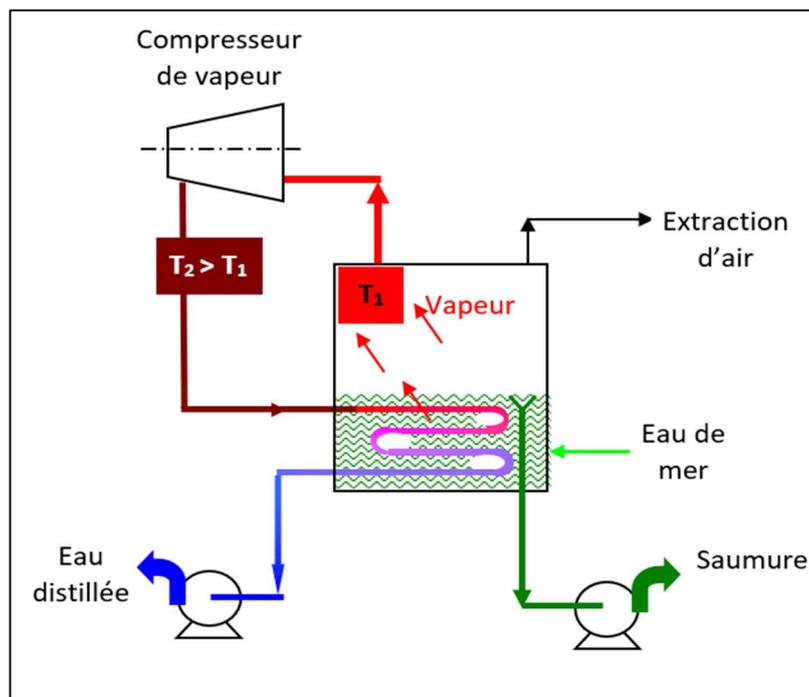


Figure 1. 12 : schéma de principe d'une unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur (Viviane, 2003).

1.7.2 Procédés à membranes.

Le traitement de l'eau de mer a connu une avancée significative grâce aux méthodes de dessalement qui utilisent la séparation par membranes. Les filtrations physiques sont utilisées plutôt que les éliminations chimiques des microorganismes, sans utiliser de produits chimiques, à l'exception de la maintenance. On reconnaît ces méthodes pour leur fiabilité et leur aptitude à offrir une eau d'une pureté et d'une qualité inchangées.

Les membranes sont utilisées sur le marché dans deux procédés importants : l'osmose inverse (OI) et l'électrodialyse (ED).

1.7.2.1 Osmose inverse (RO)

L'osmose est, sous l'action d'un gradient de concentration, le transfert d'un solvant, ici l'eau douce à travers une paroi semi-perméable vers une solution concentrée (en chlorure de sodium par exemple).

Si l'on considère le système suivant constitué d'un récipient divisé en 2 parties contenant d'un côté, la solution concentrée et de l'autre, de l'eau douce, il y a un flux d'eau douce qui se traduit par l'abaissement du niveau du compartiment d'eau douce et l'élévation du niveau dans la partie concentrée. La différence de niveau correspond à la pression osmotique.

Si au lieu de laisser le processus se réaliser, on applique sur le liquide concentré une pression supérieure à la pression osmotique, on a cette fois-ci un flux d'eau douce dessalée dans l'autre sens. C'est ce phénomène qui est la base d'unités de dessalement par osmose inverse. (*Cherbourg*, 2003).

L'osmose inverse sera détaillée dans *le chapitre 2*.

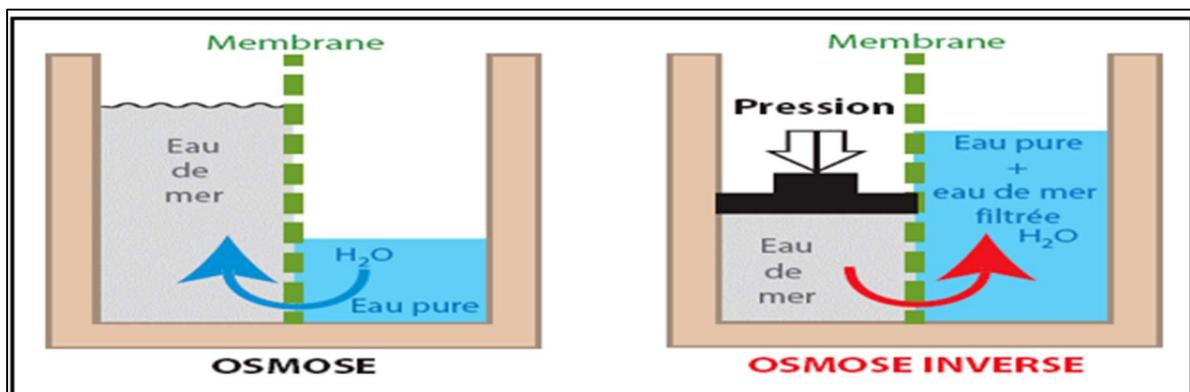


Figure 1.13 : principe de l'osmose inverse (*Tata-Ducru, 2009*).

1.7.2.2 Electrodialyse (ED)

L'électrodialyse est un procédé à membranes très ancien puisque la première installation date des années 1960. Ce procédé consiste à éliminer des sels dissous dans l'eau saumâtre par migration à travers des membranes sélectives sous l'action d'un champ électrique (*Portailgref, 2010*).

Le principe n'est pas d'extraire l'eau pure de l'eau à traiter mais au contraire d'en extraire les ions chlorure et sodium à travers des membranes sélectives. La migration des ions est provoquée par un champ électrique (*Bandelier, 2017*).

Les ions positifs, ou cations (par Na^+), sont attirés par l'électrode négative (ou cathode) tandis que les ions négatifs (Cl^-) sont attirés par l'électrode positive.

Dans l'électrodialyse, on intercale alternativement des membranes filtrantes soit perméables aux anions et perméables aux cations, soit imperméables aux cations et perméables aux anions. On obtient ainsi une série de compartiments à forte concentration de sels et d'autres à faible concentration. (*Maafa, 2020*).

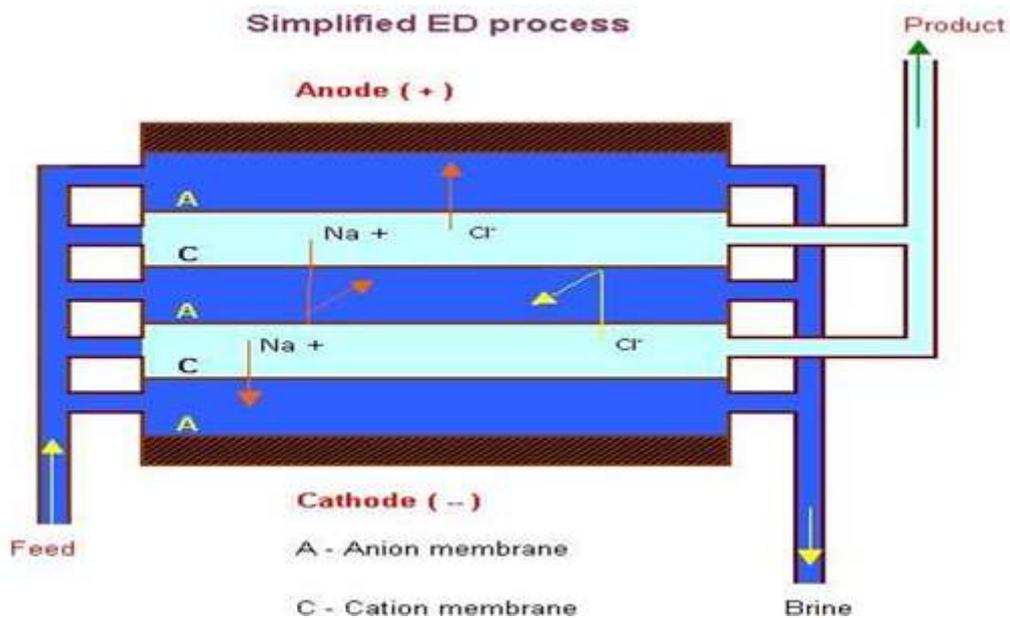


Figure 1.14 : processus ED simplifié (*Bushnak, 2014*).

1.8 Étapes de dessalement

Le processus qui s'appelle dessalement consiste à séparer l'eau et les sels à partir d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau saumâtre d'origine continentale (*Dunglasj*, 2014). Cependant il existe plusieurs étapes pour convertir l'eau de mer à une eau douce mais le processus reste le même pour tous les procédés.

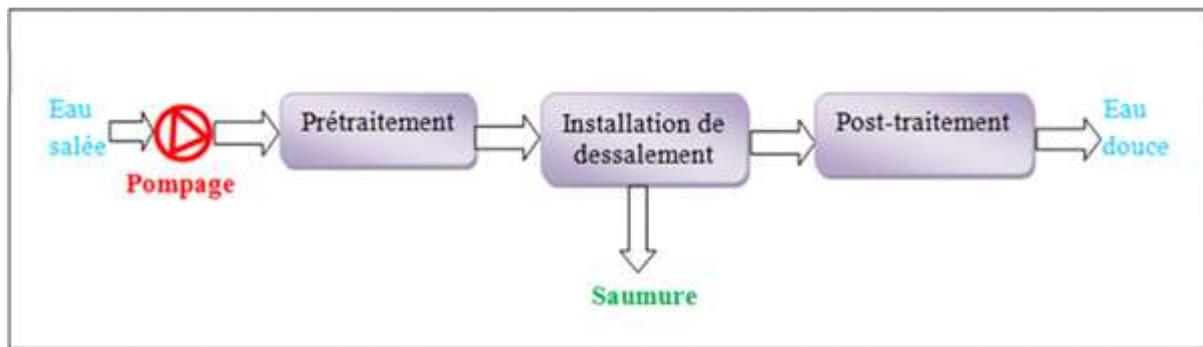


Figure.1. 15 : système de dessalement d'eau de mer (*Bushnak*, 2014).

- i. **L'alimentation en eau de mer** : on peut s'effectuer soit par prise directe, soit par puits côtiers. Ce dernier système permet d'obtenir une eau non turbide, ce qui soulage les prétraitements (*Tata-Ducru*, 2009).
- ii. **Le prétraitement** : dans le prétraitement, l'eau brute passe par plusieurs étapes, telle que :
 - Chloration : Bloque la prolifération des organismes vivants. Évite l'obstruction des conduites.
 - Filtration : Protégé les pompes et assure le bon fonctionnement des pulvérisateurs.
 - Antitartre : La distillation favorise précipitation du carbonate de calcium qui se dépose sur la paroi des échangeurs et réduit le transfert de chaleur (*Tata-Ducru*, 2009).
- iii. **Installation de dessalement** : Cette étape comprend les équipements qui permettent de séparer les sels de l'eau, on trouve selon la technique utilisée :
 - Procédés de distillation : L'eau de mer chauffée produit de la vapeur d'eau qu'il suffit de condenser pur obtenir de l'eau pure.
 - Procédés membranaires : L'eau et les sels dissous sont séparés au moyen de membranes sélectives (*Tata-Ducru*, 2009).
- iv. **Le post-traitement** : Permet de potabiliser l'eau en 2 étapes (en sortie de l'unité de

dessalement, l'eau n'est pas potable car elle est déminéralisée).

- **Correction de la corrosivité** : le traitement consiste à ajouter du Ca(OH)_2 ou du CaCO_3 .
- **Désinfection finale** : bien que certains procédés (osmose inverse) retiennent tous les microorganismes, il est nécessaire d'assurer une désinfection à la sortie de l'usine (*Taibi, 2015*).

Conclusion

Le premier chapitre de cette étude a permis d'examiner en détail les processus de dessalement, en particulier les procédés de distillation et les procédés membranaires. La distillation, qui consiste à chauffer l'eau de mer pour produire de la vapeur puis à la condenser, est une méthode éprouvée mais énergivore. En revanche, les procédés membranaires, tels que l'osmose inverse, offrent une alternative plus économe en énergie et en coûts, tout en produisant une eau de haute pureté. Ces procédés sont également plus respectueux de l'environnement comparés aux méthodes traditionnelles. La section sur le post-traitement a souligné l'importance de rendre l'eau dessalée potable, en ajoutant des minéraux et en désinfectant l'eau, bien que certaines méthodes de dessalement retiennent déjà la plupart des microorganismes.

Chapitre 2

2 Technique de l'osmose inverse

Introduction

Au début du XXe siècle, s'inspirant de la nature osmotique des parois cellulaires, des chercheurs avaient avancé l'idée de l'utilisation d'une membrane pour séparer le sel de l'eau de mer. Dans les années 1960, des chercheurs américains et japonais, qui avaient développé des membranes semi-perméables à des fins industrielles, se rendirent rapidement compte que ces mêmes membranes pourraient être utilisées pour dessaler l'eau de mer (*Benaissa, 2013*).

Les avantages des procédés membranaires incluent leur faible consommation d'énergie, leur capacité à fonctionner des températures et des pressions ambiantes, ainsi que leur capacité à fournir des produits de haute pureté. De plus, ces procédés sont souvent plus économiques et écologiques que les méthodes traditionnelles de séparation (*Wever & Ayrat, 2003*).

L'osmose inverse, parmi ces techniques membranaires, a émergé comme l'un des procédés les plus efficaces pour le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre. Cette technologie repose sur le principe de passer l'eau à traverser une membrane semi-perméable afin de séparer les solutés, tels que le sel, des molécules d'eau.

2.2 Procédés membranaires

Une membrane permselective est une mince couche de matière permettant d'effectuer une séparation solide-liquide, sélective à l'échelle microscopique, lorsqu'elle est soumise à une force motrice. Cette force peut être générée par un gradient de pression, de concentration ou de potentiel électrique, de part et d'autre de la membrane (*Figure 2.1*) (*Gater et Halouane, 2012*).

Il existe une grande diversité de membranes. Elles sont classées par familles, selon leur nature chimique, leur structure et leur forme physique liée à leur mode de fabrication (*Acer et Arzate, 2010*).

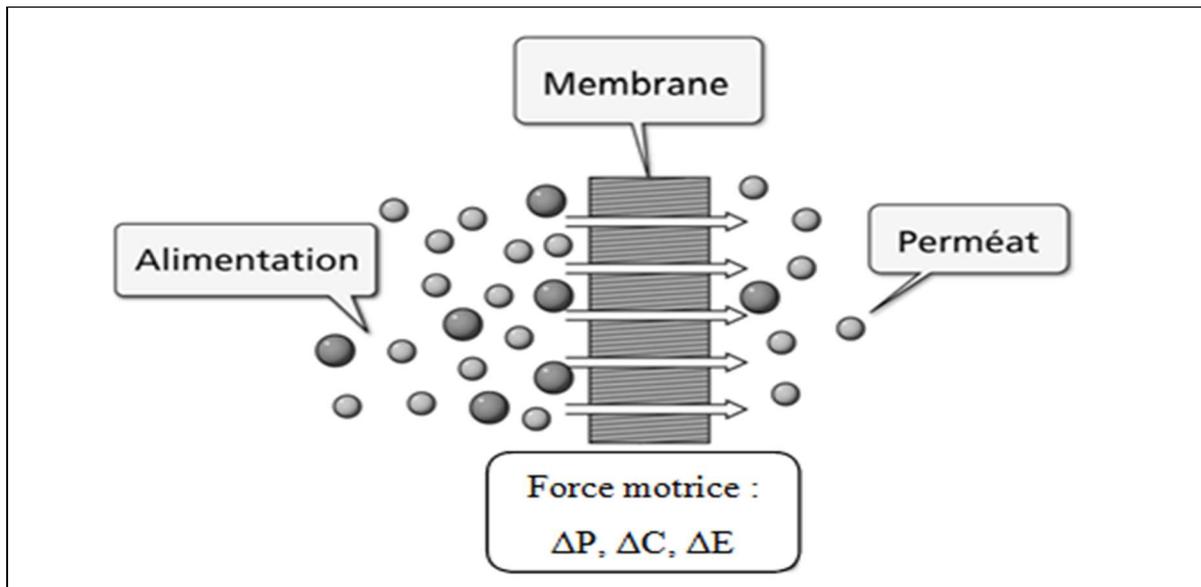


Figure 2. 1 : schéma de principe du fonctionnement d'une membrane perméable (*Gater & Halouane, 2012*).

Les membranes sont utilisées sur le marché dans deux procédés : l'osmose inverse et l'électrodialyse.

L'osmose inverse consiste à séparer les substances dissoutes d'une solution salée pressurisée en la faisant diffuser à travers une membrane. À mesure qu'une quantité de l'eau diffuse à travers la membrane, la concentration en sels de la fraction restante augmente. Dans le même temps, une partie de l'eau d'alimentation est rejetée sans diffuser à travers la membrane. La fonction de la membrane d'osmose inverse est schématisée par la **figure 2. 2**. L'électrodialyse est un procédé qui utilise la mobilité des ions d'un électrolyte soumis à un champ électrique, le dessalement étant assuré par des membranes qui éliminent sélectivement les sels, ce qui permet d'obtenir de l'eau douce (*Remini, 2003*).

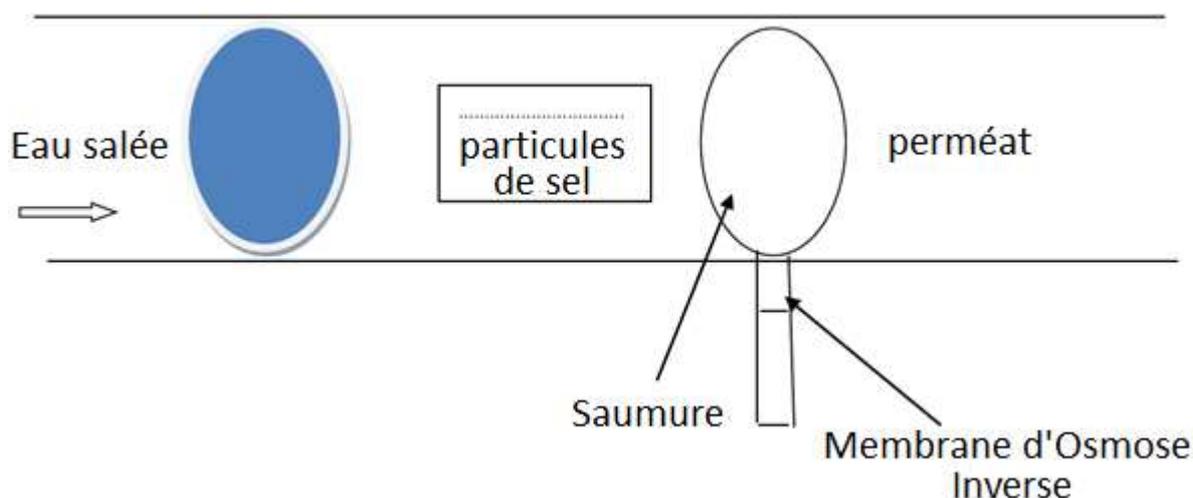


Figure 2. 2 : schéma de fonctionnement de la membrane d'osmose inverse. (Remini, 2003).

2.3 Principe de l'Osmose Inverse

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de pression. Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase.

La membrane est constituée d'une pellicule de polymère perméable et sélective ; elle permet seulement le passage des molécules d'eau, produisant ainsi de l'eau douce. La pression osmotique est de l'ordre de 29 bars pour l'eau de mer. Plus l'eau est chargée en sels, plus la pression osmotique est élevée. Les membranes étant très sensibles aux phénomènes d'encrassement, les usines de dessalement par osmose inverse nécessitent des postes de pré et post-traitement très performant (Guimard, 2019).

Tableau 2. 1 : avantages et les inconvénients des procédés par osmose inverse (Enseeiht, 2024).

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -Capacité de séparation élevée. -Systèmes modulaires, d'où une grande flexibilité d'utilisation. -Recyclage du perméat et du concentré possible. -Température de fonctionnement faible. 	<ul style="list-style-type: none"> -Risque de colmatage, d'obturation et d'encrassement. -Compactage en présence d'agents d'adoucissage. -Pression élevée requises. -Flux de perméat faible.

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Si on considère un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes, l'osmose inverse se traduit par un flux d'eau dirigé de la solution la plus concentrée lorsqu'on inverse le flux, l'eau brute passe alors à travers les membranes qui retiennent les sels et les contaminants (**Figure 2. 3**) : c'est le principe de base de l'osmose inverse (**Meradji**, 2015).

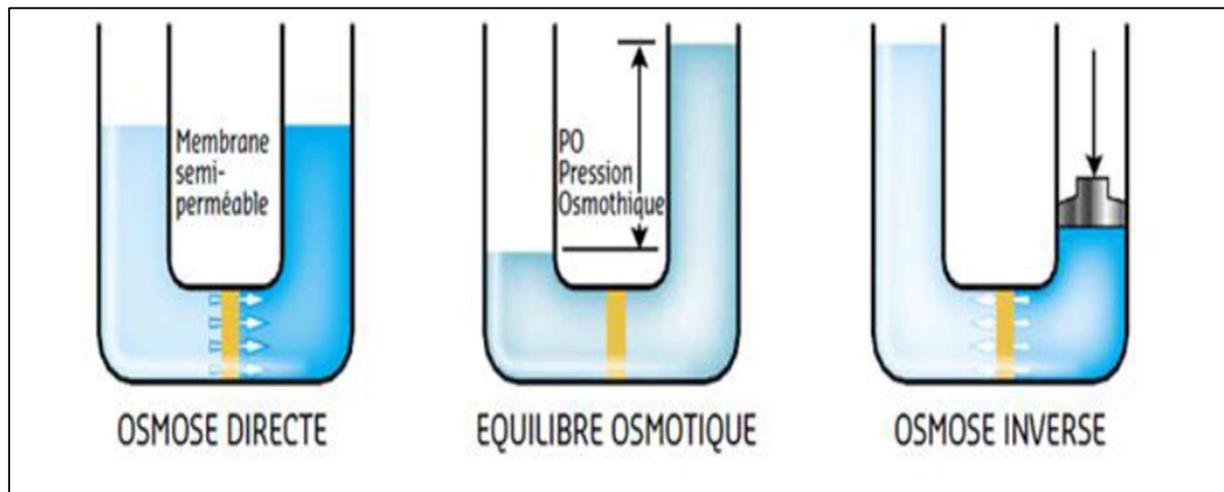


Figure 2.3 : principe d'osmose inverse.

2.4 Caractéristiques principales d'osmose inverse

2.4.1 Mécanisme de transfert

Les transferts de solvant et de soluté au travers d'une membrane semi-perméable se font par le phénomène de solubilisation-diffusion ; toutes les espèces moléculaires (soluté et solvant) se dissolvent dans la membrane et diffusent à l'intérieur de celle-ci sous l'action d'un gradient de concentration et de pression (**Marjorie**, 2010).

2.4.2 Le taux de conversion

Le taux de conversion par définition (R) c'est la fraction de débit de solution qui traverse la membrane, permet d'évaluer le rendement de perméat produit par rapport à la solution d'alimentation traitée (**Alain**, 2006) :

$$R = Q_p / Q_f \quad (2.1)$$

Avec :

R : c'est la fraction de débit de solution qui traverse la membrane ;

Q_P : le débit de perméat produit (m^3/j) ;

Q_f : le débit d'alimentation l'eau de mer (m^3/j).

2.4.3 Le taux de rétention (sélectivité)

Le taux de rétention R (%) reflète la capacité de rétention des solutés et la sélectivité de la membrane (*Camille*, 2008).

2.4.4 Densité de flux de perméat

La vitesse de dessalement ou la densité de flux de perméat représente la productivité de perméat par rapport à la surface de membrane mise en œuvre. La densité de flux de perméat J_P est le rapport du débit de perméat Q_P par unité de surface membranaire (*Alain*, 2006) :

$$J_P = Q_P / S_M \quad (2.2)$$

Avec :

J_P : La densité de flux de perméat ;

Q_P : Le débit de perméat (m^3/j) ;

S_M : La surface membranaire m^2 .

2.4.5 Pression osmotique.

L'osmose est le transfert de solvant à travers une membrane sous l'effet d'un gradient de concentration. Considérons un système de deux compartiments séparés par une membrane semi- perméable sélective et contenant deux solutions de concentrations différentes. Le solvant (généralement l'eau) s'écoule à travers la membrane du compartiment de la solution moins concentrée vers le compartiment contenant la solution la plus concentrée, c'est le phénomène d'osmose. Si on applique progressivement une pression sur le compartiment de la solution la plus concentrée, le flux d'eau qui traverse la membrane va diminuer, puis s'annule quand la pression appliquée atteindra à ce qui est appelé la pression osmotique. Si on applique une pression supérieure à la pression osmotique, l'eau va traverser la membrane dans le sens inverse du flux osmotique, c'est le phénomène d'osmose inverse (*Tansakul*, 2009).

La pression osmotique d'une solution saline dépend de la nature des sels dissous et de concentration. Elle est donnée par la relation suivante (*Gater & Halouane*, 2012) :

$$\Pi = i \cdot C \cdot R_p \cdot T \quad (2.3)$$

Avec :

I : est le nombre d'espèces d'ions constituant le soluté ;

C : la concentration molaire du soluté (mol/m³) ;

T : la température(K) ;

R_p : la constante des gaz parfaits (8,31J/mol. K) ;

Π : est exprimée en pascals (Pa).

Les principaux constituants d'une installation d'osmose inverse sont les suivants (*Maafa, 2020*) :

- Les membranes proprement dites ;
- Les modules ;
- La pompe HP ;
- Éventuellement un système de récupération d'énergie ;
- Un système de prétraitement ;
- Un système de post-traitement.

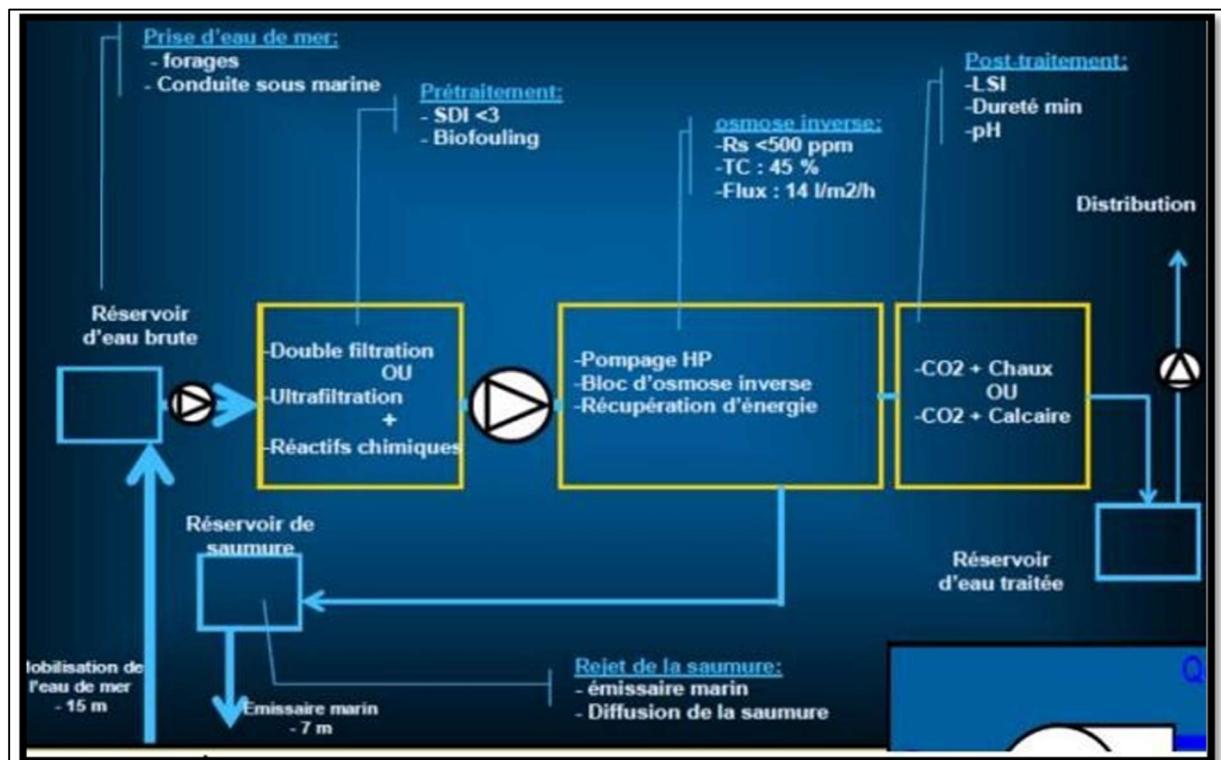


Figure 2. 4 : schéma général d'une installation d'osmose inverse (*Maafa, 2020*).

2.5 Différents types des membranes

2.5.1 Membranes organiques

La plupart d'entre elles sont actuellement fabriquées à partir de polymères organiques (acétate de cellulose, polysulfones, polyamides, etc.). Elles sont souvent utilisées en ultrafiltration et microfiltration.

Tableau 2.2 : avantages et inconvénients des membranes organiques suivant leur composition (*Berland & Juer, 2002*).

	Avantages	Inconvénients
Acétate de cellulose	-Perméabilité élevé ; -Sélectivité élevée ; -Mise en œuvre assez aisée ; -Adsorption des protéines faible (colmatage moindre).	-sensible à la température -sensible au PH ; -sensible au chlore ; -sensible au compactage ; -sensible aux microorganismes.
Type polyamide	Bonne stabilité chimique, thermique et mécanique.	-grande sensibilité -faible perméabilité -phénomène d'adsorption.
Type polysulfone	-bonne stabilité thermique et au PH ; -résistance au chlore 5 mg/l fonctionnement normale 50 mg/l stockage 200 mg/l traitement choc.	-sensible au colmatage ; -adsorption.
Membranes composites	-bonne caractéristique ; -perméabilité et sélectivité -stabilité de PH 2 à 11 ; -Bonne tenue en température.	

2.5.2 Membranes minérales ou inorganiques

Ces membranes sont composées de corps entièrement minéraux, principalement les matières céramiques, le métal fritté et le verre. Leur arrivée a permis de travailler dans des conditions extrêmes de température et d'agression chimique (*Belhaji, 2019*).

2.5.3 Membranes composites

Elles sont caractérisées par une structure asymétrique dont la peau est beaucoup plus fine que celle des membranes classiques non composites et par une superposition de plusieurs couches différenciées soit par leur nature chimique, soit par leur état physique. Elles peuvent être organiques, organo-minérales ou minérales (*Belhaji, 2019*).

2.5.4 Membranes échangeuses d'ions

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

Leur principal domaine d'application actuel est le dessalement de l'eau et le traitement des effluents (*Belhaji*, 2019).

2.6 Les modules de l'osmose inverse.

Un module est la plus petite unité qui peut être changée dans un système industriel. Il s'agit d'un assemblage de membranes avec une entrée d'alimentation commune et des sorties communes de perméat et de concentré. Le module comporte des cadres séparateurs ou des drains intercalaires, et généralement des joints de colle pour assembler les membranes et assurer l'étanchéité entre l'alimentation et le perméat. Un module ne comporte pas d'accessoires et d'équipement tels que des dispositifs de mesure, de mise sous pression, de contrôle, etc (*Audinos & Isoard*, 1986).

On distingue 4 grands types de modules qui sont commercialisés :

- Les modules tubulaires ;
- Les modules fibres creuses ;
- Les modules plans ;
- Les modules spiralés.

2.6.1 Modules tubulaires

Un module tubulaire contient plusieurs tubes qui peuvent être en série ou en parallèle. L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes. Les tubes constituent des canaux d'écoulement tangentiel. C'est le seul type de module qui peut être nettoyé mécaniquement avec un système de balles de mousse qui raclent les parois des tubes (*Bouchard et al.*, 2000).

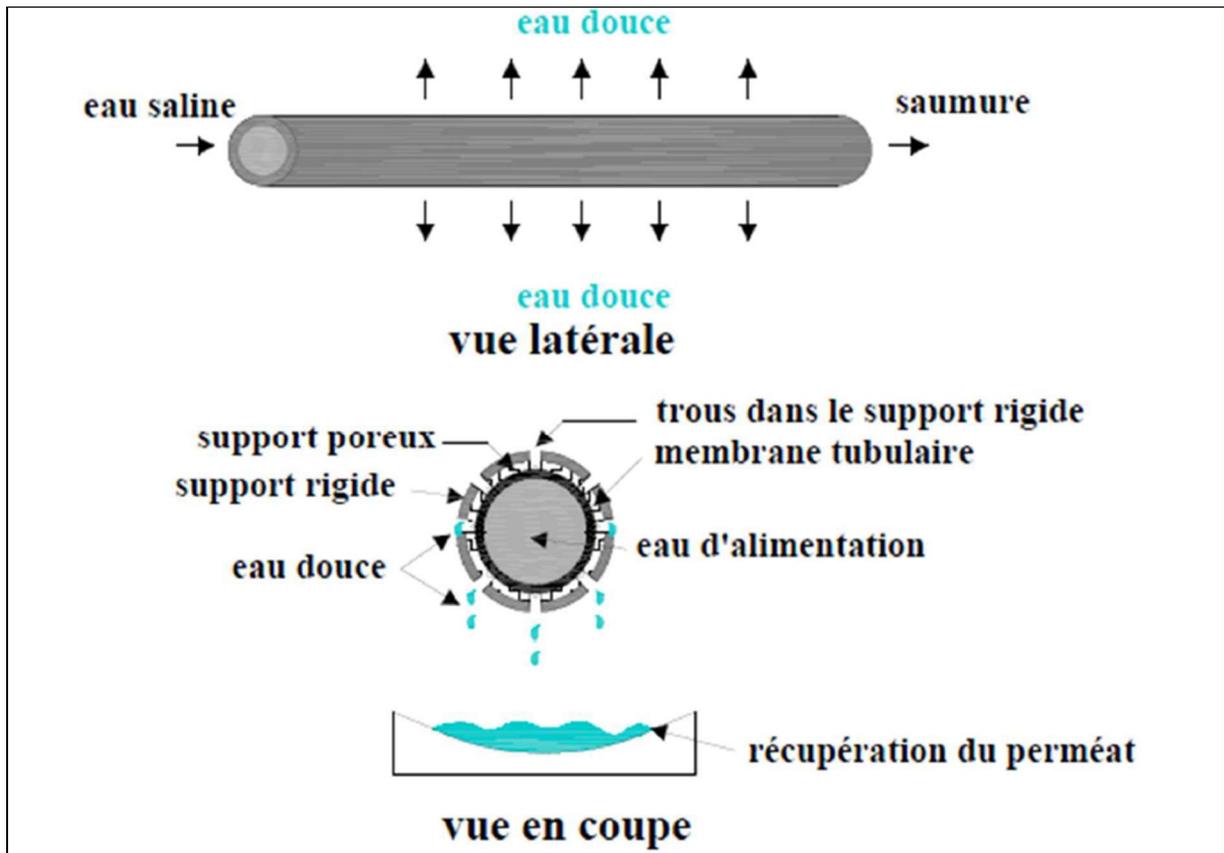


Figure 2. 5 : schéma de principe d'un module tubulaire (Ettoria, 2011).

2.6.2 Modules fibres creuses

Ils rassemblent un ensemble de fibres creuses de quelques centimètres à un mètre de longueur et dont l'épaisseur est de l'ordre de 100 à 200 μm en un faisceau de diamètre inférieur à 3 mm. Elles sont assemblées en parallèle selon deux configurations possibles (Alam, 2008) :

- **Int-Ext** : la solution à traiter circule à l'intérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'extérieur des fibres. Il y a écoulement tangentiel. Cette technique est habituellement utilisée lorsque l'on est intéressé par le concentrât.
- **Ext- Int** : la solution circule à l'extérieur des fibres et le perméat est récupéré à l'intérieur des fibres en mode frontal. Cette technique est habituellement utilisée lorsque l'on est intéressé par le perméat.

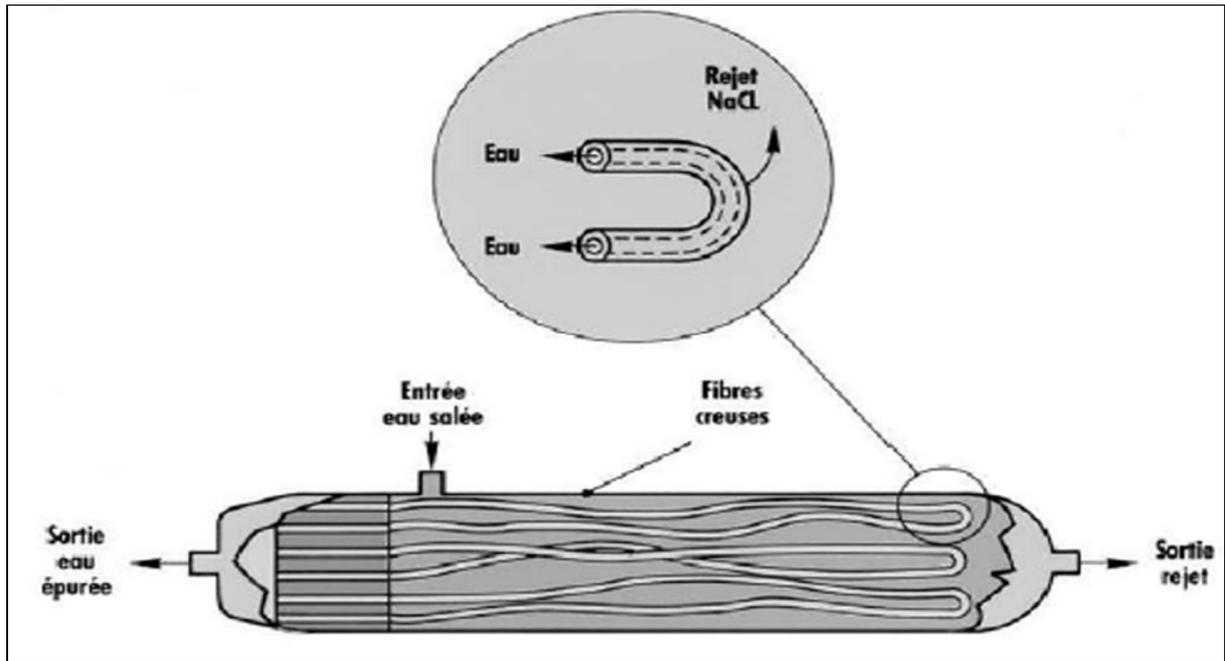


Figure 2. 6 : schéma de principe d'un module à fibres creuses (Maurel, 2006).

2.6.3 Modules plans

Ils sont constitués d'un empilement de plaques, chacune est équipée sur ses deux faces d'une grille de drainage faisant office d'espace filtrant, et d'une feuille poreuse soutenant la membrane (Maurel, 2006).

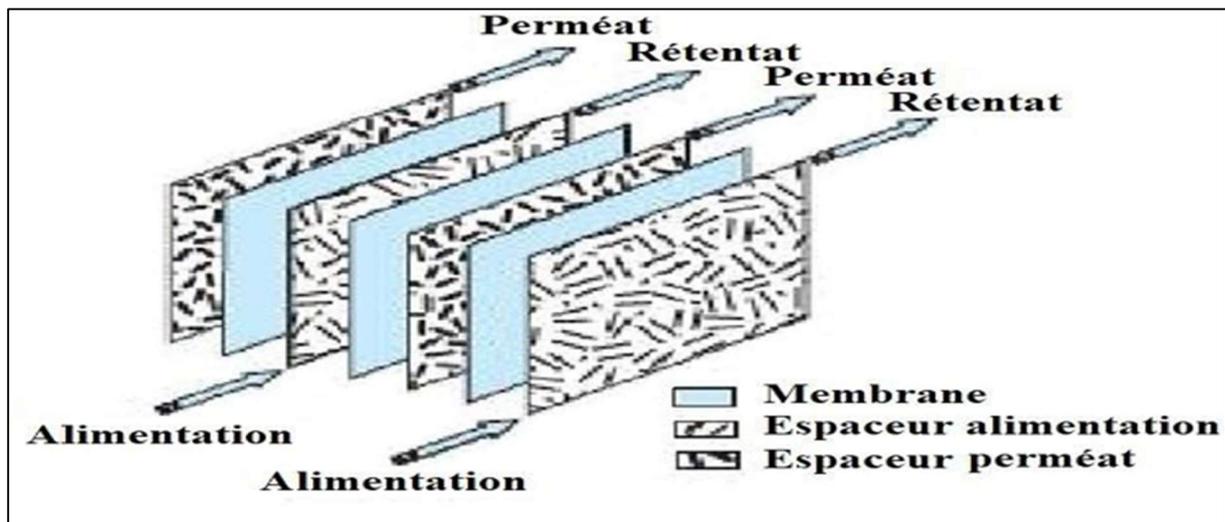


Figure 2. 7 : configuration générale du module plan (Belalia, 2018).

2.6.4 Modules spirales

Au sein des modules spiraux, une membrane plane est enroulée sur elle-même autour d'un tube poreux qui recueille le filtrat. On obtient ainsi un cylindre multicouche où le

perméat s'écoule selon un chemin spiralé vers le tube poreux tandis que l'alimentation circule axialement dans les canaux.

Les modules sont composés d'un tube sur lequel sont enroulés successivement une membrane, une grille fine, une autre membrane et une grille plus grossière. Les membranes doivent donc être suffisamment flexibles pour être enroulées. Le retentât circule à travers la grille moins fine tandis que le filtrat va aller jusqu'à la grille plus fine où il passera dans le creux central du tube (*Metaiche, 2006*).

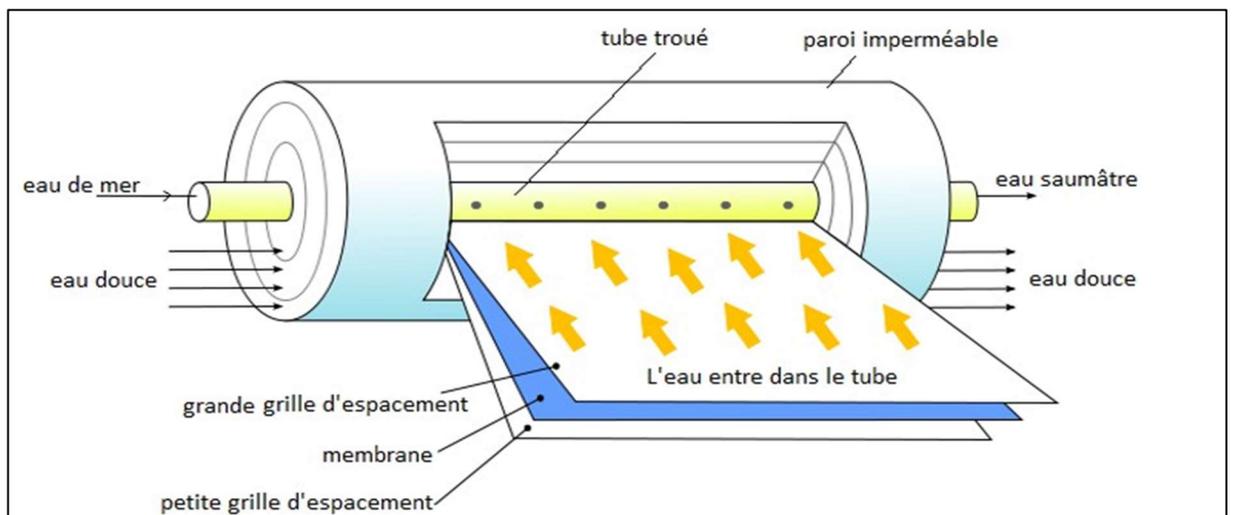


Figure 2. 8 : membranes en spirale (*Metaiche, 2006*).

2.7 Domaines d'application de la technique membranaire

L'organigramme donné par *la figure 2.9* présente le champ d'application des différentes techniques de filtration classique et des différentes techniques de séparation par membrane (*Berland et Juer, 2002*).

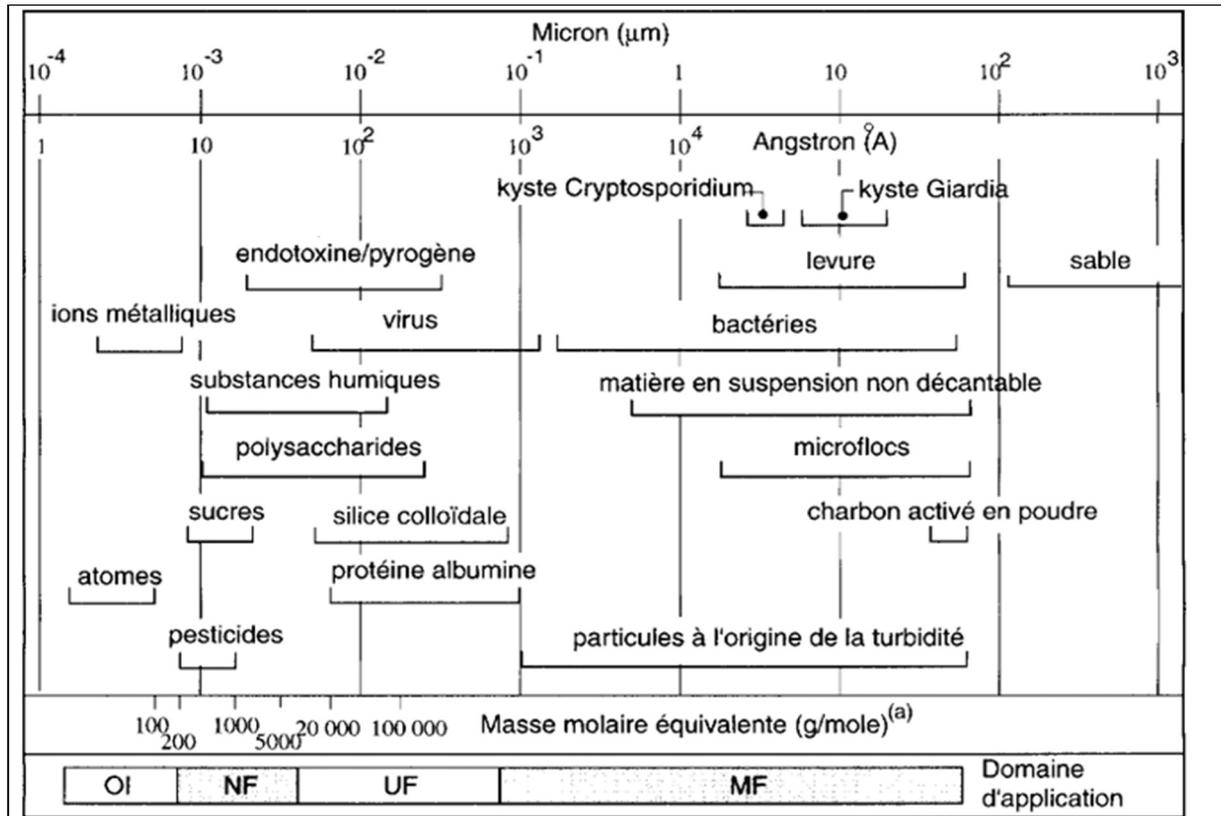


Figure 2.9 : différents composés rencontrés dans les eaux naturelles et les techniques permettant leur élimination (Bouchard et al., 2000).

2.7.1 Osmose inverse (OI)

L'osmose inverse utilise des membranes denses qui laisse passer le solvant et arrêtent les sels, c'est un procédé utilisé pour déminéraliser des eaux (dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres) et pour la concentration des solutions (Gater et Halouane, 2012).

2.7.2 Nanofiltration (NF)

Cette technique se situe entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration. Elle permet la séparation de composants ayant une taille en solution voisine de celle du nanomètre d'où son nom. Les sels ionisés monovalents et les composés organiques non ionisés de masse molaire inférieure à environ 200 -250 g / mol ne sont pas retenus par ce type de membrane. Les sels ionisés multivalents (calcium, magnésium, aluminium, sulfates...) et les composés organiques non ionisés de masse molaire supérieure à environ 250 g/mol sont, par contre, fortement retenus (Maurela, 1993).

2.7.3 Ultrafiltration

Cette technique utilise des membranes microporeuses, dont les diamètres de pores sont compris entre 1 et 100 nm (Maurela, 1993).

De telles membranes laissent passer les petites molécules (eau, sels) et permettent d'arrêter tous types de colloïdes présentant un diamètre compris entre $1\mu\text{m}$ à 1nm (*Nechad, 2009*).

2.7.4 Microfiltration

Ce procédé de séparation solide-liquide met en œuvre des membranes dont les diamètres de pores sont compris entre $0,1$ et $10\mu\text{m}$. Il permet donc la rétention des particules en suspension, des bactéries et indirectement des colloïdes et de certains ions après fixation de ces derniers sur des plus grosses particules obtenues par complexation, précipitation ou floculation (*Alam & Kerroum, 2008*).

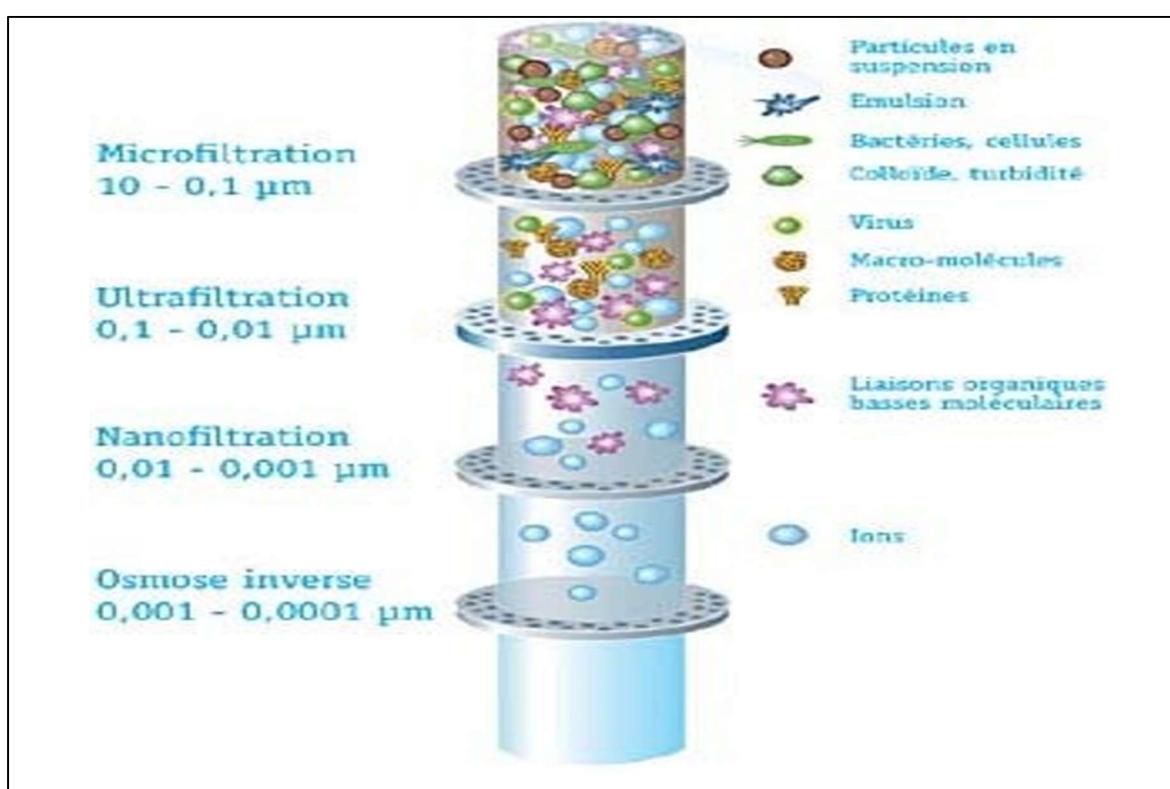


Figure 2. 10 : types d'éléments à séparer de l'eau (avec l'échelle de taille [μm] et le procédé de filtration convenant) (*Maison-Facile, 2023*).

2.8 Colmatage des membranes

Le dépôt de matières entraîne la formation d'une couche à la surface de la membrane (*figure 2.11*) ce qui a pour conséquence de réduire le débit de filtration et donc les performances de l'opération. Le colmatage est responsable dans trois quarts des cas du vieillissement de la membrane.

Le colmatage est l'un des problèmes les plus importants que l'on rencontre lors de la mise en œuvre des techniques à membranes. Il peut être défini comme une diminution de débit de perméat au cours du temps qui associée en générale a une variation de la sélectivité.

Les dépôts qu'ils rencontrent peuvent être de nature très diverse (*Belhaji*, 2019) :

- Les sels minéraux (carbonate de calcium, sulfate de calcium, sulfate de magnésium).
- Les hydroxydes (hydroxyde de fer).
- Les matières organiques (protéine, gels divers).
- Les films biologiques provenant de développement, bactérien.
- La concentration top élevée (soit la concentration moyenne, soit les Surconcentrations locales dues aux phénomènes de polarisation).
- La présence des matières en suspension qui se déposent sur les membranes par suite de conditions hydrodynamiques favorables (vitesse faible).
- La réaction d'adsorption entre certaines molécules et les matériaux membranaires.

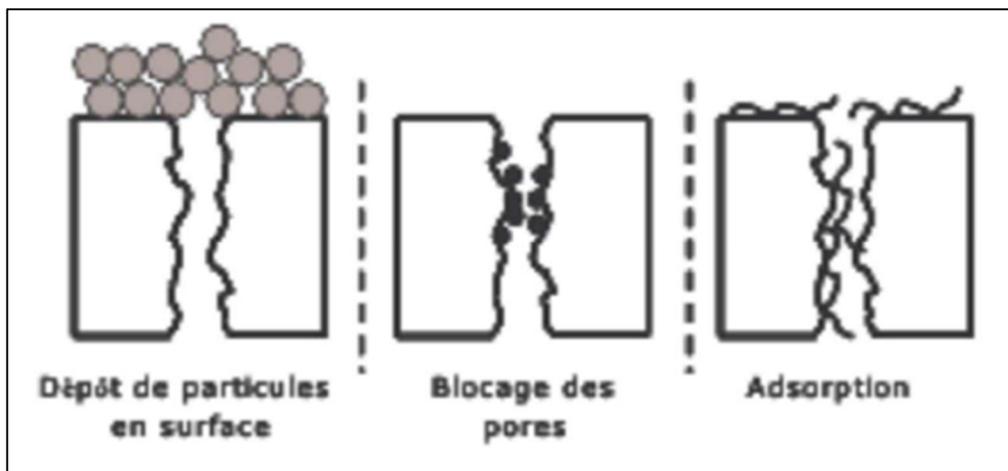


Figure 2. 11 : mécanismes de colmatage (*Chatkaew*, 2009).

La nature et la rapidité du colmatage dépend de plusieurs facteurs, comme (*Belhaji*, 2019) :

- La qualité d'eau d'alimentation.
- Le taux de conversion.

Un colmatage évolue progressivement, Il doit être contrôlé dès le début car il peut détériorer la membrane. De plus, il diminue d'une manière remarquable les performances des membranes dans un court délai.

2.9 Nettoyage des membranes d'osmose inverse.

Il y a trois procédures de nettoyage des membranes :

- Rinçage post-service.
- Nettoyage chimique standard : 1 à 4 fois par an (moyenne).
- Nettoyage chimique spécifique.

L'eau de mer s'écoule de façon tangentielle le long de la membrane, créant un gradient de Concentration horizontal sur la longueur de la membrane. Les membranes doivent Typiquement être nettoyées lorsque (*Belhaji*, 2019) :

- Le flux normalise de perméat varie de 10-15% ;
- La conductivité normalisée du perméat varie de 10-15% ;
- La perte de charge normalisée entre l'alimentation et le concentrat varie de 10-15%.

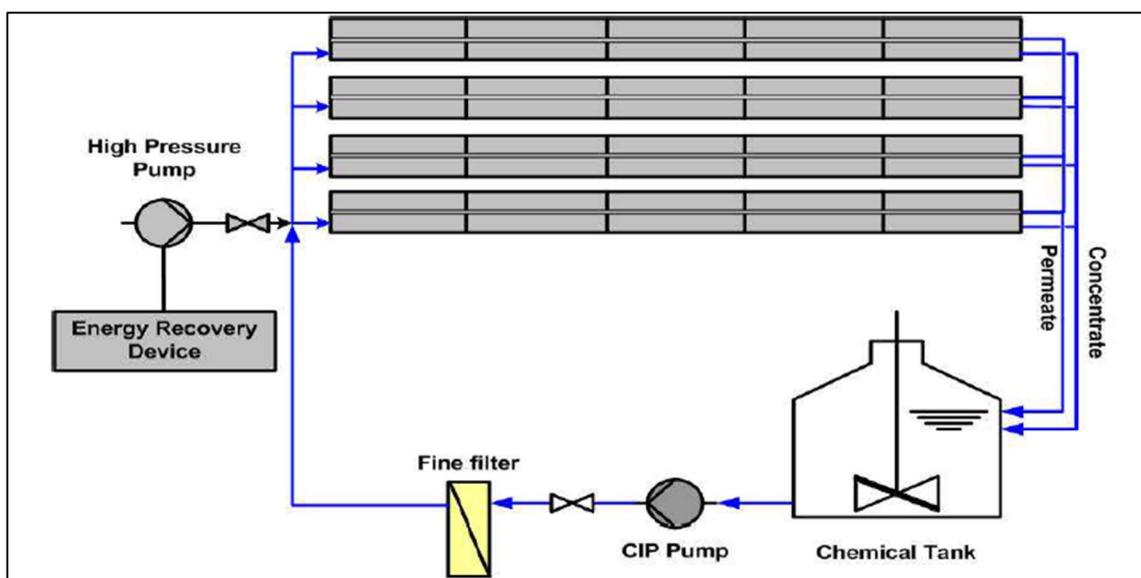


Figure 2. 12 : schéma du système de nettoyage des membranes (*La recherche*. 2024).

2.10 Durée de Vie des Membranes.

La durée de vie des membranes d'osmose inverse dépend de la nature de la membrane et des conditions d'utilisation :

- Pression de fonctionnement.
- Température de l'eau.
- PH.

- Qualité du prétraitement.

Conclusion

Le deuxième chapitre a approfondi l'étude du procédé de l'osmose inverse, qui s'est révélé être l'un des procédés les plus efficaces pour le dessalement de l'eau de mer et de l'eau saumâtre. Ce procédé utilise des membranes semi-perméables pour séparer le sel des molécules d'eau, permettant ainsi une purification efficace. Les membranes utilisées varient en termes de composition chimique et de structure, ce qui influence leur performance et leur durabilité. Le chapitre a également abordé les défis liés au colmatage des membranes, qui peut réduire leur efficacité et nécessiter des procédures de nettoyage régulières. La durée de vie des membranes dépend de divers facteurs, dont la qualité de l'eau d'alimentation et les conditions d'utilisation, soulignant la nécessité d'un prétraitement adéquat et d'une maintenance régulière pour garantir une performance optimale.

Chapitre 3

3 Présentation de la station de Bou-smaïl

Introduction

La station de dessalement d'eau de mer de Bou-smaïl a été réalisée par l'entreprise Foremhyd SPA.

Elle commençait de production l'eau douce en 2021, elle est destinée à couvrir les besoins en eau potable d'une partie de la ville Bou-smaïl (Wilaya de Tipaza), elle utilise la technique de l'osmose inverse pour dessaler l'eau de mer. Sa capacité journalière de dessalement est de 10 000 m³.



Figure 3. 1 : station de dessalement Bou-smaïl.

3.1 Localisation de la station de Bou-smaïl

La station de dessalement d'eau de mer de Bou-smaïl est localisée dans la wilaya de Tipaza, Daïra de Bou-smaïl, commune de Bou-smaïl à la sortie de Fouka et l'entrée de Bou-smaïl, A 1,5 Km du centre de la ville de Bou-smaïl, elle se trouve à côté de la route nationale RN °11 en provenance d'Alger et en direction vers Chleff.

Elle a une surface environ de 5 175,35 m² et son périmètre est 313,53 m, elle est limitée :

- Au Nord : la mer de Méditerranée.
- Au l'Est : la commune de Fouka.
- Au l'Ouest et le sud : des terres agricoles.



Figure 3. 2 : Image de la station de Bou-smaïl par Google Earth.

3.2 Capacité de la station.

La capacité de la station de traitement d'eau de mer est de 10 000 m³/j. Compte tenu de la demande, et conformément aux rendements de chaque étape du processus défini par la conception, les principaux débits considérés pendant le processus de traitement sont les suivants :

Tableau 3. 1 : capacité de la station de dessalement de Bou-smaïl.

Débit nominal conception (eau)	m ³ /j	10.000
--------------------------------	-------------------	--------

traitée)	m ³ /h	416,67
	l/s	115,74
Disponibilité	%	95

À partir de ces débits et compte tenu du rendement des différentes étapes du processus, les débits utilisés pour conception sont les suivants :

Tableau 3. 2 : débits de conception utilisés pour la station.

Débit d'entrée aux décanteurs lamellaires	m ³ /j	22.494,33
	m ³ /h	937,26
Débit d'entrée à la filtration à sable	m ³ /j	22.494,33
	m ³ /h	937,26
Débit d'entrée à la filtration à cartouches 5 microns	m ³ /j	22.494,33
	m ³ /h	937,26
Débit d'entrée à la filtration de cartouches 1 microns	m ³ /j	22.494,33
	m ³ /h	937,26
Débit d'entrée à l'osmose inverse	m ³ /j	22.494,33
	m ³ /h	937,26

3.3 Installation et processus.

Les différentes installations dans l'usine de dessalement de Bou-smaïl sont :

- Une prise d'eau de mer ;

- Un poste de prétraitement ;
- L'unité d'osmose inverse ;
- Un poste de nettoyage en place CIP (cleaning in place) ;
- Un poste de traitement et de reminéralisation ;
- Un laboratoire d'analyse.
- Une station de contrôle.

3.4 La qualité d'eau d'entrée.

La qualité de l'eau d'entrée, qui est à la base de la conception du prétraitement de la station de dessalement, suit les exigences des spécifications techniques de la station de dessalement.

Tableau 3. 3 : composantes chimiques d'eau de mer à l'entrée de la station.

PARAMÈTRE	Unités	Minimum	Moyenne	Maximum
pH	PH	8,1	8,07	8,04
Ca	mg/l	411	451	758
Mg	mg/l	1.227	1.136	1.367
Na	mg/l	11.133	11.133	11.668
K	mg/l	362	353	325
HCO ₃ ⁻	mg/l	131	109	134
Cl	mg/l	19.156	20.059	20.556
SO ₄	mg/l	3.869	4.095	3.648
NO ₃	mg/l	0	0	0
NO ₂	mg/l	0,03	0.095	0,155
Fe	mg/l	0	0	0
B	mg/l	5,00	5,00	5,00
F	mg/l	4.7	4.8	4,4
Al	mg/l	1,97	0,93	0,98
Cu	mg/l	0,015	0	0,01

Si	mg/l	0	0	0
Zn	mg/l	0,035	0	0
Mn	mg/l	0,04	0	0,025
As	mg/l	0	0	0
Hg	mg/l	0	0	0,15
Pb	mg/l	4,6	6,25	8,35
Cr	mg/l	0,145	0,140	0,145
Ag	mg/l	0,005	0,015	0
Résidu sec (RS)	mg/l	37.840	39.640	41.210
Dureté totale	°f	628	656	675
Turbidité	NTU	4.3	5,9	1,7

En ce qui concerne les températures de l'eau de mer, la conception a pris comme référence aussi bien les températures maximales que les températures minimales spécifiées et la température moyenne, qui est à la base de l'étude d'exploitation.

Les températures de conception de l'eau de mer à dessaler est 20°C.

3.5 Conditions environnementales de référence

Les conditions environnementales de référence pour la conception de la station de dessalement sont données par le tableau suivant :

Tableau 3. 4 : différentes conditions environnementales de référence.

PARAMÈTRE	Unités	Valeur
Pression barométrique	mm Hg	760
Température ambiante	°C	25
Température de l'eau de	°C	20
Salinité de l'eau de mer	g/l	41

Humidité relative	%	45-90
-------------------	---	-------

3.6 Qualité de l'eau exigée aux différentes phases du processus.

Prétraitement :

- SDI < 5 dans les conditions suivantes :
- < 5 au maximum pendant 95 % du temps.
- Entre 3 et 5 au maximum pendant 5 % du temps.

Sortie de chaque unité d'osmose inverse :

- Salinité ≤ 400 ppm à 20°C
- Bore $\leq 1,2$ ppm

Sortie de réservoir de stockage :

- PH = 7,5 – 8,5
- Salinité < 1,4 g/l

Réservoirs de stockage :

- LSI (Langelier Saturation Index) = -0,2 et 0,2.

3.7 Description de l'installation

3.7.1 Prise d'eau de mer

Une crépine est située à 450 mètres de la plage, à une profondeur de 13 mètres. Elle est reliée à la station par deux conduites gravitaires d'un diamètre de 450 mm chacune.



Figure 3. 3 : prise d'eau.

3.7.2 Pompage d'eau de mer.

À l'entrée de la station, il existe deux pompes centrifuges à axe vertical, chacune ayant une capacité de 500 m³/h. Pour atteindre la capacité de production du projet (10 000 m³/j), les deux pompes sont installées en parallèle sur une même ligne.



Figure 3. 4 : les pompes centrifuges à axe vertical de 500 m³/h.

Les caractéristiques principales des équipements sont données par le tableau suivant :

Tableau 3. 5 : les équipements de la station du pompage d'eau de mer.

POMPAGE D'EAU DE MER		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
N°. De pompes à installer	u	2
N°. De pompes en fonctionnement	u	2
Débit unitaire nécessaire	m ³ /h	468,63
Débit unitaire adopté	m ³ /h	500,00
Pression différentielle	bar	3,60

3.7.3 Prétraitement

3.7.3.1 *Pompage d'eau décantée.*

Le pompage de l'eau décantée se fait à l'aide de pompes centrifuges d'une capacité de 250 m³/h à 4,00 bars. Il y a quatre pompes installées en parallèle sur une même ligne, pour atteindre la capacité de production du projet de 10 000 m³/j.



Figure 3. 5 : les pompes centrifuges à axe horizontal.

Les caractéristiques principales des pompes utilisées sont données par le tableau suivant :

Tableau 3. 6 : les équipements de la station du pompage d'eau décantée.

POMPAGE D'EAU DE MER		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
N°. de pompes à installer	u	4
N°. De pompes en fonctionnement	u	4
Débit unitaire nécessaire	m ³ /h	234,3
Débit unitaire adopté	m ³ /h	250,00
Pression différentielle	bar	4,00

3.7.3.2 *Décantation lamellaire*

La décantation est réalisée à l'aide de deux décanteurs lamellaires en béton armé. Chaque décanteur de la station est équipé de vannes d'isolement en amont et en aval, de vannes automatiques de purge de boues, et de tout autre équipement nécessaire pour un bon fonctionnement.



Figure 3. 6 : décanteur lamellaire.

Le contrôle du fonctionnement de la purge des boues de chaque décanteur lamellaire se fait à travers des vannes de purge associées à chaque décanteur (4 vannes par décanteur).

Tableau 3. 7 : décanteur lamellaire.

DÈCANTEUR LAMELLARE		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
N°. Décanteurs installés	u	2
N°. Décanteur en fonctionnement	u	2
Débit unitaire	m ³ /h	468,6
Longueur de la zone de décantation	m	7,00
Largeur de la zone de décantation	m	6,50
Hauteur Décanteur	m	4,52
Volume de décanteur	m ³	205,66
Temps de rétention	min	26,33
Section décanteur	m ²	31,64
Vitesse ascensionnel finale	m/h	14,81
Surface lamellaire	m ²	35,70
Volume Lamellaire	m ³	24,99
Surface projeté pour m ³ lamellaire	m ² /m ³	13,00
Total surface projeté	m ²	324,87
Taxe superficielle	m ³ /m ² h	1,44

3.7.3.3 Filtration

i. Filtration à sable sous pression :

La filtration est réalisée moyennement une batterie de filtres à sable fermés multicouches, silex/anthracite.



Figure 3. 7 : filtres à sable fermés.

Les caractéristiques principales de construction et d’exploitation des filtres à sables sont données par le tableau suivant :

Tableau 3. 8 : caractéristiques des filtres à sable.

FILTRES		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
Nombre de filtres	u	8
Diamètre	m	2,50
Longueur cylindrique	m	5,00
Surface unitaire	m ²	12,50
Hauteur de la couche de sable	m	0,5
Débit unitaire (Tous les filtres opérationnels)	m ³ /h	117,16
Vitesse de filtration (Tous les filtres opérationnels)	m/h	9,37

Chaque filtre à sable est équipé :

- D'une soupape de sécurité.
- D'un système automatique de purge d'air.
- D'un système manuel de vidange par le bas.
- De deux trous d'homme (haut et bas du filtre ou compartiment) de diamètre 500 mm au minimum.
- D'un orifice de diamètre approprié pour l'évacuation de la masse filtrante.
- De cinq vannes automatiques au minimum de diamètres appropriés et ce, pour l'admission de l'eau brute, la sortie de l'eau filtrée, la sortie des eaux de lavage, la sortie des eaux de rinçage à l'eau brute et l'admission de l'air de lavage.
- D'une prise d'échantillon de l'eau filtrée.

Le système de filtres à sable est équipé avec un indicateur transmetteur de pression différentielle permettant de transmettre l'information au PLC et de générer une alarme en cas d'atteinte de perte de charge maximale à travers les filtres.

ii. Système de nettoyage des filtres :

Le nettoyage des filtres se fait automatiquement à l'aide de l'air et de l'eau, avec un équipement commun. Les caractéristiques principales des équipements de contre-lavage sont données par le tableau suivant :

Tableau 3. 9 : les équipements de système de nettoyage des filtres.

CONTRE-LAVAGE DE FILTRES		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
Nombres de pompes de lavage à eau	u	1+1
Débit unitaire	m ³ /h	250
Pression différentielle	Bar	2,02
Compresseur d'air		
Nombre de soufflantes de lavage à air	u	1+1
Débit unitaire de soufflantes	Nm ³ /	750
Pressions différentielles de soufflantes	Bar	0,5

Les pompes de lavage sont de type centrifuge à un axe horizontal avec une vitesse de rotation fixe à 3000 tours/minute au maximum. Le matériau des pompes de lavage est en acier inoxydable. Chaque pompe de lavage est équipée :

- Des vannes d'isolement en amont et en aval.
- De clapet anti-retour.
- De compensateurs amont en caoutchouc armé ou autre système équivalent ou joint de démontage.

Le compresseur d'air est équipé :

- D'un silencieux.
- D'un capteur de pression avec transmetteur sortie 4-20 mA avec affichage local.
- D'un indicateur de débit, d'un filtre à l'aspiration et d'une soupape de sûreté, des vannes manuelles d'isolation.

Pour le lavage à l'eau des filtres, la saumure en provenance de l'osmose inverse sera utilisée. C'est pour cela qu'une cuve de stockage à saumure avec assez de capacité pour le lavage des filtres a été prévue. Le lavage avec saumure permet d'utiliser partiellement ce sous-produit. De plus, ce lavage produit un choc osmotique qui permet de contrôler la croissance bactérienne dans les filtres.

iii. Filtres à cartouches 5 microns :

Pour cette étape de traitement, 4 filtres (un par ligne) à cartouches de 5 microns de porosité, construits en PRFV, seront disponibles. Les filtres possèdent des cartouches à filtration de 1.250 mm de longueur. Les caractéristiques principales des filtres à cartouche sont :

Tableau 3. 10 : filtres à cartouche 5 microns.

FILTRES A CARTOUCHES		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
Unités	u	4
Débit unitaire (opération normale)	m ³ /h	234,32
Nombre de cartouches par filtre	u	91

Pression de conception	bar	4,0
Degré de filtration	microns	5

Le contrôle du colmatage du micro-filtre est assuré par deux indicateurs de pression installés en ligne.

3.7.3.4 Réactifs chimiques.

i. Dosage d'hypochlorite de sodium en Prétraitement

Le dosage d'hypochlorite de sodium lors du prétraitement a été prévu avant l'entrée d'eau de mer vers les filtres à sable. De cette façon, la station offre la possibilité de contrôler la croissance de microorganismes et peut donc empêcher le colmatage ou la contamination des filtres et des membranes.



Figure 3. 8 : dispositif de dosage d'hypochlorite de sodium.

Les caractéristiques principales de dosage d'hypochlorite de sodium sont données par le tableau suivant :

Tableau 3. 11 : caractéristiques de dosage d'hypochlorite de sodium en prétraitement.

DOSAGE D'HYPOCHLORITE		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
Dose normale sur conception	ppm	1
Dose maximale sur conception	ppm	3
Nombre de pompes	unités	4+1
Nombre de bacs	unités	1
Matériaux des bacs	-	PE
Capacité unitaire	litres	5.000

ii. Stockage et dosage d'hydroxyde de sodium

Le dosage d'hydroxyde de sodium est prévu dans deux points du prétraitement : Avant l'entrée des filtres à cartouches. Dans ce cas il s'agit d'un dosage éventuel au cas où le pH doit être légèrement modifié. Les caractéristiques principales du dosage d'hydroxyde de sodium sont :

Tableau 3. 12 : dosage d'hydroxyde de sodium.

DOSAGE D'HYDROXYDE DE SODIUM		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
Dose normale sur conception	ppm	5,00
Dose maximale sur conception	ppm	10,00
Nombre de pompes	Unités	4+1
Nombre de bacs de préparation	Unités	1
Capacité unitaire	Litres	4.000
Matériaux des bacs	-	PE

iii. Dosage de dispersant :

Pour empêcher des incrustations dans les membranes, un système de dosage de dispersant capable de doser avant les filtres à cartouche. L'installation possède les caractéristiques données par le tableau suivant :

Tableau 3. 13 : caractéristiques de dispersant.

DOSAGE DE DISPERSANT		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
Dose normale sur conception	ppm	0,70
Dose maximale sur conception	ppm	2,00
Nombre de pompes	Unités	4+1
Nombre de bacs	Unités	2
Matériaux des bacs	-	PE
Capacité unitaire	Litres	1.000

iv. Stockage et dosage du bisulfite de sodium

À fin d'empêcher l'entrée de chlore libre vers les membranes, un système de dosage de bisulfite de sodium capable de doser dans le mélangeur statique placé après les filtres à cartouche.

Tableau 3. 14 : caractéristiques du bisulfite de sodium.

DOSAGE DU BISULFITE DE SODIUM		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
Dose normale sur conception	ppm	2,50
Dose maximale sur conception	ppm	7,50
Nombre de pompes	unités	4+1
Nombre de cuves	unités	1
Matériaux des cuves	-	PE
Capacité unitaire	litres	1.000

Les systèmes de dosages comportent un bac équipé d'un système de lecture de niveau, d'un détecteur de niveau bas avec génération d'alarme et transmission du signal au PLC et d'une

vidange raccordée au système de rejet de la station de dessalement. Les dosages de ces réactifs sont faits en ligne (automatique).

3.7.4 Système de dessalement

3.7.4.1 Pompage à haute pression et récupération d'énergie

Quatre racks ont été envisagés, chacun avec une pompe à haute pression et une pompe booster. La récupération d'énergie produite dans le courant de saumure est récupérée moyennant des chambres d'échange de pression (type ERI's).

La pompe à haute pression choisie est une pompe centrifuge à l'axe horizontal avec une alimentation de 400 V. Étant donné que la consommation d'énergie de ces équipements est la plus élevée de la station et leur durée de fonctionnement est assez longue, un souci spécial a été porté sur le rendement hydraulique pendant leur fonctionnement.

Le réglage du système est fait à l'aide d'une vanne de contrôle placée à la sortie de la saumure des ERI's et du variateur de fréquence des pompes booster.

Tableau 3. 15 : Pompage à haute pression et récupération d'énergie.

EQUIPEMENT		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
N° de pompes à haute pression	ud	4
Débit unitaire PAP	m ³ /h	105
Pression différentielle PAP	bar	61
Puissance du moteur	kW	320
Type de démarrage	-	Démarrage statique
N° de pompes booster	ud	4
Débit unitaire booster	m ³ /h	126
Pression différentielle booster	bar	3,0
Type de démarrage	-	Variateur de fréquence
N°. De chambres d'échange de pression par ligne	ud	2
Débit d'entrée par ligne	m ³ /h	125

Chaque pompe à haute pression est équipée :

- D'un capteur de pression avec transmetteur sortie 4-20 mA avec affichage local pour l'indication de la pression et d'un pressostat générant une alarme de basse pression avec transmission de signal au PLC, installés au niveau de l'aspiration.
- D'un capteur de pression avec transmetteur sortie 4-20 mA avec affichage local pour l'indication de la pression et d'un pressostat générant une alarme de haute pression avec transmission de signal au PLC, installés au niveau du refoulement.
- Des vannes d'isolement en amont et en aval.
- D'un clapet anti-retour
- D'un compensateur amont en caoutchouc armé ou autre système équivalent ou joint de démontage.

Les pompes boosters sont de type centrifuge à l'axe horizontal, et elles sont équipées :

- Au niveau du refoulement, d'un capteur de pression avec transmetteur sortie 4-20 mA avec affichage local pour l'indication de la pression et d'un pressostat générant une alarme de haute pression avec transmission de signal au PLC.
- De vannes d'isolement amont et aval, d'un clapet anti-retour, et tout autre équipement nécessaire pour le bon fonctionnement du groupe électropompe.

Chaque système de récupération d'énergie est équipé :

- En amont et en aval, d'un capteur de pression avec transmetteur sortie 4-20 mA avec affichage local pour l'indication de la pression et d'un pressostat générant une alarme de haute pression avec transmission de signal au PLC.

3.7.4.2 Le bloc d'osmose inverse

L'osmose inverse est l'unité de traitement de base d'une station de dessalement. Son rendement et, par conséquent, la qualité de l'eau traitée par l'osmose inverse est liée à la température de l'eau d'alimentation, à la salinité et à la pression de travail.



Figure 3. 9 : le bloc de l'osmose inverse.

Il existe quatre blocs d'osmose inverse, dont les caractéristiques sont données par le tableau suivant :

Tableau 3. 16 : blocs d'osmose inverse.

BLOCS D'OSMOSE INVERSE		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
N°. De lignes (trains)	u	4
N°. De racks par ligne	u	1
Débit d'alimentation par ligne	m ³ /h	235
Débit produit par châssis	m ³ /h	104
Type de membrane	-	Enroulement en spirale
Matériel des membranes	-	Polyamide aromatique
Diamètre des membranes	mm	200

N° de boîtes à pression par ligne (tubes)	u	21
Matériaux boîtes à pression	-	PRFV
N° de membranes par boîte à pression	u	8
N° de membranes par châssis	u	168
Conversion	%	45

Le châssis métallique supportant les tubes de pression est en acier.

Le contrôle des pertes de charge ainsi que la pression d'attaque de chaque étage est assuré par des indicateurs et transmetteurs de pression qui sont installés comme suit :

- À l'entrée des tubes de pression.
- À la sortie de saumure au niveau du système osmose inverse
- Au niveau de la conduite de collecte du perméat.

Les collecteurs de perméat sont équipés d'un indicateur et transmetteur de conductivité ainsi qu'un débitmètre électromagnétique permettant l'affichage et la transmission de l'information au PLC.

L'eau osmosée provenant de chacun des châssis de membranes est collectée dans un collecteur commun. Après l'ajout d'hydroxyde de calcium, elle est conduite en tant qu'eau traitée vers le réservoir d'eau traitée.

3.7.4.3 Système de nettoyage chimique

Pour le nettoyage chimique des membranes, le système suivant est utilisé :

Tableau 3. 17 : système de nettoyage chimique.

SYSTÈME DE NETTOYAGE CHIMIQUE		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
N° de cuves de lavage	u	1
Capacité des cuves de lavage	m ³	6
N° pompes de lavage	u	1
Matériaux pompes	-	Acier 316L

Débit unitaire	m ³ /h	230
Pression différentielle	bars	4,00
Filtres à cartouches	u	1
Matériaux filtre	-	PRFV

Le filtre à cartouche pour la filtration de la solution de nettoyage est équipé de cartouches filtrantes avec un seuil de filtration de 5 microns en absolue.

3.7.4.4 Système de rinçage (flushing)

Pour le rinçage des châssis, on utilise un dispositif dont les caractéristiques principales sont données par le tableau suivant :

Tableau 3. 18 : système de rinçage (flushing).

SYSTÈME DE DÉPLACEMENT		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
N° de cuves de lavage	u	1
Capacité des cuves de lavage	m ³	6
N° de pompes de déplacement	u	1+1
Débit unitaire	m ³ /h	230
Pression différentielle	bars	4,00

3.7.5 Post-traitement.

Pour la ré-minéralisation de l'eau osmosée, un système de dosage d'hydroxyde de calcium est prévu. Grâce à la réaction on obtient les bicarbonates nécessaires pour la ré-minéralisation de l'eau.

3.7.5.1 Stockage et dosage d'hydroxyde de calcium.

Compte tenu des caractéristiques de qualité spécifiées pour l'eau traitée, un système de stockage et dosage d'hydroxyde de calcium est prévu. Le système possède un système de stockage à Ca(OH)₂ qui alimente des cuves de préparation de lait de chaux. Le lait de chaux s'envoie vers des saturateurs à chaux conçus pour un temps de rétention de 90 min. L'eau saturée de chaux s'envoie moyennant un groupe de pompage vers un mélangeur statique de la ligne d'eau traitée.



Figure 3. 10 : cuves de préparation de lait de chaux.

Les caractéristiques principales de l'installation sont :

Tableau 3. 19 : stockage et dosage d'hydroxyde de calcium.

INSTALLATION DE $\text{Ca}(\text{OH})_2$		DONNÉES (10.000 m^3/j)
Dose normale sur conception	mg/l	50,00
Nombre de silos	unités	1

Capacité unitaire	m ³	45
Concentration	%	2
Cuves à préparation	u	1
Capacité unitaire des cuves	l	1.000
Pompes à lait de chaux	unités	2+1
Débit de chaux saturé	m ³ /h	25,00
Nombre de pompe	u	2+1

3.7.5.2 Stockage et dosage d'hypochlorite de sodium.

La fonction principale du dosage d'hypochlorite de sodium est le contrôle de la croissance des microorganismes dans l'eau traitée. L'installation de dosage et de stockage est la même que celle spécifiée dans la section de prétraitement, où une cuve d'hypochlorite de sodium est placée. Les principales caractéristiques de stockage et de dosage d'hypochlorite de sodium sont :

Tableau 3. 20 : stockage et dosage d'hypochlorite de sodium.

DOSAGE D'HYPOCHLORITE		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
Dose normale sur conception	ppm	1
Nombre de pompes	unités	2+1
Nombre de bacs	unités	2
Matériaux des bacs	-	PE
Capacité unitaire	litres	500

Le système de stockage et dosage comporte :

- Le bac est équipé d'un système de lecture de niveau, d'un détecteur de niveau bas avec génération d'alarme et transmission du signal au PLC et d'une vidange raccordée au système de rejet de la station de dessalement.

- D'un système de mesure de chlore libre en ligne avec sonde installée dans une chambre de mesure. La mesure du chlore libre sera faite au niveau de réservoirs de stockage avec afficheur et transmetteur du signal au PLC ou au régulateur.

3.7.5.3 Pompage d'eau traitée.

Le pompage d'eau traitée porte à terme moyennant l'utilisation de pompes centrifuges de 250 m³/h à 13,50 bars. Pour la capacité de production du projet (10.000 m³/j), les trois pompes sont installées, une en réserve. Les caractéristiques principales des pompes sont :

Tableau 3. 21 : pompage d'eau traitée.

POMPAGE D'EAU DE MER		DONNÉES (10.000 m ³ /j)
N°. De pompes à installer	u	3
N°. De pompes en fonctionnement	u	2
Débit unitaire nécessaire	m ³ /h	208,5
Débit unitaire adopté	m ³ /h	250,00
Pression différentielle	bar	13,50

Chaque pompe de la station de pompage d'eau traitée est équipée de vannes d'isolement en amont et en aval, d'un clapet anti-retour, de joint de démontage ou équivalent et de compensateur aval et tout autre équipement nécessaire pour le bon fonctionnement du groupe électropompe.

3.7.6 La salle de contrôle.

La salle de contrôle est munie de deux ordinateurs. L'opération de l'usine est suivie via un système SCADA installé dans les ordinateurs. L'opération a accès aux données d'opération telles que : l'état les équipements (ON-OFF-FAILURE) et des valeurs analogiques des différents éléments de l'usine. L'opérateur aura la possibilité de fonctionner/arrêter les pompes via les ordinateurs. (*Annik & Michele, 1994*).



Figure 3. 11 : salle de contrôle de la station.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la station de dessalement d'eau de mer de Bou-smaïl, réalisée par l'entreprise Foremhyd SPA. Cette station est conçue pour couvrir les besoins en eau potable de la ville Bou-smaïl et d'une partie de la Wilaya de Tipaza, en utilisant la technique de l'osmose inverse pour dessaler l'eau de mer. La capacité journalière de dessalement de la station est de 10 000 m³. Nous avons détaillé la localisation de la station, ses caractéristiques techniques, et les équipements utilisés, y compris les pompes et le système de contrôle. Cette présentation permet de comprendre les aspects logistiques et techniques essentiels pour le fonctionnement efficace de la station de dessalement de Bou-smaïl.

Chapitre 4

4 Etude de la performance de la station de Bou-smaïl

Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'étude approfondie de la station de dessalement de Bou-smaïl, en examinant différents aspects de son fonctionnement et de son évaluation.

Nous débutons par une étude expérimentale menée au laboratoire de la station de dessalement. L'objectif est d'effectuer un contrôle qualité des eaux produites, en mettant l'accent sur les paramètres physico-chimiques essentiels tels que le pH, la température, la conductivité, la turbidité et la concentration en chlore.

Ensuite, nous procédons au calcul des principaux indicateurs de performance de la station. Cela inclut le taux de conversion (R), la concentration de perméat (Cp) et l'énergie de consommation spécifique (ECS), essentiels pour évaluer son efficacité opérationnelle.

Enfin, nous examinons la configuration de la station à l'aide du logiciel IMSDesign. Cette analyse vise à optimiser la conception et le fonctionnement de la station en intégrant les données de l'étude expérimentale et les performances évaluées à l'aide des indicateurs de performance.

4.1. Analyse des paramètres physico-chimique

L'analyse des paramètres physico-chimiques à l'amont et à l'aval de l'osmose inverse consiste à évaluer les caractéristiques de l'eau avant et après son passage à travers le système d'osmose inverse. Cette analyse vise à comprendre les changements survenant dans la composition et les propriétés de l'eau tout au long du processus de traitement.

4.1.1. Échantillonnage et méthodologie.

Pour définir les paramètres physico-chimiques, le prélèvement s'effectue méticuleusement à l'aide de flacons ou de béchers stérilisés afin d'éviter toute contamination externe. Plusieurs points de prélèvement sont déterminés pour assurer une représentativité adéquate des différentes phases du traitement de l'eau.

Pour l'eau brute, le nombre de prélèvements varie en fonction des variations de la qualité de l'eau. En général, des échantillons sont prélevés de 1 à 2 fois par jour aux points d'entrée du

décanteur, avant le processus de chloration. Ensuite, des prélèvements sont effectués au niveau du décanteur, à deux points distincts : avant et après le dosage des produits chimiques.

Pour l'eau décantée, les prélèvements sont réalisés à la sortie du déversoir, après que la station ait atteint un régime stable, généralement après environ 3 heures de fonctionnement.

Pour l'eau filtrée et l'eau de perméat le prélèvement se fait dans les réservoirs.

4.1.2. Résultats des analyses :

Les différents résultats des mesures chimiques des paramètres de qualité de l'eau sont donnés dans les tableaux ci-dessous. Les prélèvements ont été effectués au niveau des lignes de fonctionnement de la station : (Ligne 1, Ligne 2, Ligne 3), et les conditions météorologiques étaient caractérisées par un temps ensoleillé et une mer calme.

i. Echantillon : Eau brute/Eau décantée

Tableau 4. 1 : analyse des paramètres d'eau brute/eau décanté au matin et à l'après midi.

paramètre	unité	Eau brute	Eau décanté	Eau brute	Eau décanté
T	H	10h00	10h00	16h00	16h00
Ph	/	8,2	8,2	8,2	8,2
Conductivité	mS/cm	52,9	52,9	52,9	52,9
Turbidité	NTU	0,59	0,34	0,62	0,54
Température	°C	28,1	28,0	28,7	28,2

ii. Echantillon : Eau filtrée

Tableau 4. 2 : analyse de la turbidité d'eau filtrée au matin et à l'après midi.

paramètre	unité	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
T	H	10h00	10h00	10h00	16h00	16h00	16h00	16h00	16h00
Turbidité	NTU	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

iii. Echantillon : Eau Micro-filtrée

Tableau 4. 3 : analyse de la turbidité d'eau micro-filtrée au matin et à l'après midi.

paramètre	unité	L1	L2	L3	L4	L1	L2	L3	L4
T	H	10h00	10h00	10h00	16h00	16h00	16h00	16h00	16h00
Turbidité	NTU	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

iv. **Echantillon : Eau de perméat****Tableau 4. 4** : analyse de la conductivité d'eau de perméat au matin et à l'après midi.

paramètre	unité	L1	L2	L3	L1	L2	L3
T	H	10h00	10h00	10h00	16h00	16h00	16h00
conductivité	μ/cm	455	389	519	454	395	520

v. **Echantillon : Eau traitée****Tableau 4. 5** : analyse des paramètres d'eau traitée au matin et à l'après midi.

Paramètre	Unité	10h00	16h00
Ph		7.77	7.81
Conductivité	μ/cm	459	466
Turbidité	NTU	0,00	0,00
Température	°C	27,0	27,4
Cl ₂	PPM	0,38	0,39

4.1.3. Interprétation et discussion des résultats.

L'eau constitue l'élément le plus important pour la survie et le confort de l'être humain. C'est pourquoi les paramètres de qualité des eaux destinés à la consommation humaine sont très importants. Ces paramètres ont toujours requis l'attention des autorités sanitaires et gouvernementales aussi bien à l'échelle internationale que locale. A titre d'exemple l'Organisation de la Santé Mondiale (OMS) s'est penchée sur la question des normes de qualité des eaux depuis sa création vue l'importance du sujet et son impact sur la santé.

Le gouvernement Algérien a aussi contribué de manière officielle à imposer ces paramètres à travers plusieurs lois. Le décret exécutif n°11-125 du 22 mars 2011 a fixé les paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine ainsi que les modalités de contrôle de conformité, *l'annexe 1* donne un aperçu des principaux paramètres concernés (*Belhouari et Belhadji*, 2021).

Les analyses des paramètres physico-chimiques de l'eau à la station de dessalement de Bou-smaïl, avant et après le processus de l'osmose inverse ont révélé des changements significatifs dans la qualité de l'eau traitée. Ces analyses permettent d'évaluer l'efficacité du processus de dessalement et de s'assurer que l'eau produite respecte les normes de qualité définies par les autorités sanitaires.

i. PH

Eau brute et décantée : Le pH reste constant à 8,2, ce qui indique une eau légèrement alcaline avant et après la décantation.

Eau traitée : Le pH de l'eau traitée est légèrement plus bas, se situant entre 7,77 et 7,81, ce qui est idéal pour l'eau potable selon les normes internationales.

ii. Conductivité

Eau brute et décantée : La conductivité est de 529 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indiquant une concentration relativement élevée en sels dissous.

Eau de perméat : Après osmose inverse, la conductivité diminue significativement à environ 455-520 $\mu\text{S}/\text{cm}$, montrant une réduction efficace des sels.

Eau traitée : La conductivité de l'eau traitée est légèrement supérieure (459-466 $\mu\text{S}/\text{cm}$) à celle de l'eau de perméat, ce qui peut être dû à une légère reminéralisation pour ajuster le goût et la potabilité.

iii. Turbidité

Eau brute et décantée : La turbidité de l'eau brute varie entre 0,59 et 0,62 NTU et diminue après décantation à 0,34-0,54 NTU.

Eau filtrée et micro-filtrée : La turbidité est à 0 NTU, indiquant une eau claire sans particules en suspension.

Eau traitée : La turbidité reste à 0 NTU, confirmant l'efficacité de l'osmose inverse et des étapes de filtration précédentes.

iv. Température

Les variations de température entre les différentes étapes du traitement sont mineures (27-28,7 °C pour l'eau brute et décantée et 27-27,4 °C pour l'eau traitée), indiquant une stabilité thermique du processus.

v. Chlore

La concentration en chlore dans l'eau traitée est maintenue entre 0,38 et 0,39 ppm, suffisant pour assurer la désinfection tout en respectant les normes de potabilité.

Ces résultats des analyses montrent que le processus d'osmose inverse à la station de dessalement de Bou-smaïl est très efficace pour améliorer la qualité de l'eau. La réduction significative de la conductivité et de la turbidité après le traitement indique une élimination efficace des sels dissous et des particules, rendant l'eau conforme aux normes de qualité de l'OMS et des réglementations algériennes.

La stabilité du pH et de la température à travers les différentes étapes du traitement confirme l'efficacité du processus sans altérations indésirables des propriétés essentielles de l'eau. La présence contrôlée de chlore dans l'eau traitée assure une protection continue contre les contaminations microbiologiques tout en restant dans les limites acceptables pour la consommation humaine.

4.2 Calcul des paramètres de performance de la station de dessalement

L'objectif des calculs suivants est de déterminer ces paramètres clés pour la station de dessalement de Bou-smaïl, en utilisant les données spécifiques fournies. Ces résultats permettront d'évaluer la performance actuelle de la station, d'identifier les domaines d'amélioration potentiels et de proposer des recommandations pour optimiser l'efficacité opérationnelle et énergétique.

4.2.1 Taux de Conversion (R)

Le taux de conversion, ou taux de récupération, représente la proportion de l'eau d'alimentation qui est convertie en perméat. Un taux de conversion élevé signifie une utilisation efficace de l'eau d'alimentation, mais il faut également gérer les concentrations de sel dans le rejet. Ce taux est essentiel pour optimiser la production d'eau potable tout en minimisant les déchets. Il se calcule par la formule :

$$R = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100 \quad (4.1)$$

Données de départ :

Débit d'alimentation (Q_F) : 937,26 m³/h

Débit de perméat (Q_P) : 416,67 m³/h.

Calcul :

Substituons les valeurs dans la formule on obtient :

$$R = (416,67 \div 937,26) \times 100$$

$$R \approx 45 \%$$

4.2.2 Concentration de perméat (C_p) :

La concentration de perméat est un indicateur direct de la qualité de l'eau produite. Elle mesure la quantité de sels résiduels dans l'eau perméat après le processus de dessalement. Une faible concentration de perméat est souhaitable car elle indique une élimination efficace des sels, rendant l'eau appropriée pour la consommation humaine et d'autres usages. La concentration de perméat est calculée en utilisant la concentration de l'eau d'alimentation et le taux de rejet de sel selon la formule suivante :

$$C_p = C_f \times (1 - SR) \quad (4.2)$$

Où :

C_f : est la concentration du sel en l'eau d'alimentation (brute).

SR : est le taux de rejet de sel.

Données de départ :

$$C_f = 37349 \text{ mg/L}$$

$$SR = 0.998 \text{ (ou } 99.8\%)$$

Calcul :

En substituant les valeurs dans la formule, nous obtenons :

$$C_p = 37349 \times (1-0.998)$$

$$C_p = 37349 \times 0.002$$

$$C_p = 74,698 \text{ mg/L}$$

4.2.3 Énergie de Consommation Spécifique (ECS).

L'énergie de consommation spécifique est une mesure de l'efficacité énergétique du processus de dessalement. Elle indique la quantité d'énergie consommée pour produire un mètre cube de perméat. Une faible énergie spécifique est indicative d'une opération éco-énergétique et rentable.

Pour calculer l'énergie spécifique, nous avons besoin de la consommation d'énergie totale et de la production de perméat.

Etapas de calcul de l'ECS :

i. Calcul de la puissance hydraulique (P_h)

La puissance hydraulique est calculée par la formule suivante :

$$P_h = \rho \times g \times Q \times H \quad . (4.3)$$

Avec : ρ est la masse volumique de l'eau (environ 1000kg/m^3) ; g est l'accélération de la gravité ($10 \text{ m}^2/\text{s}$) ; Q est le débit de pompage ; H est la pression de pompage.

- Pour les pompes à hautes pression :

$$Q = 0,12 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H = 65 \text{ Bar.}$$

$$P_{hl} = 1000 * 10 * 0,12 * (65 * 10)$$

$$P_{hl} = 780000 \text{ W}$$

$$P_{hl} = 780 \text{ KW}$$

- Pour les pompes booster : Aussi, on a quatre pompes booster, avec (la pression 3 Bar)

$$Q = 126 \times 4 = 504 \text{ m}^3/\text{h} = 0,14 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_{h2} = 1000 \times 10 \times 0,14 \times (3 \times 10)$$

$$P_{h2} = 42000 \text{ W}$$

$$P_{h2} = 42 \text{ KW}$$

Ce qui fait la puissance totale des pompes :

$$P_{ht} = P_{h1} + P_{h2}$$

$$P_{ht} = 780 + 42$$

$$P_{ht} = 822 \text{ KW}$$

ii. Calcul de la puissance absorbé (P_A)

La puissance absorbée est calculée par l'expression suivante :

$$P_A = \frac{Ph}{\eta} \quad (4.4)$$

Sachant que le rendement η de la pompe HP et booster sont 72,2 %.

$$P_{A1} = \frac{780}{0,722} = 1080,33 \text{ KW}$$

$$P_{A2} = \frac{42}{0,72} = 58,17 \text{ KW}$$

$$P_{At} = P_{A1} + P_{A2}$$

$$P_{At} = 1080,33 + 58,17$$

$$P_{At} = 1138,5 \text{ KW}$$

iii. Calcul de l'énergie consommée (E)

L'énergie consommée dépend du temps de fonctionnement et de la puissance absorbée. Elle est donnée par la formule suivante :

$$E_c = P_{At} * t \quad (4.5)$$

Nous considérons un temps de fonctionnement de 24 heures. Ce qui donne :

$$t = 24 \text{ h}$$

$$E_c = 1138,5 * 24$$

$$E_c = 27324 \text{ kWh}$$

iv. Calcul de l'Energie de consommation spécifique (E_{CS})

L'ECS est le rapport entre l'énergie consommée et le volume d'eau produite. Elle est donnée par la relation :

$$E_{CS} = \frac{E_c}{V_p} = \frac{P_a}{Q_p} \quad (4.6)$$

Avec, E_c : est l'énergie consommée ; V_p : le volume de perméat pendant le temps de fonctionnement considéré ; P_a : Puissance absorbée ; Q_p : débit de perméat.

Dans cette étude, nous avons considéré deux cas : fonctionnement sans pompes booste, et fonctionnement avec pompes booster.

- Sans la pompe booster :

$$E_{CS} = 5,61 \text{ kWh/m}^3$$

- Avec la pompe booster :

$$E_{CS} = 2,73 \text{ kWh/m}^3$$

4.2.4 Discussion pour les résultats obtenant.

4.2.4.1 Taux de Conversion (R)

Un taux de conversion de 45% signifie que 45% de l'eau d'alimentation est transformée en eau perméat potable, tandis que les 55% restants sont rejetés sous forme de concentré de saumure. Ce taux est typique des systèmes de dessalement par osmose inverse, surtout ceux traitant de l'eau de mer.

En effet, un taux de conversion de 45% est raisonnable pour les systèmes traitant de l'eau de mer, où des taux de conversion de 40-50% sont courants. De plus, un tel taux permet de gérer

efficacement la qualité de l'eau perméat produite tout en limitant les problèmes liés à des concentrations élevées de sels dans le rejet.

4.2.4.2 Concentration de Perméat (Cp)

La concentration de perméat de 74.7 mg/L indique une excellente qualité de l'eau produite par la station de dessalement. Cette concentration est bien inférieure à la limite de 500 mg/L recommandée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour l'eau potable, garantissant ainsi une eau de haute qualité. Une telle efficacité montre que les membranes utilisées sont très performantes, éliminant la majorité des sels dissous de l'eau d'alimentation.

Cependant, Il est crucial de maintenir cette performance par un entretien régulier des membranes et une surveillance continue de leur état pour éviter tout colmatage ou dégradation.

4.2.4.3 Énergie de Consommation Spécifique (ECS)

La pompe booster joue un rôle important dans la réduction de la consommation d'énergie. Son utilisation permet de réduire l'énergie de consommation spécifique à 2,73 kWh/m³, comparativement à une consommation plus élevée de 5,61 kWh/m³ sans son utilisation. L'énergie spécifique de 2,73 kWh/m³ est une mesure clé de l'efficacité énergétique de la station. Cette valeur est typique pour les systèmes de dessalement par osmose inverse traitant de l'eau de mer, où l'énergie spécifique varie généralement entre 2 et 6 kWh/m³.

Cependant, on peut réduire davantage la valeur de l'ECS en utilisant :

- Des technologies de récupération d'énergie plus performantes, comme des échangeurs de pression modernes et efficaces.
- L'optimisation des pompes haute pression.

L'optimisation de l'énergie consommée permet de diminuer les coûts opérationnels et a également un impact positif sur l'empreinte carbone de la station, ce qui est bénéfique pour l'environnement.

4.3 Simulation du processus de dessalement par le logiciel IMSDesign

Dans cette partie, nous explorons l'utilisation du logiciel IMSDesign pour évaluer et optimiser la performance de la station de dessalement de Bou-smaïl. IMSDesign est un outil puissant et spécialisé dans la conception et l'optimisation des systèmes de dessalement par

osmose inverse. Il permet de modéliser différentes configurations de membranes et de déterminer les paramètres optimaux pour maximiser l'efficacité et la durabilité du système.

Nous allons d'abord entrer les données spécifiques de la station de Bou-smaïl dans le logiciel. Ces données incluent les paramètres physico-chimiques de l'eau, comme le pH, la température, la salinité (TDS), et la conductivité. Ensuite, nous utiliserons IMSDesign pour choisir le meilleur modèle de membrane en fonction des objectifs de performance souhaités.

4.3.1 Configuration des Paramètres Chimiques.

Dans cette étape, les paramètres chimiques de l'eau de mer sont configurés dans IMSDesign. Ces paramètres incluent le pH, la température, la salinité totale dissoute (TDS) et la conductivité ainsi que les cations et les anions. Par exemple, un pH de 8.07, une température de 20 °C, une TDS de 37 349 mg/l et une conductivité de 572 712 μ S/cm sont entrés pour simuler les conditions réelles de la station de dessalement de Bou-smaïl.

Cations		Anions			
	mg/l	mg/l CaCO3			
Ca	451,00	1127,50	HCO3	109,00	89,34
Mg	1136,00	4655,74	SO4	4095,00	4265,63
Na	11133,00	24202,17	Cl	20059,00	28291,96
K	353,00	451,43	F	4,80	12,63
NH4	0,05	0,14	NO3	0,00	0,00
Ba	0,000	0,00	PO4	0,00	0,00
Sr	0,000	0,00	SiO2	0,00	
			B	5,00	
Total, meq/l		608,74	Total, meq/l		653,30

Saturation	
TDS calculé	37349 mg/l
Pression osmotique	26,1 bar
Ca3(PO4)2 SI	0,00
CCPP	23,23 mg/l
CaSO4	34,9 %
BaSO4	0,0 %
SrSO4	0,0 %
CaF2	453,7 %

Figure 4. 1 : configuration des paramètres chimiques dans le logiciel IMSDesign.

4.3.2 Sélection du Modèle de Membrane :

Le logiciel IMSDesign permet de choisir le modèle de la membrane le plus adapté en fonction des paramètres d'entrée et des exigences de la station. Pour ce projet.

Après exécution du logiciel, six membranes adaptées à la station de dessalement de Bou-smaïl nous ont été proposées. La **Figure 4.2** ci-dessous montre les résultats obtenus :

	modèle	Production nominale (GPD)	Rejection des sel, %	Type d'élément	taille (in x in)	Surface (pieds carrés)	Spacer (mil)	Pression de test (psi)	Pression imentatio (bar)	Permeate TDS (mg/l)
C	ESPA4 MAX	13200	99,20	BWRO Lowest Pressure	8 X 40	440	28	100		
C	ESPA4-LD	12000	99,20	BWRO Lowest Pressure Lo...	8 X 40	400	34	100		
C	ESPA4-LD HP	11000	99,20	BWRO Lowest Pressure Lo...	8 X 40	400	34	100		
C	ESPAB MAX	9000	99,30	BWRO Low Pressure Boron...	8 X 40	440	28	150		
C	SWC4 MAX	7200	99,80	SWRO Highest Rejection	8 X 40	440	28	800		
C	SWC4-LD	6500	99,80	SWRO High Rejection Low ...	8 X 40	400	34	800		
C	SWC5 MAX	9900	99,80	SWRO High Rejection	8 X 40	440	28	800		
C	SWC5-LD	9000	99,80	SWRO High Rejection Low ...	8 X 40	400	34	800		
C	SWC6 MAX	6600	99,60	SWRO Highest Flow	8 X 40	440	28	600		
C	SWC6-LD	6000	99,60	SWRO High Flow Low De...	8 X 40	400	34	600		
C	SanRO-HS2-4...	3000	99,60	Sanitary Highest Flow	4 X 40	90	32	225		
C	SanRO-HS-4	2200	99,70	Sanitary High Rejection	4 X 40	90	32	225		
C	SanRO-HS2-8	14000	99,60	Sanitary Highest Flow	8 X 40	380	32	225		
C	SanRO-HS-8	10000	99,70	Sanitary High Rejection	8 X 40	380	32	225		

Figure 4. 2 : les différentes membranes proposées.

4.3.3 Calcul de l'Énergie de Consommation Spécifique.

Comme avons déjà mentionné Le calcul de l'énergie spécifique est crucial pour évaluer l'efficacité énergétique de la membrane.

Le tableau suivant donne le taux de conversion, de concentration de perméat, et l'énergie de consommation spécifique pour les six membranes proposées par IMSDesign et la membrane actuelle. Une comparaison permet d'identifier les avantages et les inconvénients de chaque membrane et de faire des recommandations pour améliorer l'efficacité du processus de dessalement à la station de Bou-smaïl.

Tableau 4. 6 : caractéristiques des différentes membranes

Modèle	Taux de conversion	Cp (Mg/L)	Ecs (KWh/m ³)
Les données de la SW30 HRLE400	45%	74,698	2,73

station				
Simulation par logiciel IMSDesign	SWC4 MAX	45%	141,2	2,81
	SWC4-LD	45%	125,93	2,85
	SWC5 MAX	45%	198,91	2,52
	SWC5-LD	45%	178,35	2,56
	SWC6 MAX	45%	315,22	2,43
	SWC6-LD	45%	286,44	2,41

D'après le *Tableau 4.7*, on remarque que le modèle SWC6-LD (SWRO High Flow Low DP) est le plus performant (car $C_p = 286,44 < 300$ mg/L et $ECS = 2,41$ kWh/m³). Pour l'avenir, nous suggérons d'utiliser ce modèle.

4.3.4 Impact de l'Utilisation de la Pompe Booster.

L'utilisation de la pompe booster est simulée pour évaluer son impact sur les performances énergétiques. Avec la pompe booster, le taux de conversion reste à 45%, mais la concentration de perméat augmente légèrement à 286,44 mg/l, et l'énergie spécifique diminue à 2,41 kWh/m³, indiquant une amélioration significative de l'efficacité énergétique.

Tableau 4. 7 : consommation de l'énergie spécifique des différents types de membranes avec et sans pompe booster.

Modèle de la membrane	Avec la pompe booster	Sans pompe booster
	E_{cs} (KWh/m ³)	E_{cs} (KWh/m ³)
SW30 HRLE400	2,73	5,61
SWC4 MAX	2,81	5,71
SWC4-LD	2,85	5,87
SWC5 MAX	2,52	5,17

SWC5-LD	2,56	5,26
SWC6 MAX	2,43	4,89
SWC6-LD	2,41	4,92

Le **Tableau 4.7** ci-dessus confirme l'importance de la pompe booster en termes de diminution l'énergie spécifique.

4.3.5 Comparaison entre les membranes SW30 HRLE400 et SWC6

Afin de proposer une amélioration future de la station de Bou-smaïl, nous effectuons une analyse comparative entre les deux membranes suivantes :

- La membrane actuelle de la station, SW30 HRLE-400 ;
- La meilleure membrane proposée par le logiciel IMSDesign en termes d'efficacité énergétique, SWC6.

4.3.5.1 Membrane SW30 HRLE400

La membrane SW30 HRLE400 (*Annexe 2*) est un type de membrane d'osmose inverse (RO) conçue pour des applications de dessalement de l'eau de mer. SW signifie "Seawater Composite," indiquant qu'elle est spécialement formulée pour traiter l'eau de mer avec une haute salinité. Les membranes SW30 HRLE400 sont reconnues pour leur capacité à fournir une haute réjection des sels tout en maintenant un flux de perméat significatif, ce qui les rend efficaces pour la production d'eau potable de haute qualité à partir de sources marines. Elles sont souvent utilisées dans des installations de dessalement à grande échelle, où la fiabilité et l'efficacité énergétique sont cruciales.

Caractéristiques clés :

- Haute réjection des sels (>99.5%).
- Flux de perméat modéré à élever.
- Bonne tolérance aux variations de qualité de l'eau d'alimentation.
- Conception robuste pour une longue durée de vie.

4.3.5.2 Membrane SWC6-LD

La membrane SWC6-LD (*Annexe 3*) est une version améliorée de la série SWC, offrant des performances accrues en termes de débit et d'efficacité énergétique. Comme son

prédécesseur, elle est conçue pour le dessalement de l'eau de mer, mais elle intègre des avancées technologiques qui optimisent le flux de perméat tout en maintenant une réjection de sel extrêmement élevée. La désignation "LD" (Low Differential) souvent associée à SWC6 signifie que cette membrane est conçue pour fonctionner à des pressions différentielles plus basses, réduisant ainsi la consommation énergétique et les coûts opérationnels. Cela en fait une option particulièrement avantageuse pour les nouvelles installations ainsi que pour les mises à niveau des systèmes existants.

Caractéristiques clés :

- Très haute réjection des sels (>99.7%).
- Débit de perméat supérieur.
- Réduction de la consommation énergétique (Low Differential).
- Durabilité et fiabilité améliorées pour une utilisation prolongée.

4.3.5.3 Résultats de comparaison

Les membranes d'osmose inverse SW30 HRLE400 et SWC6-LD sont toutes les deux utilisées pour le dessalement de l'eau de mer. Chacune a des caractéristiques spécifiques qui influencent leurs performances en termes d'efficacité de filtration, de consommation énergétique et de qualité de l'eau produite. Cette comparaison met en lumière sur les principales différences entre ces deux modèles pour évaluer lequel est le mieux adapté aux besoins de la station de dessalement de Bou-smaïl.

La comparaison entre les membranes SW30 HRLE400 et SWC6-LD révèle plusieurs points clés :

i. Efficacité de Filtration

La membrane SWC6-LD affiche une réjection des sels légèrement supérieure (>99.7%) comparée à la SW30 HRLE400 (>99.5%). Cela signifie que la SWC6-LD est plus efficace pour produire de l'eau de haute qualité avec une concentration de sels résiduels plus basse.

ii. Débit de Perméat

La SWC6-LD offre un débit de perméat supérieur par rapport à la SW30 HRLE400, ce qui permet une production plus élevée d'eau dessalée dans le même laps de temps.

iii. Consommation Énergétique

La SWC6-LD est conçue pour fonctionner à des pressions différentielles plus basses, ce qui réduit la consommation énergétique spécifique (2,41 kWh/m³ pour la SWC6-LD contre des valeurs plus élevées 2,73 kWh/m³ pour la SW30 HRLE400). L'utilisation de la pompe booster améliore encore cette efficacité énergétique, réduisant l'énergie spécifique 4,41 jusqu'à 2,41 kWh/m³ avec la SWC6-LD.

iv. Durabilité et Fiabilité

La SWC6-LD est une version améliorée, offrant une meilleure durabilité et fiabilité sur le long terme, ce qui peut conduire à des coûts d'exploitation moindres et à une maintenance réduite.

Ces différences montrent que la SWC6-LD, bien que plus avancée technologiquement et potentiellement plus coûteuse à l'achat, offre des avantages significatifs en termes d'efficacité énergétique, de qualité de l'eau produite, et de longévité. La transition vers la SWC6-LD pourrait donc être justifiée pour améliorer la performance globale de la station de dessalement de Bou-smaïl.

Tableau 4.8 : comparaison entre les membranes SW30 HRLE400 et SWC6

Caractéristiques	SW30 HRLE400	SWC6-LD
Type de membrane	Osmose inverse	Osmose inverse
Application principale	Dessalement d'eau de mer	Dessalement d'eau de mer
Matériau de la membrane	Polyamide	Polyamide
Rejet de sel (%)	99,7	99,8
Flux (GPD)	9000	10500
Pression d'opération (psi)	800	800
Tolérance au chlore (ppm)	<0,1	<0,1
Température max (°C)	45	45
PH de nettoyage	1-12	1-12

Surface de la membrane (ft ²)	400	400
Durée de vie estimée (ans)	3-5	3-5
Consommation énergétique	Moyenne	Faible
Coût	1000 \$	952,6 \$

Conclusion

Ce chapitre a fourni une analyse détaillée de la performance actuelle de la station de dessalement de Bou-smaïl, en mettant en évidence les taux de conversion et les concentrations de perméat, et en comparant les performances des membranes SW30 HRLE400 et SWC6-LD. Les résultats montrent que la membrane SWC6-LD offre des avantages significatifs en termes de consommation énergétique et de qualité du perméat. En adoptant cette membrane et en mettant en œuvre les recommandations proposées, la station peut améliorer son efficacité opérationnelle, réduire ses coûts énergétiques et produire une eau de meilleure qualité, tout en minimisant son impact environnemental.

Conclusion

générale

CONCLUSION GENERALE

L'étude de la station de dessalement de Bou-smaïl a démontré la viabilité et l'efficacité de l'utilisation de l'osmose inverse pour produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer. À travers les différentes sections de cette étude, nous avons exploré les processus techniques, les équipements, et les performances opérationnelles de la station.

Les résultats obtenus dans le chapitre 4 montrent que la station de Bou-smaïl est capable de maintenir une performance stable et efficace, avec des indicateurs de performance clés tels que le taux de conversion, la concentration de perméat et l'énergie de consommation spécifique. L'utilisation de systèmes avancés de contrôle et de gestion, comme le SCADA, permet une surveillance continue et une optimisation des opérations, assurant ainsi une qualité constante de l'eau produite.

Globalement, le dessalement par osmose inverse se révèle être une solution durable et efficace pour répondre aux besoins en eau potable dans les régions côtières où les ressources en eau douce sont limitées. Les avantages de cette technologie incluent une capacité de traitements élevés, une efficacité énergétique relativement bonne, et la production d'eau de haute qualité. Cependant, des défis subsistent, notamment en ce qui concerne la gestion des rejets de saumure et la consommation d'énergie.

En conclusion, la station de dessalement de Bou-smaïl illustre bien comment les technologies modernes peuvent être utilisées pour résoudre les problèmes d'approvisionnement en eau, tout en mettant en évidence la nécessité de poursuivre les recherches et les améliorations pour minimiser les impacts environnementaux et optimiser l'efficacité opérationnelle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Acer Revue Arzate Alfa. "La séparation membranaire : comment maintenir la performance des membranes." 2010.

Alain M. "Dessalement d'eau de mer et d'eau saumâtre." 1ère édition : 2006.

Alam Ibtissem et Kerroum Amina. "Optimisation de fonctionnement d'une unité de traitement des eaux à IN SALAH." Mémoire pour l'obtention du Diplôme DEUA en Hydraulique, 2008.

Annick Bourche et Michèle Le Bars. "Techniques de séparation par les membranes : vocabulaire français-anglais." 1994. P 60.

Bandelier Philippe. "Le dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres." Article : 121 janv-2017.

Benaissa Fatima Zohra. "Etude sur le procédé d'osmose inverse pour le dessalement des eaux faiblement saumâtres." Mémoire de Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention du Diplôme de Master en Hydraulique, 2013.

Belhaji Noura. "Impacts des rejets des stations de dessalement sur l'environnement : cas de la station de dessalement de l'eau de mer de Fouka (SDEM de Fouka wilaya de Tipaza)." Mémoire de l'Université Saad Dahlab-Blida, 2019.

Belalia Sihem Zahia. "Préparation des membranes à base de matériaux polymères et inorganique." Pour l'obtention du diplôme Master en Chimie, Université de Tlemcen, 2018.

Belhouari Oumehani et Belhadji Houaria. "Etude et comparaison de l'eau de dessalement (SONACTER) avec les eaux potables de la ville de Mostaganem." Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme de Master en Chimie, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2021.

Berland Marc et Juer Catherine. "Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau." Document technique FNDAE N°14, Décembre 2002.

Bessenasse Mohamed. "Dessalement d'eau de mer : étude de trois stations du littoral algérois », 14th International Soil Conservation Organization Conference, Marrakech, Morocco, 2006.

Bessenasse Mohamed Belkacem Filali. "Impact du dessalement sur l'environnement en Algérie." Revue Agrobiologie 2014 ; N°6, 75-81.

Bushnak Adil. "Évaluation des meilleures technologies disponibles pour le dessalement en zones rurales/locales." Version 2 Projet financé par l'Union européenne, 2014.

Camille. S, « Étude des mécanismes de transfert de molécules organiques en osmose inverse », thèse doctorat, institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement Agro Paris Tech, 24 avril 2008).

Chatkaew Tansakul. "Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse." Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.

Dessalement de l'eau de mer en Méditerranée : évaluation et lignes directrices. No. 139 de la Série des rapports techniques du PAM PNUE/PAM Athènes, 2003.

Dunglas J. "Le dessalement de l'eau de mer : une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau." Groupe eau, Académie d'agriculture de France, 2014.

Elouahed Maissa. "Description du procédé de dessalement de la station de Fouka et suivi du contrôle de qualité." Mémoire de fin d'étude, Université de Bouira, 2020.

Ettoria. "Vieillesse chimique de membranes d'osmose inverse." Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011. 240p.

Finan, A et Kazimi, M. Avantages potentiels du développement de technologies de dessalement innovantes au Koweït . Centre koweïtien pour les ressources naturelles et l'environnement, Massachusetts Institute of Technology, 2013.

Gater Samia et Halouane Fatima. "Etude des performances du procédé de dessalement de l'eau de mer de la station de Tizirt." Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master en Chimie de l'Environnement, 2012.

Guimard Loura. "Étude du comportement et modélisation d'une installation de dessalement d'eau de mer par distillation soumise à des régimes transitoires." Mémoire de l'Université Claude Bernard Lyon 1, 2019.

Jean-Claude Bourbon. "Le Moyen-Orient fer de lance du dessalement de l'eau." Oman, 2018.

Maafa Aida. "Dessalement de l'eau de mer." Mémoire de Master, Université 08 Mai 1945 de Guelma, septembre 2020.

Marc-Antoine Eyl-Mazzega et Élise Cassagnol. "Géopolitique du dessalement d'eau de mer." Études de l'Ifri, Ifri, septembre 2022.

Maurel A. "Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce." 2ème Édition, Éditions TEC & DOC, Paris, France, 2006. 286p.

Meradji Hocine. "Caractéristique des eaux de mer et des eaux de rejets par l'ACP." Mémoire de Master, 2015.

Metaiche M. "Optimisation des systèmes de dessalement par osmose inverse : conception, paramètres de fonctionnement et simulation numérique." Alger, 2006. 229p.

Metaiche Mehdi. "Technologie membranaire." Université de Bouira, 2014.

Organisation des Nations Unies. "Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2024 : L'Eau pour la prospérité et la paix." UNESCO, Paris. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388949>

Rezim Fatiha et Tachetaoui Kheira. "Etude des performances de la station de dessalement d'eau de mer de Fouka Wilaya de Tipaza." Mémoire de Master, 2020.

Salomon J. "Le dessalement de l'eau de mer est-il une voie d'avenir." 2012. Pag 237 à 262.

Taibi Sarah. "Étude des performances de la station de dessalement des eaux de mer par osmose inverse de Fouka wilaya de Tipaza." 2015.

Tata-Ducru Farid. "Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes." Janvier 2009.

Wever Y. & Ayrat A. "Membranes : Principes techniques et applications." Edition Lavoisier, 2003.

Touidjeni Zinelaabidine et Benarab Abdelkrim. "Sécurité hydrique et sécurité alimentaire : la stratégie de l'Algérie, état des lieux.", 2014.

Webographie

APS.dz. (2024). <https://www.aps.dz/economie>

Diplomatie. (2024). <https://www.diplomatie.gouv.fr>

Encyclo-Ecolo. (2012). Le dessalement de l'eau de mer. <http://www.encyclo-ecolo.com>

Enseeiht. (2024). www.enseeiht.fr

Fanack. (2024). <https://water.fanack.com>

Lesechos. (2024). <https://www.lesechos.fr/>

La recherche. (2024). <http://www.larecherche.com>

Latribune. (2008). <https://www.latribune.fr>

Lzexport. (2003). <https://fr.lz-frp.com>

Maison-Facile. (2023). <http://www.maison-facile.com/boutique>

Portailgref. (2010). <http://aem.portailgref.org>

Rfi.fr. (2024). <https://www.rfi.fr/fr>

Rowater. (2022). <https://fr.rowater-ts.com>

Scribd. (2011). <https://fr.scribd.com>

Sia-Partners. (2024). <https://www.sia-partners.com>

Suezwaterhandbook. (2024). <https://www.suezwaterhandbook.fr>

Technology. (2017). <https://www.water-technology.net>

Tpe dessalement maroc. (1975). <https://tpedessalementmaroc.weebly.com>

Weebly. (2014). <https://dessalementmaroc.weebly.com>

Wordpress. (2008). <https://dessalement.wordpress.com>

Annexe 1 : Les normes d'eau potable de l'OMS et l'Algériennes. (Belhouari et Belhadji, 2021)

Paramètres organoleptiques			
Paramètres	Unité	NormeOMS2006	Normes Algériennes 2011
Turbidité	NTU	<5	5
Couleur	Mg/l platine	15	15
Odeur à 12°C	Taux dilution	4	4
Saveur à 25°C	Taux dilution	2	4
Paramètres physico-chimiques d'une eau potable			
Température	°C	≤25	25
pH	/	6,5à8,5	6,5à9
Conductivité	μS/cm	2800	2800
Résidus secs	mg/l	Max2000	1500
Alcalinité	F°	≥2,5	500
TAC	F°	/	/
Dureté totale	Mg/l	≤150	200
Calcium	mg/l	/	200
Magnésium	mg/l	/	150
Chlorure	mg/L	/	500
Sulfates	mg/l	200	400
Sodium	mg/l	200	200
Potassium	mg/l	20	12
Chlore	Mg/l	/	5

Annexe 2 : fiche technique de la membrane SW30HRLE-400

FilmTec™ SW30HRLE-400

Seawater High Permeate Quality Reverse Osmosis Membrane Element



Key Features

- Optimized combination of water production and permeate quality.
- Excellent durability resulting in stable, long-term performance.
- Longer storage time and warranty coverage with improved sustainability footprint versus our wet RO membrane elements.

Key Applications

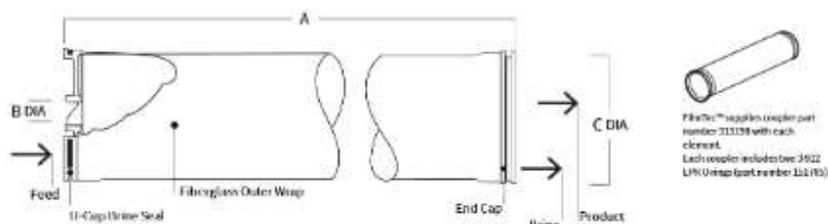
- Seawater desalination for municipal and industrial applications.
- Suitable for medium and high feed water salinity.
- Offers balance between permeate quality and energy consumption.
- Applicable for optimized Internally Staged Designs (ISD) in combination with other FilmTec™ seawater membranes.

Typical Properties

FilmTec™ Element	Active Area		Feed Spacer Thickness (mil)	Permeate Flowrate		Stabilized Boron Rejection (%)	Stabilized Salt Rejection (%)	Minimum Salt Rejection (%)
	(ft ²)	(m ²)		(gpd)	(m ³ /d)			
SW30HRLE-400	400	37	28	7,500	28	92	99.80	99.65

1. The above benchmark values are based on the following test conditions: 32,000 ppm NaCl, 5 ppm boron, 800 psi (5.5 MPa), 77°F (25°C), pH 8, 8% recovery.
2. Permeate flows for individual elements may vary ± 15%.
3. Sales specifications may vary as design revisions take place.

Element Dimensions



FilmTec™ SW30HRLE-400 Dimensions – inches (mm)	
A	40.0 (1,016)
B	1.125 ID (29 ID)
C	7.9 (201)

ID - Inner Diameter
DIA - Diameter

1. For element weight information, refer to [What is the weight of FilmTec™ elements as delivered?](#)
2. For element packing and shipping information, refer to [How are FilmTec™ elements packaged and shipped?](#)

Annexe 3 : fiche technique de la membrane SWC6-LD



SWC6-LD

Specified Performance*

Permeate Flow:	6,000 gpd (22.7 m ³ /d)
Salt Rejection:	99.6% (99.4% minimum)
Applied Pressure:	600 psi (4.1 MPa)
Test Conditions:	32000 ppm NaCl solution 600 psig (4.1 MPa) Applied Pressure 77 °F (25 °C) Operating Temperature 10% Permeate Recovery 6.5 - 7.0 pH Range

*The Specified Performance is based on data taken after a minimum of 10 minutes of operation. Actual testing of elements may be done at conditions which vary from these exact values; in which case, the performance is normalized back to these standard conditions. Permeate flow for individual elements may vary +25 / -20 percent from the value specified.

General Product Description**

Configuration:	Low Fouling Spiral Wound
Membrane Polymer:	Composite Polyamide
Membrane Active Area**:	400 ft ² (37.2 m ²)
Feed Spacer:	34 mil (0.86 mm)

Packaging: All membrane elements are supplied with a brine seal, interconnector, and O-rings. Elements are enclosed in a sealed polyethylene bag containing less than 1.0% sodium meta-bisulfite solution, and then packaged in a cardboard box.



Element Details**

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)

**Values listed are indicative, not specified. For more detailed specifications, see our Technical Service Bulletin documents or contact Hydranautics Technical Department

Product Use and Restrictions[^]

Maximum Applied Pressure:	1200 psig (8.27 MPa)
Maximum Chlorine Concentration:	< 0.1 ppm
Maximum Operating Temperature:	113 °F (45 °C)
pH Range, Continuous (Cleaning):	2-11 (1-13)
Maximum Feedwater Turbidity:	1.0 NTU
Maximum Feedwater SDI (15 mins):	5.0
Maximum Feed Flow:	85 gpm (19.3 m ³ /h)
Minimum Brine Flow:	12 gpm (2.7 m ³ /h)
Maximum Pressure Drop for Each Element:	15 psi (0.10 MPa)

[^] The limitations shown here are for general use. For specified projects, operation at more conservative values may ensure the best performance and longest life of the membrane. See Hydranautics Technical Bulletins for more details.

Disclaimer: The information and data are presented in good faith and in lieu of all warranties. All express or implied warranties, including the warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, are hereby disclaimed and excluded. Conditions and methods of use of our products are beyond our control. Hydranautics assumes no liability for results obtained or damages incurred through the application of the presented information and data. It is the user's responsibility to determine the appropriateness of Hydranautics' products for the user's specific end uses. 12/18/2009

Hydranautics Corporate office
401 Jones Road, Oceanside, CA 92058, USA Toll Free: +1-800-CPA-PURE Tel: +1-760-901-2500 Fax: +1-760-901-2578
Web: www.membranes.com Email: hy-info@nitro.com

