



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد بن باديس - مستغانم
Abdelhamid Ibn Badis University - Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم هندسة الطرائق
Process Engineering Department of



Department of Process Engineering

The Date

Ref :/U.M/F.S.T/2025

قسم هندسة الطرائق

التاريخ:

رقم : / ج.م.ك.ع.ت//2025

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie des procédés

Option : Génie chimique

Thème

**Etude de la performance de la station de
dessalement de l'eau de mer de Mostaganem**

Présenté par

1-MANSOURI hadjira

Soutenu le 24 / 09 /2025 devant le jury composé de :

Présidente : MOHAMED SEGHIR zahira MCB Université de Mostaganem

Examinatrice : KHELLADI Mallika MCA Université de Mostaganem

Rapporteur : MEZOUAGH Amina MCA Université de Mostaganem

Année Universitaire 2024/2025

Dédicace

Je dédie ce travail à toutes les personnes qui m'ont soutenue et qui ont cru en moi.

A mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible.

A mes sœurs et mon frère, pour leurs encouragements constants, leur présence et leur soutien.

A mes amies, qui m'ont accompagnée dans les moments de doute et de réussite.

A CHAHINEZ, mon amie précieuse pour son écoute, sa bienveillance. Son soutien a été une véritable force pour moi durant cette période.

Finalement ce mémoire est dédié à tous mes enseignants qui m'ont guidé tout au long de mes études, à tous ceux qui m'ont transmis leur savoir, aussi minime soit-il. Qu'Allah les récompense de la meilleure façon et les bénisse.

Hadjira...

Remerciement

*Je tiens avant tout à exprimer ma plus profonde gratitude à **Allah** le Tout-Puissant, source de toute bénédiction de m'avoir donné la force, la patience et le courage nécessaires pour mener à bien ce projet.*

Mes sincères remerciements s'adressent à mon encadrant universitaire

***Madame MEZOUAGH**, pour ses conseils avisés, sa disponibilité constante et son accompagnement précieux.*

*On exprime également nos remerciements à **Madame Mohamed Seghir Zahira** enseignante à l'université de Mostaganem, qui nous a fait l'honneur des'intéresser à notre travail et de présider le jury d'examen.*

*Que **Madame KHELLADI Mallika** enseignante à l'université de Mostaganem, trouve ici toute notre reconnaissance pour avoir accepté de porter un regard critique sur cet humble travail de recherche.*

*Je tiens à exprimer ma reconnaissance sincère à **Monsieur Goulmane Abd Razek**, directeur opérationnel de l'usine de dessalement, pour son aimable autorisation et la qualité de son accueil.*

Mes remerciements s'adressent également à l'ensemble du personnel, en particulier les techniciens pour leur disponibilité, leur patience et leur précieux partage d'expérience.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce mémoire.

Résumé :

Ce mémoire est consacré au dessalement de l'eau de mer par la méthode de l'osmose inverse. Cette technologie, devenue essentielle face au manque d'eau, permet de transformer l'eau de mer en eau potable grâce à un système de séparation membranaire. Notre travail a consisté à évaluer la performance de la station de dessalement de Mostaganem en basant sur ce système. Cette étude nous permet de mettre en pratique nos connaissances théoriques et de mieux comprendre le fonctionnement de ce processus à une échelle industrielle. Ce mémoire vise également à mettre en lumière le rôle crucial de cette station dans la sécurité hydrique de la région.

Mots clés : Dessalement, Eau de mer, osmose inverse, performance industrielle

ملخص:

تتناول هذه المذكرة موضوع تحلية مياه البحر بتقنية التناضح العكسي. لقد أصبحت هذه التقنية ضرورية في مواجهة نقص المياه، حيث تسمح بتحويل مياه البحر إلى مياه صالحة للشرب عن طريق نظام الفصل الغشائي. وقد تمثل عملنا في تقييم أداء محطة تحلية المياه في مستغانم بالاعتماد على هذا النظام. تسمح لنا هذه الدراسة بوضع معارفنا النظرية موضع التطبيق وفهم أفضل لسيرورة هذه العملية على نطاق صناعي. كما تهدف إلى تسليط الضوء على الدور الحيوي لهذه المحطة في الأمن المائي للمنطقة.

الكلمات المفتاحية: تحلية، مياه البحر، التناضح العكسي، الأداء الصناعي

Abstract:

This thesis focuses on seawater desalination using the reverse osmosis method. This technology has become essential in addressing water scarcity, as it allows for the conversion of seawater into drinking water through a membrane separation system. Our work consisted of evaluating the performance of the Mostaganem desalination plant based on this system. This study allows us to put our theoretical knowledge into practice and better understand the functioning of this process on an industrial scale. It also aims to highlight the crucial role of this plant in the region's water security.

Keywords: desalination, seawater, reverse osmosis, industrial performance

Liste des figures

Figure I-1: : Schéma général d'une installation de dessalement.	6
Figure I-2: Les différents procédés de dessalement.....	8
Figure I-3: Schéma de principe d'un système distillation à multiples effets (MED)	10
Figure I-4: principe de fonctionnement d'un système (MSF)	11
Figure I-5: Principe de distillation à compression de vapeur	12
Figure I-6: Fonctionnement de l'osmose inverse.....	13
Figure I-7: Principe de fonctionnement de l'électrodialyse.....	14
Figure I-8: la distillation solaire.....	16
Figure II-1: le principe d'osmose inverse.	26
Figure II-2: Schéma générale d'une installation d'osmose inverse.	27
Figure II-3: Modules spirales.....	30
Figure II-4: Modules tubulaires	31
Figure II-5: modules plans.....	31
Figure II-6: Modules en fibres.....	32
Figure II-7: Module en céramiques.	33
Figure III-1: Station de dessalement de l'eau de mer de Mostaganem	38
Figure III-2: Salle de captage.	39
Figure III-3: système de filtration.....	42
Figure III-4: Schéma représentant les trois étapes de filtration.....	44
Figure III-5: Schéma général d'une installation d'osmose inverse.	45
Figure III. 6: Schéma représentant le système de reminéralisation.....	47
Figure III-7: Schéma représentant le stockage et impulsion de l'eau produite.	48
Figure IV-1: Schéma d'osmose inverse sans récupération d'énergie.....	58
Figure IV-2: Schéma d'osmose inverse avec récupération d'énergie.	59

Liste des tableaux

Tableau I-1: avantages et inconvénients de l'OI et la distillation thermique.	17
Tableau I-2: comparaison entre l'OI, MSF, MED, MVC.	18
Tableau III-1: Les caractéristiques des couches de filtration (première étape).....	43
Tableau III-2: Les caractéristiques des couches de filtration (deuxième étape).	44
Tableau IV-1: Les caractéristiques de cite de référence.....	53
Tableau IV-2: Les résultats d'analyses de l'eau de mer.....	53
Tableau IV-3: Les résultats d'analyses de l'eau traitée.....	54
Tableau IV-4: les débits des quantités par heur.....	54
Tableau IV-5: Les débits des quantités journalières.....	55
Tableau IV-6: Les caractéristiques de la membrane.....	57

Liste des abréviations

- **OMS** : organisation mondiale de sante
- **MED** : multi-effect distillation
- **MSF** : multi-stage flash
- **MVC** : Mechanical vapor compression
- **PES** : poly éther sulfone
- **PVDF** : Poly vinylidène
- **OI** : osmose inverse
- **UTE** : Union temporaire des entreprises
- **O&M** : opération et maintenance
- **MIM** : Mostaganem
- **PEHP** : perforated header équipéed with distributors
- **ERI** : énergie recovry Inc
- **LSI** : Langelier saturation index
- **MTD** : Matières totales dissoutes
- **ADE** : Algérienne des eaux
- **CSR** : Conditions site de référence
- **NTU** : Néphélométrie turbidité unit
- **TAC** : Titre alcalimétrique complet
- **ppm** : parties par millions
- **cse** : capacité spécifique d'énergie
- **Pa** : Pascals
- **T** : Tours
- **K** : Kelvins
- **kWh** :kilo wattheur
- **Um** : micro mètre
- **°C** : degré Celsius
- **j** : jour
- **J** : Joule

Table des matières

<i>Dédicace</i>	i
<i>Remerciement</i>	ii
Résumé :	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
Liste des abréviations	vi
Introduction Générale	i
Chapitre I : Généralités sur le dessalement	3
I.1 Introduction :	4
I.2 Définition de dessalement de l'eau de mer	5
I.3 Les eaux de dessalement	5
I.3.1 Les eaux marines	5
I.3.2 Les eaux saumâtres	5
I.4 Schéma général d'une installation de dessalement	6
I.4.1 L'alimentation en eau de mer	6
I.4.2 Le prétraitement	6
I.4.2.1 Prétraitement physique	6
I.4.2.1.1 Le dégrillage	6
I.4.2.1.2 Dessablage	7
I.4.2.1.3 La filtration	7
I.4.2.1.4 La stabilisation	7
I.4.2.2 Prétraitement chimique	7
I.4.2.3 La chloration	7
I.4.3 Installation de dessalement	7
I.4.4 Le post- traitement	7
I.5 Les différents procédés de dessalement	8
I.5.1 Les procédés thermiques	8
I.5.1.1 La distillation	8
I.5.1.1.1 Principe :	9
I.5.1.2 Les types de la distillation :	9
I.5.1.2.1 Distillation a multiples effets (MED)	9
I.5.1.2.2 Distillation par multi stage flash (MSF)	10
I.5.1.2.3 Distillation par compression de vapeur	11

I.5.2 Les procédés membranaires	12
I.5.2.1 L'osmose Inverse	12
I.5.2.1.1 Membranes d'osmose inverse	12
I.5.2.1.2 Types de modules de membranes	12
I.5.2.1.2.1 Module tubulaire :	13
I.5.2.1.2.2 Module capillaire :	13
I.5.2.1.2.3 Module à fibres creuses :	13
I.5.2.1.2.4 Module spiralé :	13
I.5.2.1.3 Fonctionnement de l'osmose inverse	13
I.5.2.2 L'électrodialyse	14
I.5.3 Les procédés chimiques	14
I.5.3.1 Échange d'ions	14
I.5.3.2 Extraction par solvant	15
I.5.4.1 Distillation solaire	15
I.6.1 Les avantages et les inconvénients de deux procédés : O.I et la distillation thermique	16
I.6.2 Comparaison entre l'osmose inverse (OI) et les différents procédés de distillation :	17
I.7 Les ajouts chimiques dans une station de dessalement	18
I.7.1 Les coagulants	18
I.7.2 Les antitartre	19
I.7.3 Agents anti-mousses	19
I.8 L'impact de dessalement sur l'environnement :	19
I.8.1 Rejets atmosphériques	19
I.8.2 Rejets chimiques	20
I.8.2.1 Les produits issus de la corrosion :	21
I.8.2.2 Les agents antitartres :	21
I.8.3 Rejets de saumures	21
I.9 Les avantages et les inconvénients de dessalement	22
I.9.1 Les avantages	22
I.9.2 Les inconvénients	22
I.10 Conclusion	24
Chapitre II : Le Procédé utilisé par la station (osmose inverse)	25
II.1 Introduction :	25
II.2 Principe d'osmose :	26
II.4 Pression osmotique :	26

II.5 Schéma générale d'une installation d'osmose inverse	27
II.6 Caractéristique principale d'une unité d'osmose inverse :	27
II.6.1 Taux de conversion :	27
II.6.2 Sélectivité :	28
II.6.3 Débit Spécifique ou densité du flux volumique	28
II.6.4 Mécanismes de transfert :	29
II.7 Module d'osmose :	29
II.7.1 Modules spirale :	29
II.7.2 Modules tubulaire :	30
II.7.4 Modules en fibres :	32
II.7.5 Modules en céramiques	32
II.8 Durée de vie des membranes	33
II.9 Consommation d'énergie	33
II.10 Récupération d'énergie	33
II.11 Conclusion	35
Chapitre III : Description de la station de dessalement d'eau de mer de Mostaganem	36
III.1 Introduction	37
III.2 Présentation de station de dessalement de Mostaganem	38
III.3 Description et fonctionnement normal des installations du procédé	39
III.3.1 Captage et pompage de l'eau de mer	39
III.3.1.1 Tours de captage et tuyauterie de captage	39
III.3.1.2 Système anti-méduses	40
III.3.1.3 Système d'amorçage des pompes de l'eau de mer	40
III.3.1.4 Système de pompage de l'eau de mer	40
III.3.2 Système de prétraitement :	41
III.3.2.1 Prétraitement physique	41
III.3.2.2 Prétraitement chimique	41
III.3.2.1.1 Système de filtration	41
III.3.2.1.1.1 Filtration de première étape	42
III.3.2.1.1.2 Filtration de deuxième étape	43
III.3.2.1.1.3 Système de microfiltration	44
III.3.3 Système d'osmose inverse :	44
III.3.3.1 Système de pompage haute pression, pompe booster et récupération d'énergie	45
III.3.3.2 Châssis d'osmose inverse	46

III.3.3.3 Nettoyage chimique des membranes.....	46
III.3.4 Système de reminéralisation et de conditionnement de l'eau osmotique	46
III.3.5 Système de stockage et d'impulsion de l'eau produite	47
III.3.6 Système de vidange des saumures	48
III.4 Conclusion	49
Chapitre IV : Étude de Performance de la Station de Mostaganem.....	50
IV.1 Introduction	51
IV.2 Choix techniques, économiques, environnementaux	52
IV.3 Caractéristiques du Site de Référence.....	52
IV.4 Les analyses effectuées sur l'eau de mer et l'eau traitée	53
IV.4.1 Commentaire sur les chiffres d'eau traitée.....	54
IV.5 Quantité d'eau traitée par la station	54
IV.6 Captage d'eau de mer	55
IV.7 Pompage de l'eau de mer	55
IV.8 Filtration sur sable.....	55
IV.8 Microfiltration.....	55
IV.9 Pompage à haute pression	56
IV.10 Pompes Booster	56
IV.11 Reminéralisations.....	56
IV.12 Désinfection et stockage.....	56
IV.13 Le procédé d'osmose inverse dans la station de Mostaganem	56
IV.13.1 Châssis d'osmose inverse.....	56
IV.13.1.1L'efficacité de la membrane	57
IV.14 La consommation spécifique d'énergie.....	58
IV.14.1OI sans système de récupération d'énergie	58
IV.14.2OI avec système de récupération d'énergie	59
Conclusion générale	61

Introduction Générale

Introduction générale

Notre planète fait face à un problème d'eau. La population mondiale ne cesse de grandir, et avec elle, la demande en eau potable augmente. L'industrialisation et l'agriculture consomment de plus en plus d'eau, rendant nos ressources naturelles, comme les rivières et les lacs, de plus en plus rares. [1] On estime que d'ici à 2025, la demande mondiale en eau douce pourrait atteindre plus de 460 milliards de m³ par an. [2,3]

Cette situation alarmante oblige tous les pays du monde à chercher des sources d'eau fiables. C'est dans cette thématique que les stations de dessalement des eaux s'inscrivent puisqu'elles permettent de produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer ou d'eau saumâtre grâce à des procédés membranaires et de distillation. Le dessalement est en pleine expansion avec une progression d'environ 7 % par an. [4,5]

Le dessalement de l'eau de mer est un processus industriel qui doit être bien conçu et bien géré; sinon, il peut avoir des effets négatifs sur l'environnement dus entre autres à la modification de l'utilisation du sol de la zone côtière, aux nuisances créées par les travaux de construction et aux émissions causées dans l'air, le sol ou l'eau par le fonctionnement de l'usine, en particulier, les rejets de déchets dans le milieu marin pouvant altérer la qualité de l'eau et des sédiments. L'altération de la qualité de l'eau de mer et des sédiments peut, à son tour, nuire à la faune et à la flore marine et avoir un effet durable sur les écosystèmes côtiers. Il conviendrait donc que les effluents provenant du dessalement de l'eau de mer soient en conformité avec les politiques et les protocoles régionaux et nationaux concernant l'environnement. [3]

L'Algérie, pays semi-aride, est confrontée à un fort manque d'eau. Le climat sec, le relief du pays et une demande en eau qui ne cesse de croître expliquent cette situation. [6,7] Pour y remédier, l'Algérie a investi massivement dans des usines de dessalement.

Le présent travail est réalisé au niveau de la station de dessalement de Mostaganem « sonacter » assurant la production de l'eau potable pour la ville avec un débit de 200 000 m³/j. L'eau osmosée (le permeat) est reminéralisée par l'injection de la calcite (carbonate de calcium) dans l'eau conservée dans un réservoir de capacité 4000 m³ afin d'obtenir une eau équilibrée.

Ce mémoire est réparti comme suit :

- Une introduction au sujet de dessalement qui prend une grande ampleur au niveau de notre pays.

- Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les généralités du dessalement.
- Le deuxième chapitre détaille l'osmose inverse mise en œuvre par la station
- Le troisième chapitre est relatif à la description de la zone d'étude où j'ai effectué mon stage de fin de cursus.
- Le quatrième chapitre abordera la performance de la station de dessalement «Mostaganem».

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion comportant quelques recommandations que nous jugeons utiles pour l'avenir.

Chapitre I : Généralités sur le dessalement

I.1 Introduction :

Le dessalement de l'eau de mer est devenu une solution incontournable pour répondre aux besoins croissants en eau douce, notamment dans les régions arides ou confrontées à une pénurie hydrique.

Ce procédé, aussi appelé dessalage ou désalinisation, consiste à séparer l'eau des sels dissous présents dans l'eau brute, qu'elle soit marine ou saumâtre.

La diversité des techniques utilisées, allant des procédés thermiques anciens à des méthodes membranaires modernes, illustre l'évolution technologique et l'adaptation aux contraintes économiques et environnementales actuelles.

Ce chapitre présente les caractéristiques des eaux dessalées, le fonctionnement général des installations, ainsi que les différents procédés de dessalement, afin d'en comprendre les principes, avantages et limites.

I.2 Définition de dessalement de l'eau de mer

Le dessalement s'appelle dessalage ou désalinisation. Il 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. [8]

I.3 Les eaux de dessalement

I.3.1 Les eaux marines

La salinité, définie comme la concentration totale en sels dissous (notamment les chlorures de sodium et de magnésium, les sulfates et les carbonates), constitue la principale caractéristique des eaux marines

En moyenne, les mers et océans présentent une salinité de 35 g/L, dont les principaux composants sont : 27,2 g/L de chlorure de sodium (NaCl), 3,8 g/L de chlorure de magnésium (MgCl₂), 1,7 g/L de sulfate de magnésium (MgSO₄), 1,26 g/L de sulfate de calcium (CaSO₄) et 0,86 g/L de sulfate de potassium (K₂SO₄).

Cependant, cette salinité peut varier selon les mers fermées. Par exemple :

La mer Méditerranée et le golfe Arabo-persique affichent une salinité comprise entre 36 et 39 g/L, la mer Rouge atteint environ 40 g/L, la mer Caspienne se limite à 13 g/L, tandis que la mer Morte présente une concentration exceptionnellement élevée, avoisinant les 270 g/L. Par ailleurs, le pH de l'eau de mer oscille entre 7,5 et 8,4, ce qui en fait un environnement légèrement basique.

I.3.2 Les eaux saumâtres

L'eau saumâtre désigne une eau salée impropre à la consommation, dont la salinité est inférieure à celle de l'eau de mer.

Elle contient généralement entre 2 et 20 grammes de sels dissous par litre. Bien qu'elle puisse parfois provenir de sources de surface, elle est le plus souvent issue de nappes souterraines.

En traversant différents types de sols, ces eaux dissolvent les sels qu'ils renferment, ce qui enrichit leur composition minérale.

Celle-ci varie en fonction de la nature des terrains traversés et de la vitesse de circulation de l'eau.

Les principaux sels présents dans l'eau saumâtre sont le carbonate de calcium (CaCO₃), le sulfate de calcium (CaSO₄), le carbonate de magnésium (MgCO₃) et le chlorure de sodium (NaCl).[9]

I.4 Schéma général d'une installation de dessalement

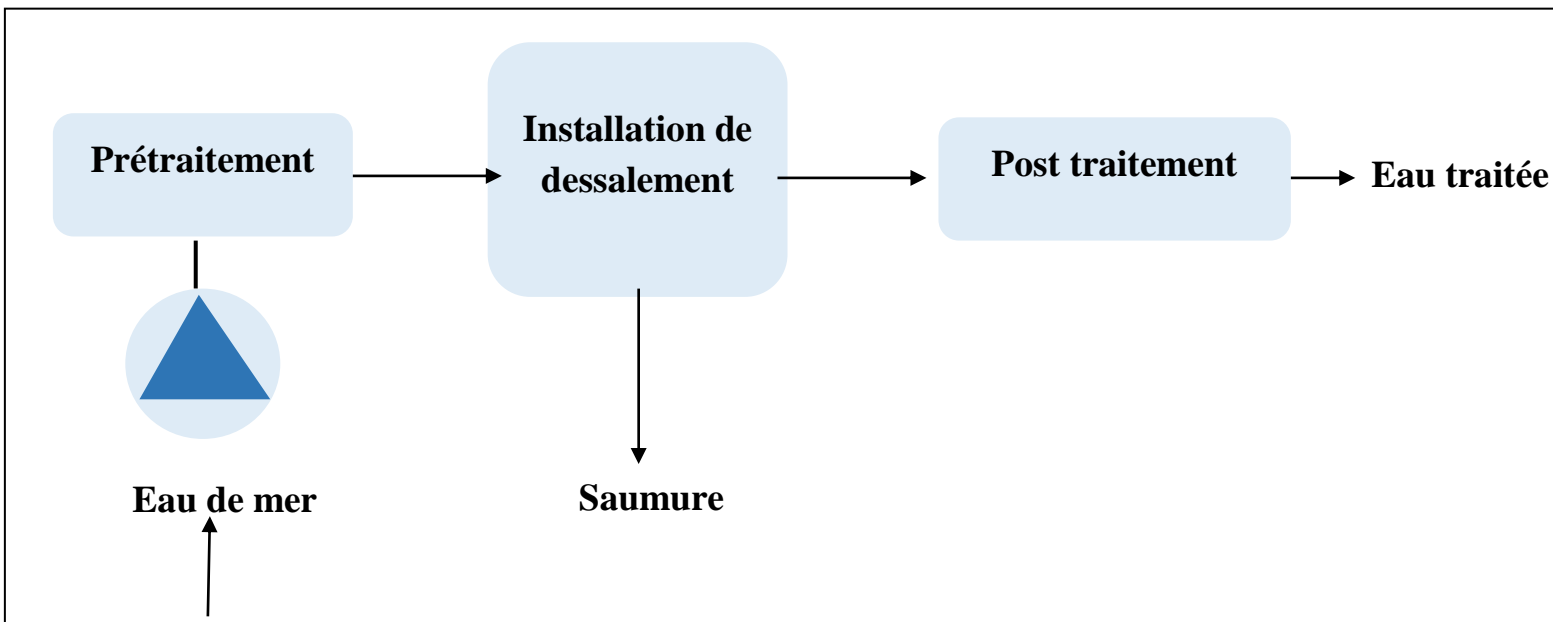


Figure I-1 : Schéma général d'une installation de dessalement.

I.4.1 L'alimentation en eau de mer

Le captage de l'eau de mer constitue la première étape du processus de dessalement.

Il s'agit de pomper l'eau vers la station de traitement, en veillant à ce qu'elle soit de bonne qualité, notamment en ce qui concerne la faible teneur en matières en suspension.

Deux principales technologies sont utilisées pour cette opération :

I.4.1.1 Les forages côtiers : réalisés soit à la verticale, soit sous forme de galeries horizontales, ils permettent de capter une eau naturellement filtrée, de qualité élevée et relativement stable.

I.4.1.2 La prise d'eau en surface : généralement effectuée en pleine mer. Idéalement, ce captage se fait en zone profonde, éloignée de la côte, afin de minimiser les risques de pollution et d'éventuelles perturbations dues aux courants marins. [10]

I.4.2 Le prétraitement

Cette étape vise principalement à éliminer les solides en suspension, les matières organiques ainsi que les micro-organismes présents dans l'eau de mer.

Elle comprend deux types de prétraitements complémentaires : physique et chimique.

I.4.2.1 Prétraitement physique

Le prétraitement physique a pour objectif d'éliminer essentiellement les éléments solides, les algues et les matières organiques susceptibles d'endommager ou d'encrasser les équipements.

I.4.2.1.1 Le dégrillage

Cette opération permet de retenir les déchets et objets de grande taille afin de protéger les installations en amont, notamment contre les risques de blocage ou de détérioration des équipements.

I.4.2.1.2 Dessablage

Il consiste à extraire le sable, les graviers et autres particules minérales lourdes afin d'éviter l'abrasion des pompes et l'encrassement des canalisations ou des canaux.

I.4.2.1.3 La filtration

Ce processus permet d'éliminer les matières en suspension, qu'elles soient organiques ou minérales, à l'aide de filtres rotatifs, assurant ainsi une purification plus fine de l'eau.

I.4.2.1.4 La stabilisation

Réalisée grâce à quatre pompes centrifuges d'un débit unitaire de 15 000 m³/h, cette étape envoie l'eau de mer vers une cheminée d'équilibre compartimentée.

Ces compartiments assurent une distribution contrôlée de l'eau vers les différentes unités en fonction des besoins.

I.4.2.2 Prétraitement chimique

Le prétraitement chimique comprend plusieurs étapes destinées à améliorer la qualité de l'eau en ciblant les micro-organismes et les éléments indésirables dissous.

I.4.2.3 La chloration

Elle consiste à désinfecter l'eau en éliminant les micro-organismes (bactéries, virus, algues, etc.), afin de prévenir leur développement dans les étapes ultérieures du traitement. [9]

I.4.3 Installation de dessalement

L'installation de dessalement comprend plusieurs étapes essentielles permettant de transformer l'eau de mer en eau douce utilisable.

Elle commence par la captation de l'eau et se poursuit par des traitements physiques, chimiques et des procédés de séparation. [2]

I.4.4 Le post- traitement

Le post-traitement représente l'étape finale du processus de dessalement, visant à adapter l'eau produite aux exigences de son utilisation finale.

Cette phase est indispensable, notamment pour corriger certains déséquilibres chimiques engendrés lors des étapes précédentes, comme l'acidification en prétraitement. Elle permet entre autres de retirer les gaz dissous tels que l'acide carbonique (CO₂) et le sulfure d'hydrogène (H₂S), ce dernier étant fréquemment présent dans les eaux souterraines et susceptibles de traverser les membranes d'osmose inverse.

Le recours au post-traitement est systématique, quelle que soit la configuration de l'installation, la nature des membranes ou la technologie de dessalement employée. Son importance et ses modalités varient principalement en fonction de l'usage prévu de l'eau dessalée.

Pour une eau destinée à la consommation humaine, des étapes de désinfection, de stabilisation du pH et de traitement anticorrosion des réseaux de distribution sont nécessaires.

Pour une eau destinée à alimenter des chaudières à haute pression, une déminéralisation complémentaire ainsi qu'un traitement de désoxygénation sont requis afin d'éviter les dépôts de tartre et la corrosion.

Dans le cas de la production d'eau ultra pure pour l'industrie technologique, un traitement approfondi est nécessaire, incluant une déminéralisation totale, une stérilisation, et une élimination complète des particules en suspension.

De manière générale, les opérations de post-traitement comprennent l'ajustement du pH, la déminéralisation complémentaire, la désinfection, la réduction de la corrosivité, ainsi que le dégazage, afin d'assurer une eau stable, propre et conforme à son usage final. [9]

I.5 Les différents procédés de dessalement

Le dessalement est un ensemble de techniques permettant d'extraire les sels dissous de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre afin de la rendre potable ou utilisable à des fins industrielles.

Ces procédés se divisent principalement en méthodes thermiques, membranaires, chimiques et autres techniques émergentes, chacune adaptée à des besoins spécifiques et à des contraintes énergétiques et économiques particulières.

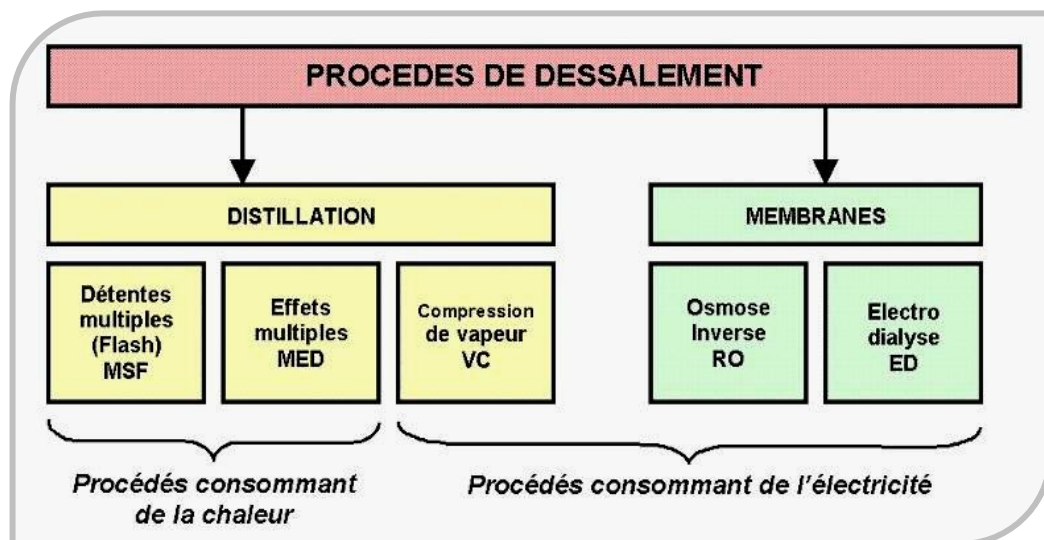


Figure I-2: Les différents procédés de dessalement

I.5.1 Les procédés thermiques

I.5.1.1 La distillation

I.5.1.1.1 Principe :

La distillation est une méthode de séparation et de purification des liquides, fondée sur le principe du changement d'état, en particulier le passage de l'eau de l'état liquide à l'état vapeur.

Lorsqu'elle est appliquée à l'eau de mer, elle permet de séparer le sel et les autres impuretés de l'eau grâce à un processus de chauffage, suivi d'une condensation.

Cette technique est ancienne : dès le IV^e siècle avant J.-C., les Grecs, sous l'impulsion d'Aristote, expérimentaient déjà le dessalement de l'eau de mer.

Toutefois, ce n'est qu'au XIX^e siècle que le premier procédé industriel de distillation de l'eau de mer a vu le jour.

L'Espagne, quant à elle, a construit sa première usine de dessalement par distillation en 1964 aux îles Canaries.

Le principe repose sur le chauffage de l'eau salée jusqu'à ce qu'elle atteigne sa température d'ébullition.

L'eau se transforme alors en vapeur, laissant les sels et impuretés derrière elle. Cette vapeur est ensuite refroidie dans un condenseur pour redevenir liquide.

Le liquide obtenu, appelé distillat, contient essentiellement de l'eau douce. Cependant, il peut encore renfermer des traces d'autres substances volatiles.

Pour obtenir une eau plus pure, on peut répéter le processus ou utiliser une colonne de distillation. Cette dernière permet une séparation plus efficace en une seule étape, appelée distillation fractionnée ou rectification.

L'un des avantages majeurs de la distillation est sa capacité à éliminer la quasi-totalité des impuretés et des micro-organismes.

Toutefois, cette technique est énergivore et nécessite des sources de chaleur importantes, souvent fournies par le gaz ou le pétrole. Cela engendre un coût de production élevé, ce qui se répercute sur le prix de l'eau.

En outre, la distillation a un impact environnemental non négligeable, en raison des importantes émissions de dioxyde de carbone générées par les centrales thermiques utilisant des énergies fossiles. [11]

I.5.1.2 Les types de la distillation :

I. 5.1.2.1 Distillation à multiples effets (MED)

La distillation à effets multiples est moins courante car elle ne permet pas de produire de grandes quantités d'eau douce et son installation est délicate et coûteuse.

Mais cette technique permet des économies de l'ordre de 15% à 20% par rapport au multi-flash.

Le principe simple consiste en une association en série de modules évaporateur/condensateur dont la disposition permet délimiter les pertes thermiques et assurer une grande faisabilité technique. De plus, ce procédé permet d'optimiser la récupération de la chaleur latente de condensation de l'eau. [12]

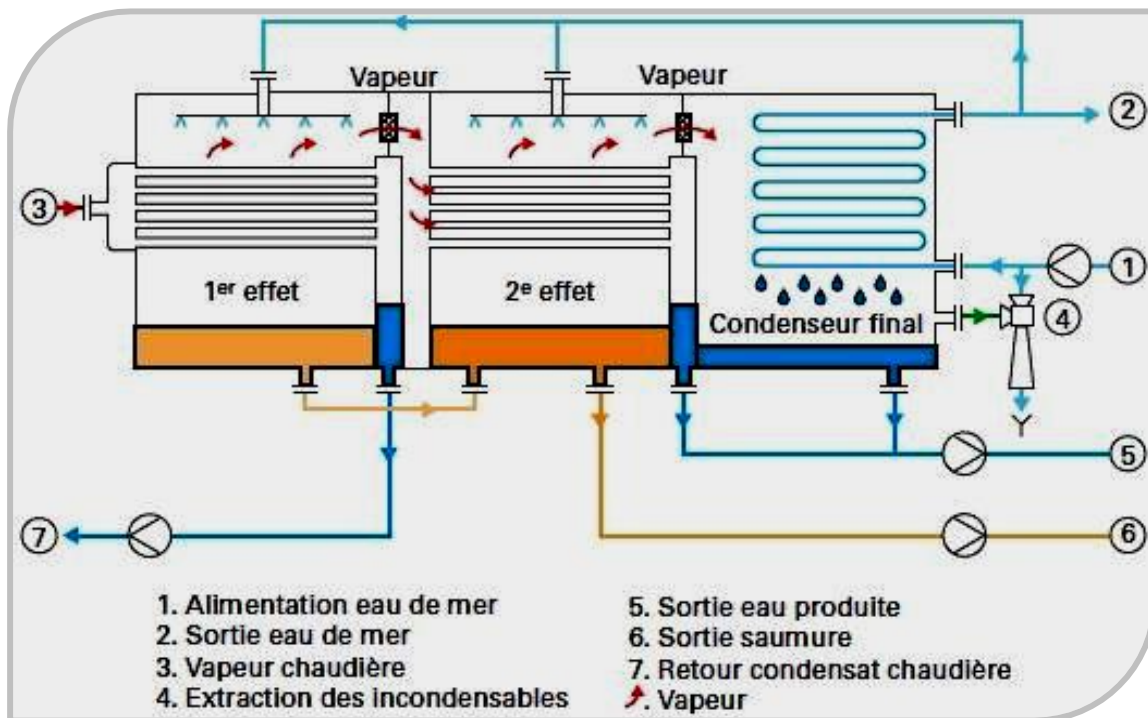


Figure I-3: Schéma de principe d'un système distillation à multiples effets (MED)

I.5.1.2.2 Distillation par multi stage flash (MSF)

L'intérêt du multi-flash réside dans son faible coût énergétique. En effet, plus la pression est basse, plus la température à laquelle l'eau passe à l'état gazeux est faible. Pour ce procédé, l'eau de mer est envoyée dans des conduits au bout desquels elle est chauffée à 120 °C, puis elle est ensuite introduite dans un compartiment où règne une pression réduite (sa température d'ébullition est donc plus basse). [12]

L'eau est alors instantanément transformée en vapeur par détente appelée Flash. La vapeur ainsi créée va monter au contact des premiers conduits dans lesquels passent l'eau de mer.

Les conduits sont assez froids ce qui provoque la condensation de cette vapeur qui est alors récupérée à l'état liquide.

Pour l'eau qui ne s'est pas évaporée dans ce compartiment, elle est récupérée puis transférée dans un deuxième compartiment du même type mais avec une pression atmosphérique encore plus basse. Et ainsi l'opération est répétée plusieurs fois à la suite (d'où le nom de multi-flash). Il existe des usines de dessalement dans lesquels l'opération se répète dans 40 compartiments. [12]

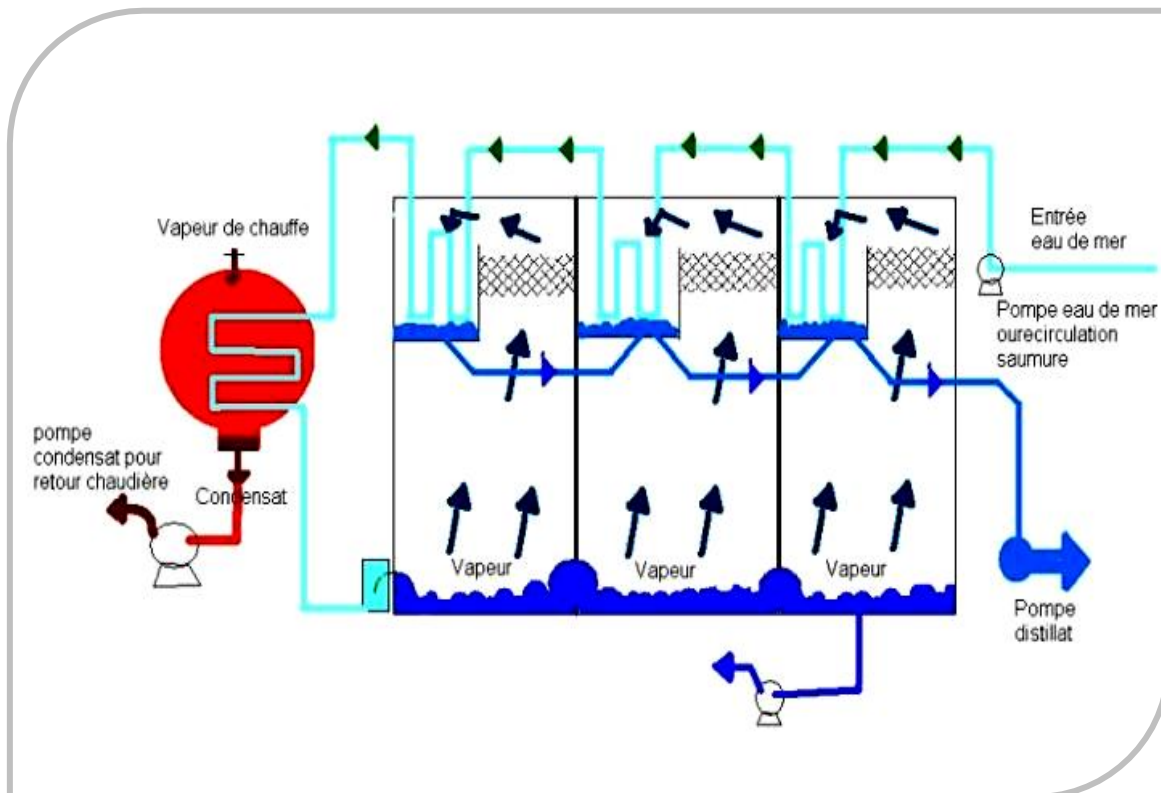


Figure I-4: principe de fonctionnement d'un système (MSF)

I.5.1.2.3 Distillation par compression de vapeur

L'eau de mer destinée au dessalement est chauffée jusqu'à ébullition dans une enceinte thermique isolée.

La vapeur générée est ensuite aspirée par un compresseur, qui en augmente la température de saturation.

Cette vapeur surchauffée circule à travers un faisceau de tubes situé à la base de l'enceinte, où elle se condense, libérant ainsi de la chaleur qui provoque l'ébullition de l'eau salée restante. [13]

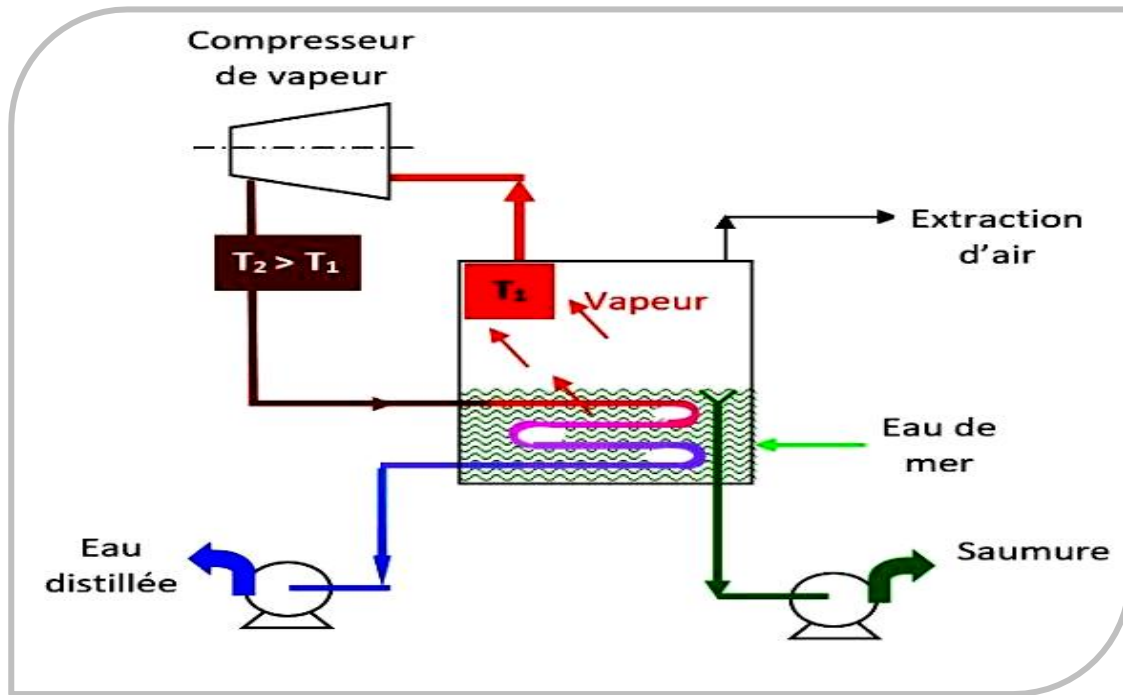


Figure I-5: Principe de distillation à compression de vapeur

I.5.2 Les procédés membranaires

Plutôt que de recourir à l'évaporation pour séparer l'eau douce de l'eau de mer, il est possible d'utiliser des membranes sélectives permettant de dissocier l'eau des sels dissous.

Deux procédés basés sur cette technologie sont aujourd'hui largement utilisés dans l'industrie : l'électrodialyse et l'osmose inverse. [14]

I.5.2.1 L'osmose Inverse

L'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous à l'aide de membranes semi-perméables, sous l'effet d'une pression élevée (entre 54 et 80 bar pour l'eau de mer).

Contrairement à la distillation, ce procédé s'effectue à température ambiante et sans changement de phase.

Les membranes polymères utilisées laissent passer uniquement les molécules d'eau tout en retenant les sels dissous, les particules et les substances organiques de taille inférieure à $0,1 \mu\text{m}$. [15]

I.5.2.1.1 Membranes d'osmose inverse

Les membranes utilisées sont artificielles et poreuses, composées de matériaux organiques (comme les acétates de cellulose ou les polyamides) ou minéraux. Leur partie active, appelée "peau", mesure entre $0,1$ et $1,5 \mu\text{m}$ d'épaisseur et contient les micropores responsables de la séparation.

Cette couche est soutenue par d'autres couches plus épaisses, offrant robustesse et perméabilité.

Ces membranes sont sensibles aux conditions d'utilisation (pH entre 2 et 11, température maximale de $50 \text{ }^\circ\text{C}$) et sont assemblées sous forme de modules.

I.5.2.1.2 Types de modules de membranes

I.5.2.1.2.1 Module tubulaire :

- Membranes insérées dans des tubes de 5 à 15 mm de diamètre.
- Faible risque d'obstruction.
- Utilisation sur des eaux chargées en solides.

I.5.2.1.2.2 Module capillaire :

- Membranes de 0,5 à 5 mm de diamètre.
- Plus sensibles à l'encrassement mais offrent une densité de conditionnement plus élevée.

I.5.2.1.2.3 Module à fibres creuses :

- Diamètre inférieur à 0,1 mm.
- Très haute densité de conditionnement.
- Utilisées pour des eaux très peu chargées (ex : osmose inverse, nano filtration).

I.5.2.1.2.4 Module spiralé :

- Deux membranes enroulées autour d'un tube collecteur de perméat.
- Très répandues en osmose inverse et nano filtration pour leur efficacité et leur compacité.

I.5.2.1.3 Fonctionnement de l'osmose inverse

L'osmose naturelle est un phénomène par lequel l'eau migre d'une zone moins concentrée vers une zone plus concentrée en sels, à travers une membrane semi-perméable, pour équilibrer les concentrations.

L'osmose inverse ce processus en appliquant une pression supérieure à la pression osmotique, forçant ainsi l'eau à traverser la membrane en retenant les sels du côté concentré. [15]

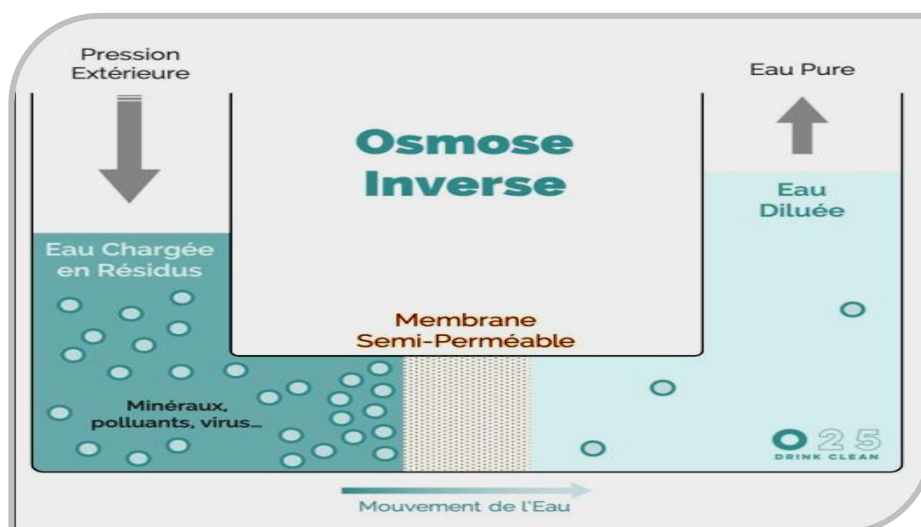


Figure I-6: Fonctionnement de l'osmose inverse.

I.5.2.2 L'électrodialyse

Le principe de l'électrodialyse repose sur la migration des ions dissous dans l'eau sous l'effet d'un champ électrique généré par deux électrodes immergées.

Ainsi, les cations tels que le sodium (Na^+) se dirigent vers la cathode, tandis que les anions comme le chlorure (Cl^-) se déplacent vers l'anode.

Dans ce procédé, on insère en alternance des membranes sélectives : certaines sont perméables uniquement aux cations, d'autres uniquement aux anions.

Cela permet de créer une succession de compartiments, certains s'enrichissant en sels (haute concentration), tandis que d'autres en sont appauvris (basse concentration).

L'électrodialyse est particulièrement efficace pour le traitement des eaux saumâtres, dont la salinité est inférieure à celle de l'eau de mer.

Les membranes utilisées dans ce procédé laissent passer les ions, tout en retenant l'eau, ce qui contraste avec l'osmose inverse, où les membranes retiennent les sels dissous et laissent passer

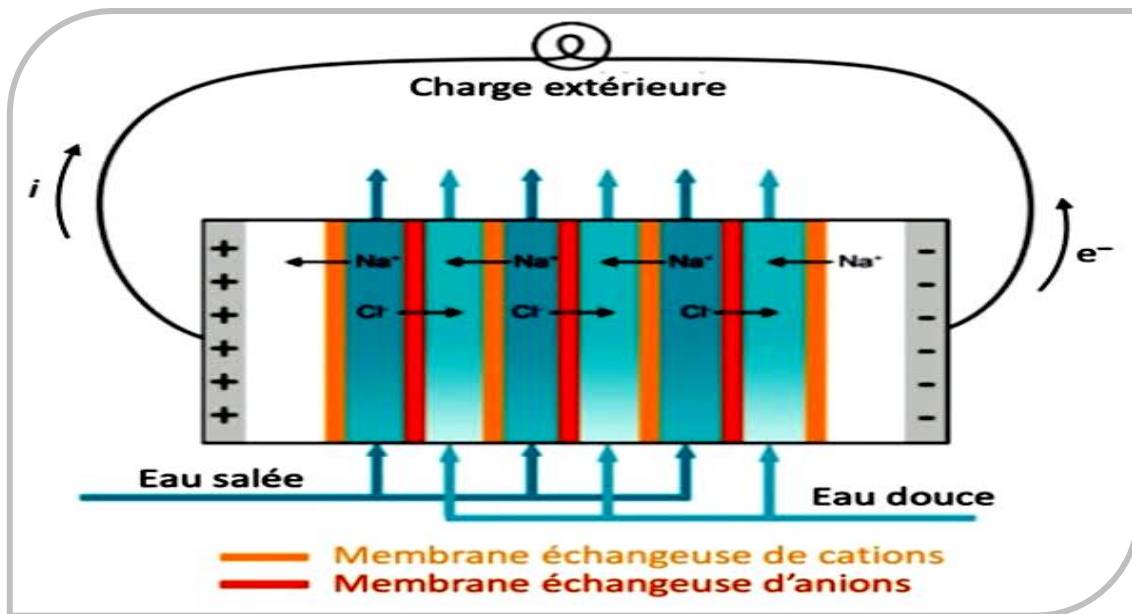


Figure I-7: Principe de fonctionnement de l'électrodialyse

I.5.3 Les procédés chimiques

Les procédés chimiques sont employés dans le traitement de l'eau pour éliminer certaines substances dissoutes qui ne peuvent être extraites par des méthodes physiques ou mécaniques.

Ces techniques incluent notamment l'échange d'ions et l'extraction par solvant. Leur efficacité dépend des caractéristiques physico-chimiques de l'eau à traiter, ainsi que de la nature des ions ou composés à éliminer.

I.5.3.1 Échange d'ions

L'échange d'ions est un procédé chimique dans lequel les ions présents dans une solution aqueuse sont échangés contre d'autres ions fixés sur un matériau solide appelé résine échangeuse d'ions.

Cette méthode est largement utilisée pour la déminéralisation ou la désalinisation partielle de l'eau. Elle repose sur l'attraction électrostatique entre les charges opposées des ions dissous et celles fixées sur la résine.

Il existe deux types principaux de résines : les cationiques (échangeant les cations comme Ca^{2+} , Mg^{2+}) et les anioniques (échangeant les anions comme Cl^- , SO_4^{2-}).

Cette technique est particulièrement utile pour la production d'eau ultra pure dans les industries pharmaceutiques, électroniques et de production d'énergie. [16]

I.5.3.2 Extraction par solvant

L'extraction par solvant consiste à transférer sélectivement une ou plusieurs substances dissoutes dans l'eau vers une phase organique non miscible.

Le choix du solvant dépend de la nature des substances à extraire et des conditions opératoires (pH, température, etc.).

Ce procédé est couramment utilisé pour éliminer certains métaux lourds, substances organiques spécifiques ou pour la concentration de composés précieux présents en faible quantité.

Il s'agit d'un procédé relativement complexe qui nécessite un contrôle précis des conditions physico-chimiques. Toutefois, il permet de cibler efficacement des polluants spécifiques que d'autres procédés ne peuvent retirer. [16]

I.5.4 Autres procédés de dessalement

D'autres procédés ont également été utilisés pour le dessalement des eaux saumâtres ou marines. Bien qu'ils n'atteignent pas les niveaux de rendement offerts par la distillation ou l'osmose inverse, certains se sont révélés efficaces dans des contextes spécifiques, tandis que d'autres nécessitent encore des améliorations pour optimiser leurs performances.

I.5.4.1 Distillation solaire

La distillation solaire est une technique de dessalement utilisant l'énergie du soleil pour évaporer l'eau salée, puis condenser la vapeur afin d'obtenir de l'eau douce. Ce procédé est particulièrement adapté aux petites installations dans des zones isolées, notamment dans les régions méditerranéennes comme l'Égypte, l'Algérie, la Tunisie ou l'Espagne.

Bien que les unités solaires soient souvent de faible capacité (0,5 à 200 m³/j) et encore au stade expérimental ou de démonstration, elles ont prouvé leur efficacité lorsqu'elles sont bien conçues et

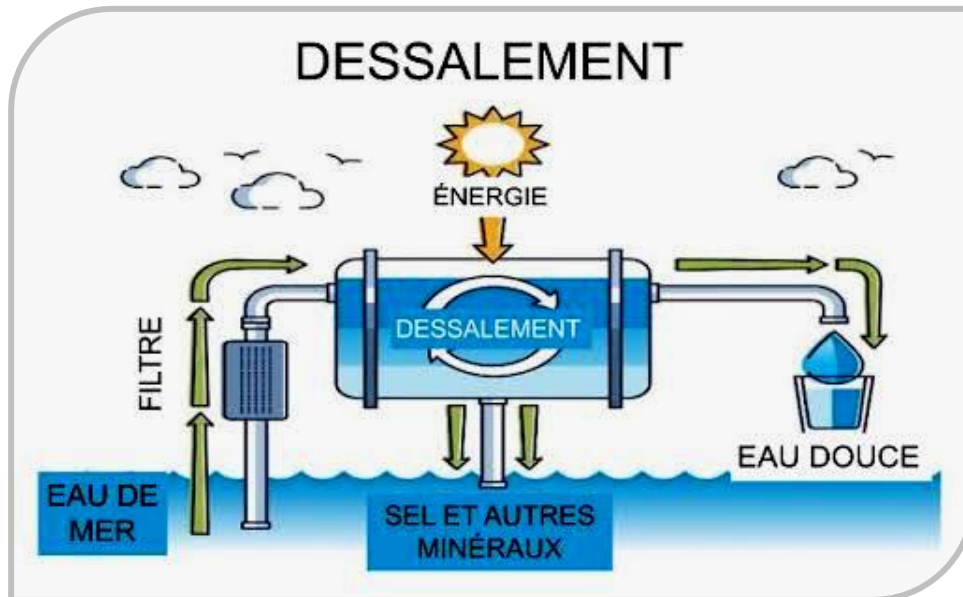


Figure I-8: la distillation solaire

correctement exploitées. Pour garantir leur performance et leur durabilité, ces installations doivent rester simples, fiables et bénéficier d'une maintenance adaptée, malgré les défis liés au stockage de l'énergie et au manque de compétences locales. [16]

I.6 Comparaison entre les procédés de dessalement

Le choix d'un procédé de dessalement repose essentiellement sur la nature de la ressource hydrique disponible, notamment son niveau de salinité, ainsi que sur les ressources énergétiques accessibles dans le pays [10].

I.6.1 Les avantages et les inconvénients de deux procédés : O.I et la distillation thermique

Le tableau ci-après présente une synthèse comparative des avantages et des limites des deux procédés de dessalement les plus couramment utilisés, à savoir l'osmose inverse et la distillation thermique. [17]

Tableau I-1: avantages et inconvénients de l’OI et la distillation thermique. [17]

Procédé	Avantages	Inconvénients
Osmose inverse	<ul style="list-style-type: none"> - Faible consommation énergétique comparée aux procédés de distillation ; depuis les années 1970, cette consommation a été divisée par quatre. - Réduction significative du coût de production grâce aux avancées technologiques récentes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Durée de vie limitée des membranes, sujettes à la fragilité et à la perte de résistance mécanique. - Risque de colmatage des membranes dû à l'accumulation de dépôts, entraînant une diminution du débit et une altération de la performance.
Distillation thermique	<ul style="list-style-type: none"> - Procédé rentable lorsqu’il est mis en œuvre à proximité d’une source d’énergie à faible coût. 	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation énergétique importante. - Nécessité de traiter les gaz incondensables (tels que H₂S ou CO₂) avant le processus, ce qui implique des traitements préalables (chloration, antitartre).

I.6.2 Comparaison entre l’osmose inverse (OI) et les différents procédés de distillation :

Le tableau suivant présente une comparaison détaillée entre les principaux procédés de dessalement de l’eau de mer, à savoir : l’osmose inverse (OI), la distillation flash à détentes successives (MSF), la distillation à effets multiples (MED) et la distillation à simple effet par compression de vapeur (MVC).

Ces technologies se distinguent par leurs paramètres de fonctionnement, leurs consommations énergétiques, ainsi que par leurs avantages et inconvénients respectifs.

Tableau I-2: comparaison entre l'OI, MSF, MED, MVC. [17]

Procédé	MSF	MED	MVC	OI
Température de fonctionnement (°C)	< 120	< 70	< 70	< 45
Source principale d'énergie	Thermique et électrique	Thermique et électrique	Mécanique (via électricité)	Mécanique (via électricité)
Consommation thermique (kWh/m³)	12	6	Non applicable	Non applicable
Consommation électrique (kWh/m³)	3,5	1,5	8 à 14	4 à 7
Salinité de l'eau brute (g/l)	30 à 100	30 à 100	30 à 50	1 à 45
Salinité de l'eau traitée (mg/l)	< 10	< 10	< 10	< 500
Avantages	Technologie éprouvée	Coût inférieur de 20 % par rapport au MSF	Simplicité de fonctionnement	Modularité
Inconvénients	Investissement élevé, forte consommation énergétique	Capacité inférieure au MSF	Capacité limitée	Sensibilité et fragilité du système

Chaque technologie présente des caractéristiques techniques spécifiques qui déterminent son champ d'application optimal.

Les procédés thermiques (MSF, MED, MVC) sont généralement plus adaptés aux eaux très salées et aux environnements à température élevée.

À l'inverse, les techniques membranaires telles que l'osmose inverse (OI) se révèlent plus efficaces et fiables dans les contextes de salinité modérée, avec des températures avoisinant les 25°C.

Le choix du procédé dépend donc étroitement des conditions locales ainsi que des contraintes économiques et techniques du projet de dessalement.

I.7 Les ajouts chimiques dans une station de dessalement

I.7.1 Les coagulants

Les usines utilisant le procédé d'osmose inverse (OI) ont généralement recours à des agents coagulants tels que le chlorure ferrique ou le chlorure d'aluminium afin d'optimiser l'élimination des matières en suspension contenues dans l'eau d'alimentation.

Ce traitement peut être renforcé par l'ajout de coagulants organiques, comme le poly-arylamine, ainsi que par une régulation du pH à l'aide d'acide sulfurique, permettant ainsi d'améliorer l'efficacité globale du processus de prétraitement. [18]

I.7.2 Les antitartre

Les dépôts de tartre se forment fréquemment sur les parois des équipements de dessalement, ce qui engendre inévitablement des problèmes d'exploitation et une diminution des performances du système.

Pour prévenir ces désagréments, les additifs antitartres les plus couramment employés sont des polymères dérivés de l'acide maléique.

Ces composés agissent en inhibant la précipitation des substances dissoutes, empêchant ainsi leur sédimentation et la formation de croûtes sur les surfaces internes des installations. [18]

I.7.3 Agents anti-mousses

La formation de mousse dans les étages du procédé de distillation multi-flash (MSF) est un phénomène imprévisible, mais elle devient particulièrement problématique lorsque les séparateurs sont placés à proximité de la surface du courant de saumure.

Cette configuration limite l'efficacité de la séparation entre la phase liquide et la phase vapeur. Pour y remédier, on utilise généralement des agents anti mousse tels que les alkyl-poly glycols, les acides gras et leurs esters.

Ces composés tensioactifs agissent à l'interface eau-vapeur en inhibant la formation de mousse. Ce phénomène est principalement lié à la présence de substances organiques dans l'eau de mer, issues des sécrétions et de la décomposition des algues planctoniques. [18]

I.8 L'impact de dessalement sur l'environnement :

I.8.1 Rejets atmosphériques

La contribution énergétique des usines de dessalement et leur impact sur l'environnement

L'alimentation énergétique des usines de dessalement représente un facteur essentiel tant sur le plan opérationnel qu'environnemental.

En général, les émissions atmosphériques issues de ces installations se composent principalement d'azote et d'oxygène, générés par les procédés de désaération utilisés dans les usines de distillation afin de limiter la corrosion, ainsi que par les rejets des éjecteurs (dans les installations MSF) ou des dégazeurs (dans les unités d'osmose inverse).

Cependant, la production d'énergie nécessaire au fonctionnement de ces usines contribue également à l'augmentation des émissions atmosphériques.

Cette situation s'aggrave davantage lorsqu'une centrale thermique ou une unité de cogénération est intégrée à un projet de dessalement, entraînant ainsi des rejets polluants plus importants dans l'atmosphère.

L'analyse comparative des besoins énergétiques des différentes technologies de dessalement révèle que l'osmose inverse (OI) est nettement moins énergivore que le procédé de distillation à étages multiples (MSF).

Étant donné que les émissions atmosphériques sont directement corrélées à la consommation énergétique, il en découle logiquement que les procédés à membrane comme l'osmose inverse génèrent moins d'émissions que les procédés thermiques tels que la distillation MSF.

Aujourd'hui, les usines de dessalement fonctionnent en grande majorité grâce à des sources d'énergie fossile. Or, le recours à ces combustibles engendre l'émission de polluants atmosphériques tels que le dioxyde de carbone (CO₂), les oxydes de soufre et d'azote, ainsi que des particules fines. Si les émissions de gaz autres que le CO₂ dépendent fortement du type de centrale électrique utilisée ce qui rend leur quantification globale complexe, celles liées au CO₂ peuvent être estimées avec davantage de précision, car elles dépendent directement de la teneur en carbone du combustible utilisé.

À titre illustratif, la production d'un mètre cube d'eau dessalée pourrait générer environ 680 grammes de CO₂. Ainsi, une installation ayant une capacité de production de 2,7 millions de mètres cubes par jour entraînerait une émission quotidienne de 5476 tonnes de CO₂, ce qui représenterait une augmentation d'environ 0,6 % des émissions globales de ce gaz.

Cette contribution à l'effet de serre est loin d'être négligeable, en particulier dans le contexte actuel de lutte contre le changement climatique et de transition énergétique mondiale. [19]

I.8.2 Rejets chimiques

Toutes les usines de dessalement ont recours à divers produits chimiques tant pour le prétraitement de l'eau d'alimentation que pour le post-traitement de l'eau dessalée.

Ces produits jouent principalement un rôle de biocides, d'antitartres, d'anti-salissures et d'anti-mousses, et leur utilisation modifie inévitablement la composition chimique de la saumure rejetée.

De plus, la présence de certains métaux issus de la corrosion des circuits de traitement contribue également à altérer cette composition.

Ces substances chimiques varient selon les technologies de dessalement employées, notamment entre le procédé de distillation multi-effets (MSF) et celui de l'osmose inverse.

Les opérations de prétraitement visent à protéger les membranes ou les équipements thermiques, tandis que le post-traitement permet d'ajuster la qualité de l'eau produite en fonction des normes de distribution et de rejet.

Parmi les substances chimiques rejetées dans le milieu marin, on distingue plusieurs catégories :

I.8.2.1 Les produits issus de la corrosion :

Les usines de dessalement utilisant un procédé thermique libèrent dans leurs rejets des métaux lourds tels que le cuivre, le nickel, le fer, le chrome, le zinc et parfois le titane, selon les matériaux utilisés dans les installations.

Les concentrations de cuivre et de fer y sont généralement les plus élevées.

En Méditerranée, les niveaux de cuivre varient largement, allant de 0,04 à 0,70 ppm dans les eaux profondes, et de 0,01 à 50 ppm dans les zones côtières.

À titre d'exemple, une usine de dessalement d'une capacité de 50 000 m³/jour et un taux de conversion de 10 % pourrait rejeter jusqu'à 10 kg de cuivre quotidiennement avec ses 500 000 m³ de saumure, ce qui constitue un risque environnemental non négligeable, d'autant que le nombre de ce type d'usines augmente rapidement sur les côtes méditerranéennes.

À l'inverse, les procédés d'osmose inverse présentent un risque moindre de corrosion, car les systèmes fonctionnent à température ambiante et sont souvent constitués d'acier inoxydable.

I.8.2.2 Les agents antitartres :

Le tartre peut se déposer sur les surfaces internes des équipements de dessalement, provoquant des pertes de rendement ou des arrêts d'exploitation.

Dans les procédés thermiques, ces dépôts réduisent notamment le transfert de chaleur et gênent la circulation des fluides.

Pour éviter cela, plusieurs méthodes sont employées. Les poly phosphates, historiquement utilisés comme agents antitartres, sont aujourd'hui moins répandus en raison de leur instabilité thermique ils se dégradent au-delà de 90 °C et de leur efficacité limitée. De nos jours, les polymères de l'acide maléique sont préférés : ils inhibent la cristallisation en modifiant la structure des cristaux, favorisent la formation de boues molles non adhérentes et limitent ainsi l'entartrage. Bien que leur dosage d'utilisation varie de 1 à 3 ppm, la concentration retrouvée dans les rejets se situe généralement autour de 0,53 ppm.

En osmose inverse, l'acide sulfurique est souvent combiné à ces polymères pour prévenir la précipitation du tartre.

I.8.3 Rejets de saumures

Le phénomène de salissure, ou fouling, est un processus complexe et évolutif, impliquant plusieurs groupes d'organismes.

Il débute par l'adsorption de substances polymériques présentes dans l'eau brute sur les surfaces solides, ce qui favorise la formation d'un film initial propice à la colonisation bactérienne. [20]

Ce bio film primaire est ensuite envahi progressivement par des périphytes, des micros algues, des protozoaires, des champignons, ainsi que par des débris organiques et des particules inorganiques.

Depuis de nombreuses années, les composés chlorés sont couramment utilisés pour désinfecter les circuits d'alimentation en eau de mer ainsi que l'ensemble de l'installation en amont, dans le but de prévenir l'encrassement biologique.

En général, le chlore est injecté à une concentration de 2 ppm, et une gestion optimale du procédé vise à garantir une absence totale de résidu chloré au niveau du point de rejet en mer.

D'autres substances biocides, telles que les sels de cuivre, ont également été expérimentées, avec des résultats variables. Dans de nombreux cas, les concentrations de cuivre mesurées dans les rejets de saumure demeurent inférieures à 1 mg/L.

Toutefois, même à de faibles teneurs, la présence de ce métal reste préoccupante en raison de son potentiel de bioaccumulation et de ses effets néfastes à long terme sur l'environnement marin. [19]

I.9 Les avantages et les inconvénients de dessalement

I.9.1 Les avantages

Le dessalement de l'eau de mer offre plusieurs avantages significatifs.

Tout d'abord, il constitue une solution précieuse en cas de situations d'urgence, notamment lorsque les sources d'eau douce sont contaminées par des infiltrations d'eau salée, comme cela a pu être observé récemment à la suite de marées salines provoquées par des tsunamis en Asie.

Ensuite, l'utilisation de l'eau dessalée pour l'irrigation présente un intérêt environnemental majeur, en contribuant à limiter la salinisation des sols et à préserver leur fertilité. [20]

I.9.2 Les inconvénients

Le dessalement de l'eau de mer constitue une solution pertinente face aux besoins croissants en eau douce.

Cependant, quel que soit le procédé adopté, cette technologie présente un certain nombre de limites:

- Une forte consommation d'énergie ;
- L'utilisation de produits chimiques pour l'entretien et le nettoyage des membranes ;
- La présence possible de traces de métaux lourds issus des matériaux des installations ;
- L'absence de réglementation spécifique encadrant la potabilité de l'eau produite par ces procédés [21] ;
- Un rendement souvent faible, le volume d'eau douce obtenu restant limité en comparaison avec la quantité d'eau de mer prélevée ;

- Des impacts environnementaux non négligeables, notamment la détérioration des écosystèmes marins, liée à l'extraction massive d'eau et au rejet de concentrât fortement salins.
[22]

I.10 Conclusion

En conclusion, le dessalement de l'eau de mer constitue une technologie essentielle pour garantir l'accès à une ressource vitale dans des contextes où les ressources naturelles en eau douce sont insuffisantes.

Les différentes étapes du processus, depuis la captation de l'eau jusqu'au post-traitement, garantissent la qualité de l'eau produite et son adéquation aux usages humains ou industriels.

Parmi les procédés, les méthodes thermiques et membranaires offrent des alternatives complémentaires, chacune avec ses spécificités en termes d'efficacité énergétique, coût et impact environnemental.

Le choix de la technique appropriée dépend donc des conditions locales, des besoins en eau et des contraintes économiques. La maîtrise de ces technologies est cruciale pour assurer une gestion durable et responsable des ressources hydriques à l'avenir.

Chapitre II : Le Procédé utilisé par la station
(osmose inverse)

II.1 Introduction :

L'osmose inverse est une technologie essentielle dans le domaine du traitement et de la purification de l'eau, permettant d'éliminer efficacement les impuretés et les sels dissous par le biais de membranes semi-perméables.

Fondée sur le principe physique d'inversion du flux osmotique par application d'une pression supérieure à la pression osmotique naturelle, cette technique s'impose aujourd'hui comme une solution incontournable face aux enjeux croissants de la pénurie d'eau potable et de la dégradation de la qualité des ressources hydriques.

Ce chapitre présente les principes fondamentaux de l'osmose et de l'osmose inverse, ainsi que les caractéristiques techniques des installations et des membranes utilisées.

Il aborde également les mécanismes de transfert, les différents types de modules membranaires, ainsi que les aspects énergétiques et environnementaux liés à ce procédé, en insistant sur les défis et les innovations visant à optimiser son efficacité et sa durabilité.

II .2 Principe d'osmose :

L'osmose est un phénomène physique naturel qui désigne le passage spontané d'un solvant (généralement de l'eau) à travers une membrane semi-perméable, qui ne laisse passer que les molécules de solvant, mais pas les solutés dissous.

Ce transfert se fait du milieu le moins concentré (hypotonique) en soluté vers le milieu le plus concentré (hypertonique), dans le but d'équilibrer les concentrations de part et d'autre de la membrane.[23]

Ce phénomène est gouverné par un gradient de concentration et s'arrête lorsque la pression osmotique s'équilibre, c'est-à-dire lorsque la tendance à l'égalisation des concentrations est compensée par la pression hydrostatique opposée. [24]

II .3 Principe d'osmose inverse :

L'osmose correspond au passage du solvant à travers une membrane semi-sélective, sous l'influence d'un gradient de concentration.

Si l'on considère un système constitué de deux compartiments contenant des solutions de concentrations différentes et séparés par une telle membrane, l'eau migre naturellement de la solution la moins concentrée vers la solution la plus concentrée.

En appliquant une pression sur le compartiment contenant la solution concentrée, le flux d'eau osmotique diminue.

Lorsque cette pression atteint une valeur critique, dite pression osmotique P (en supposant que la solution diluée soit de l'eau pure), le transfert d'eau s'arrête.

Si la pression appliquée dépasse cette valeur, le mouvement de l'eau s'inverse : l'eau passe alors de la solution concentrée vers la solution diluée, ce qui constitue le phénomène d'osmose inverse. [24]

II .4 Pression osmotique :

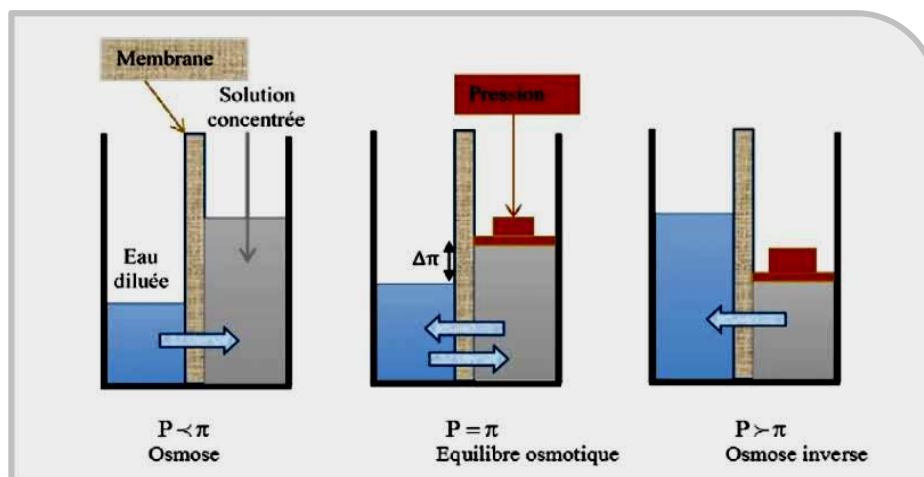


Figure II-1: le principe d'osmose inverse.

La pression osmotique d'une solution saline dépend à la fois de la nature des sels dissous et de leur concentration.

Elle peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\Pi = i \times C \times R \times T \dots\dots\dots \text{II-1}$$

Où :

- ✓ i : représente le facteur de dissociation, c'est-à-dire le nombre d'ions produits par molécule de soluté dissoute,
- ✓ C : est la concentration molaire de la solution, exprimée en mol/m³,
- ✓ R : est la constante des gaz parfaits, égale à 8,31 J/ (mol.K),
- ✓ T : est la température absolue, en kelvins (K),
- ✓ Π : désigne la pression osmotique, exprimée en pascals (Pa). [24]

II.5 Schéma générale d'une installation d'osmose inverse

Une installation d'osmose inverse est conçue pour purifier l'eau en la faisant passer à travers des membranes semi-perméables sous l'effet d'une pression élevée.

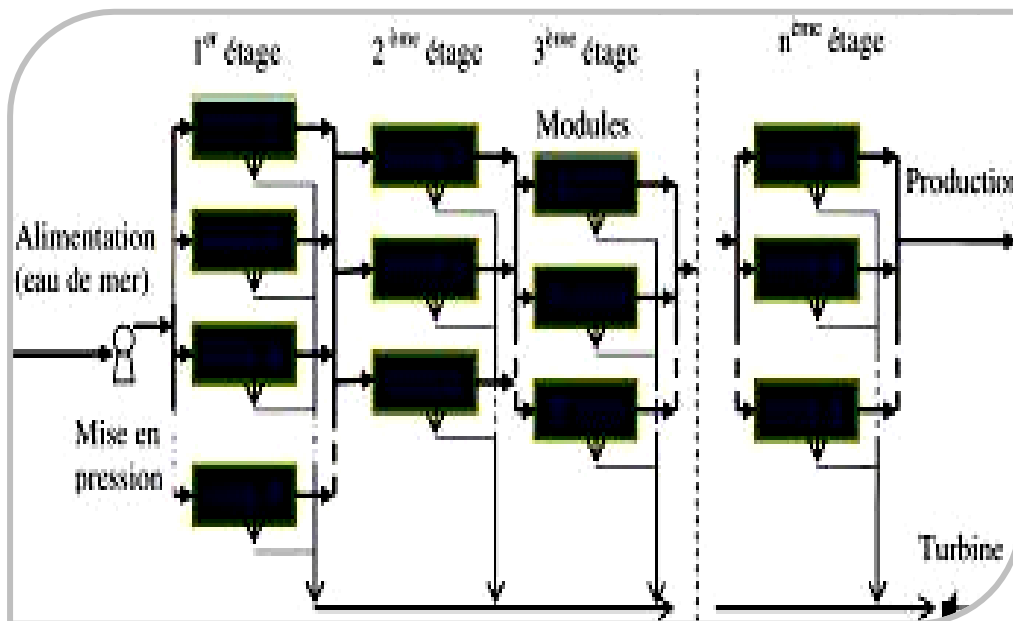


Figure II-2: Schéma générale d'une installation d'osmose inverse.

II.6 Caractéristique principale d'une unité d'osmose inverse :

II.6.1 Taux de conversion :

Le **taux de conversion (Y)** représente la fraction du débit initial de la solution d'alimentation qui réussit à traverser la membrane.

Il est défini par la relation suivante : [24]

$$Y = Q_P / Q_0 \dots\dots\dots \text{II-2}$$

Q_p : débit de perméat ; Q_0 : la solution à traiter.

II.6.2 Sélectivité :

La sélectivité d'une membrane est généralement caractérisée par son taux de rétention (ou taux de rejet) de l'espèce que la membrane doit retenir (comme un sel, une macromolécule ou une particule). [24]

Dans le cas de l'osmose inverse, le chlorure de sodium (NaCl) est fréquemment utilisé comme soluté de référence, car la déminéralisation de l'eau constitue l'une des principales applications de cette technologie.

Ainsi, certaines membranes sont spécialement conçues pour le dessalement de l'eau de mer, avec un taux de rejet du NaCl pouvant atteindre environ 99 %, tandis que d'autres, destinées au traitement des eaux saumâtres, présentent un taux de rejet avoisinant 96 %.

Ces performances dépendent bien sûr des conditions opératoires telles que la pression, la température et le taux de conversion.

Le taux de rétention T_R est donné par la formule suivante :

$$T_R = 1 - (C_p / C_0) \dots\dots\dots \text{II-3}$$

Où :

- ✓ T_R : Taux de rétention
- ✓ C_0 : concentration de l'espèce à retenir dans la solution ;
- ✓ C_p : concentration de cette même espèce dans le perméat.

II.6.3 Débit Spécifique ou densité du flux volumique

La densité de flux de perméat, également appelée densité de flux volumique (notée J_p) exprimée en m/s ou plus couramment en L/h·m²), représente la quantité de perméat produite par unité de surface de membrane.

Elle permet ainsi d'évaluer la **productivité de l'installation membranaire**.

$$J_p = Q_p / S \dots\dots\dots \text{II-4}$$

Avec :

- ✓ Q_p : volume du perméat.
- ✓ S : surface de la membrane.

Pour une sélectivité donnée, le débit par unité de surface (densité par flux volumique) doit être le plus élevé possible de manière à minimiser la surface de membrane à mettre en œuvre et par la même l'investissement. [24]

II.6.4 Mécanismes de transfert :

Dans le procédé d'osmose inverse, le passage du solvant et du soluté à travers une membrane semi-perméable s'effectue selon un mécanisme de solubilisation-diffusion.

Autrement dit, les molécules du solvant et du soluté se dissolvent dans la membrane, puis diffusent à travers celle-ci comme elles le feraient dans un liquide ou un solide, sous l'effet combiné d'un gradient de concentration et de pression.

Les flux respectifs du solvant et du soluté à travers la membrane sont décrits par deux équations distinctes. [24]

$$\boxed{J_1 = A (\Delta P - \Delta \pi)} \dots\dots\dots \text{II-5}$$

Avec :

- ✓ **J₁** (kg/m².s) : flux d'eau à travers la membrane ;
- ✓ **A** (kg/s.Pa.m²) : perméabilité de la membrane à l'eau ;
- ✓ **ΔP**(Pa) : la pression appliquée.
- ✓ **Δπ** (Pa) : différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane.

$$\boxed{J_2 = B \Delta C} \dots\dots\dots \text{II-6}$$

Avec :

- ✓ **J₂** (kg/m². s) : flux de sel à travers la membrane ;
- ✓ **B** (m/s) : perméabilité de la membrane au sel ;
- ✓ **ΔC** (kg/m³) : différence de concentration en sel de part et d'autre de la membrane.

II.7 Module d'osmose :

II.7.1 Modules spirale :

Une feuille poreuse est intercalée entre deux membranes planes, l'ensemble étant ensuite enroulé sur lui-même autour d'un tube collecteur poreux destiné à récupérer le filtrat.

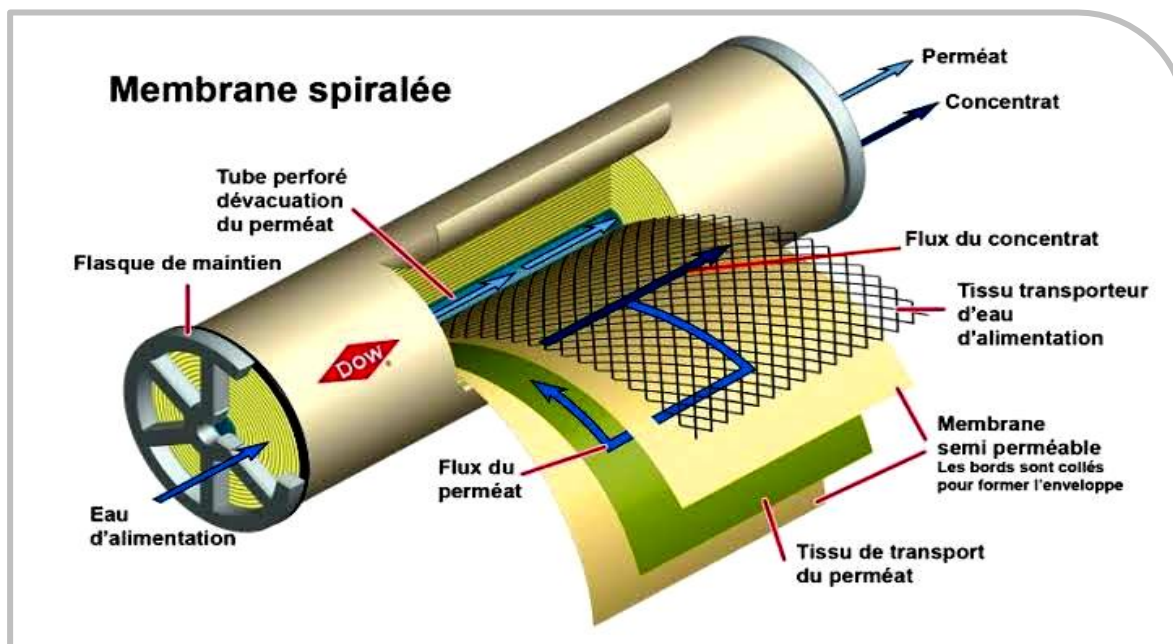


Figure II-3: Modules spirales

Ce "sandwich" membranaire est ensuite scellé sur trois de ses côtés, tandis que le quatrième côté est ouvert, formant ainsi un tube cylindrique jouant le rôle de collecteur du perméat. [25]

II.7.2 Modules tubulaire :

Les membranes sont insérées ou formées à l'intérieur d'un tube support poreux, percé d'orifices de drainage, dont le diamètre varie entre 10 et 40 nm.

Ces tubes sont ensuite assemblés en parallèle ou en série dans une enveloppe cylindrique afin de constituer un module unitaire.

L'écoulement du fluide à travers ce système est hydro dynamiquement bien maîtrisé, permettant d'atteindre des vitesses de circulation allant jusqu'à 6 m/s, notamment lorsque des conditions de forte turbulence sont requises.

Ces modules présentent plusieurs avantages : ils ne nécessitent pas de préfiltration fine du liquide à traiter et sont faciles à nettoyer.

En revanche, leur principal inconvénient réside dans leur faible compacité ainsi qu'un coût élevé par mètre carré de membrane installée. [26]

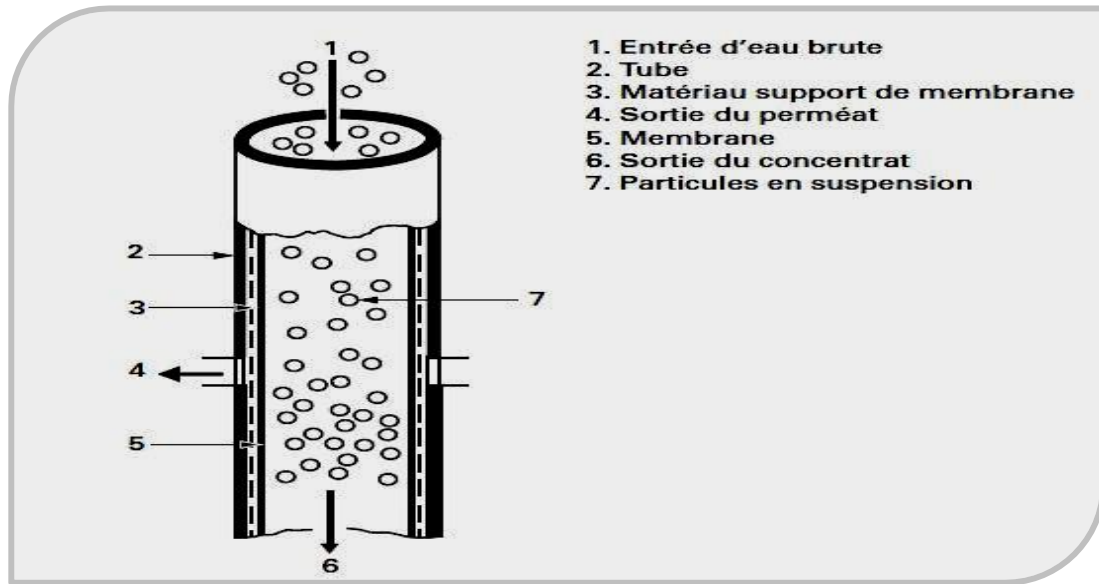


Figure II-4: Modules tubulaires

II.7.3 Modules en plans entre plaques

Les modules plans de type filtre-presse représentent l'une des formes les plus anciennes et les plus simples d'assemblage.

Dans cette configuration, les membranes sont disposées parallèlement, séparées par des joints séparateurs et des supports jouant le rôle de compartiments d'entrée (amont) et de sortie (aval).

La structure cannelée ou grillagée des séparateurs favorise une turbulence maximale de l'écoulement, améliorant ainsi les performances de filtration. [27]

Quant aux supports, essentiels dans les procédés opérant sous pression, ils sont généralement poreux et dotés d'une surface lisse, afin de prévenir tout risque de cisaillement de la membrane.

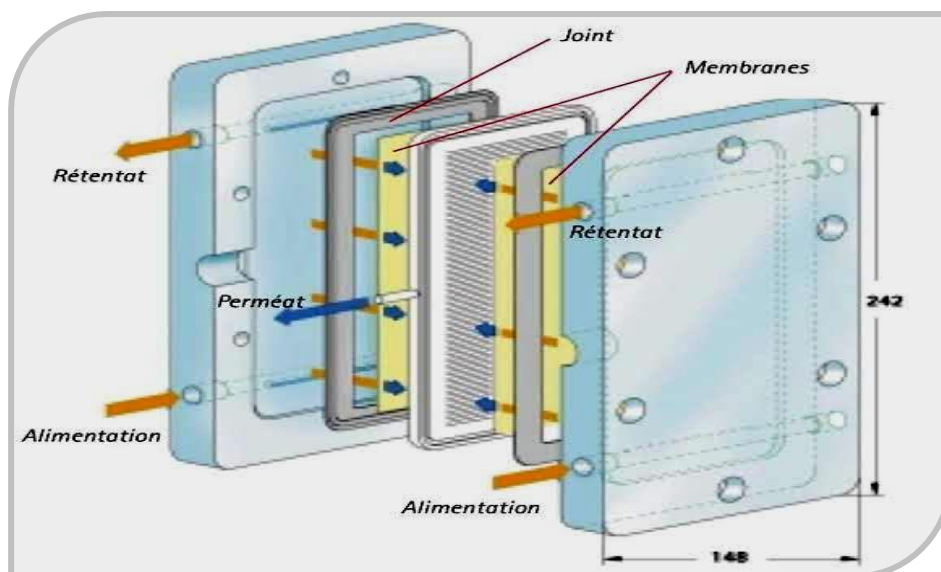


Figure II-5: modules plans.

II.7.4 Modules en fibres :

Les modules en fibres sont largement utilisés dans les procédés de séparation par membrane, notamment dans les systèmes d'osmose inverse, de nano filtration et d'ultrafiltration.

Ils se présentent généralement sous forme de fibres creuses disposées en faisceaux dans un boîtier sous pression.

Ces fibres sont souvent fabriquées à partir de polymères synthétiques tels que le poly sulfone, le polyéther sulfone (PES), ou le polyvinylidène fluorure (PVDF).

Les modules en fibres offrent plusieurs avantages : une surface spécifique élevée, une compacité notable, une grande perméabilité, et une facilité de mise en œuvre dans des configurations modulaires.

Cependant, ils sont relativement sensibles à l'encrassement et nécessitent un prétraitement efficace de l'eau brute pour garantir une durée de vie optimale. [28]

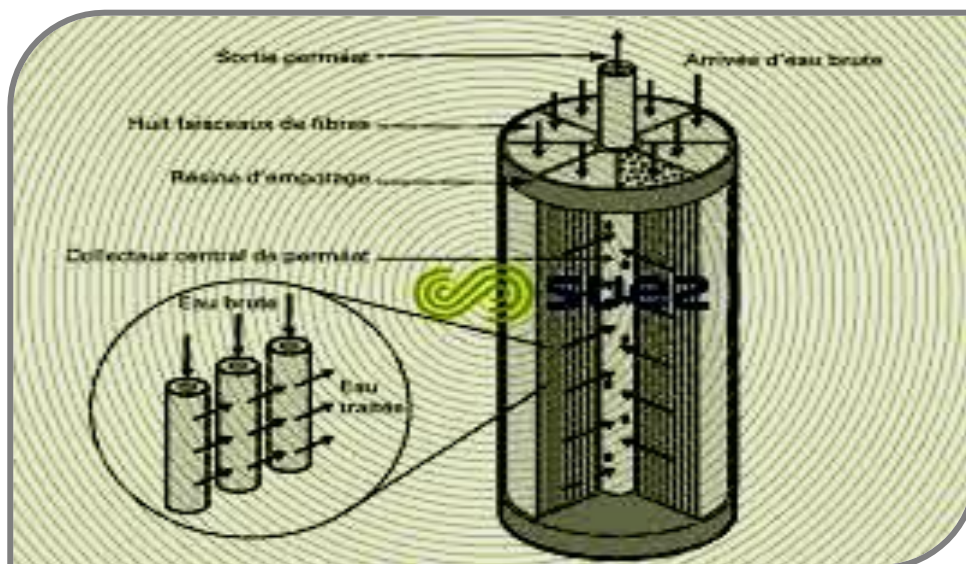


Figure II-6: Modules en fibres

II.7.5 Modules en céramiques

Les modules en céramiques représentent une solution robuste et durable dans le domaine de la filtration membranaire, notamment pour les applications exigeantes telles que le traitement des eaux usées industrielles, les procédés pharmaceutiques ou les industries agroalimentaires.

Ils sont fabriqués à partir de matériaux comme l'alumine, la zircone ou le carbure de silicium, ce qui leur confère une excellente résistance chimique, thermique et mécanique. [29]

Ces modules sont moins sensibles à l'encrassement biologique que les membranes organiques, peuvent être nettoyés de manière agressive (chimiquement ou à haute température), et présentent une longue durée de vie.

En revanche, leur coût initial est plus élevé, ce qui limite leur usage à des cas où la robustesse et la stabilité sont des critères essentiels.



Figure II-7: Module en céramiques.

II.8 Durée de vie des membranes

La durée de vie des membranes d'osmose inverse varie en fonction de leur nature ainsi que des conditions d'exploitation, notamment la pression de service, la température de l'eau, le pH, et la qualité du prétraitement appliqué.[30]

II.9 Consommation d'énergie

Il est essentiel de mesurer la quantité d'énergie conventionnelle consommée par les procédés de dessalement afin de saisir l'importance du recours aux sources d'énergie renouvelables et durables.

En effet, les systèmes de dessalement traditionnels contribuent au réchauffement climatique, ce qui peut être mis en évidence en estimant la quantité de combustibles fossiles nécessaires pour produire une certaine quantité d'eau douce.

Par exemple, la production de 1000 mètres cubes d'eau douce par dessalement consomme en moyenne environ 5 tonnes de pétrole brut, générant ainsi près de 10 tonnes de dioxyde de carbone, soit l'équivalent de 5000 mètres cubes de gaz à effet de serre.

Cette problématique devient d'autant plus préoccupante que la capacité mondiale de dessalement a fortement augmenté au cours des dernières années, passant de 66,48 millions de mètres cubes par jour en 2011 à 86,6 millions en 2015.

Par conséquent, il devient impératif de mettre en œuvre des stratégies concrètes pour intégrer les énergies renouvelables dans les procédés de dessalement, dans le but de limiter leur impact environnemental. [31]

II.10 Récupération d'énergie

La récupération d'énergie constitue un élément clé pour améliorer l'efficacité énergétique des systèmes de dessalement, en particulier ceux utilisant l'osmose inverse. Cette technique permet de

recupérer une partie de l'énergie contenue dans la saumure rejetée à haute pression, afin de la réinjecter dans le processus, réduisant ainsi la consommation énergétique globale de l'installation.

Des dispositifs comme les échangeurs de pression, les turbines hydrauliques ou encore les systèmes de récupération isobarique sont couramment utilisés à cet effet. Grâce à ces systèmes, il est possible d'économiser jusqu'à 60 % de l'énergie qui serait autrement perdue, ce qui rend le dessalement plus économique et écologiquement viable.

La récupération d'énergie joue donc un rôle essentiel dans la transition vers des procédés de dessalement plus durables et moins polluants. [31]

II.11 Conclusion

En conclusion, l'osmose inverse constitue une technologie avancée et performante pour la production d'eau potable et le traitement des eaux salines ou contaminées.

Grâce à l'utilisation de membranes semi-perméables et à la maîtrise des paramètres de pression et de concentration, ce procédé permet une séparation efficace des solutés indésirables tout en garantissant une productivité élevée.

Cependant, ses performances dépendent largement des caractéristiques des membranes, du type de module utilisé et des conditions opératoires, sans oublier les enjeux énergétiques associés.

L'intégration des systèmes de récupération d'énergie et le développement de membranes plus résistantes et sélectives sont des axes majeurs pour rendre cette technologie plus économique et respectueuse de l'environnement. Ainsi, l'osmose inverse demeure une solution clé dans la gestion durable des ressources en eau face aux défis globaux actuels.

**Chapitre III : Description de la station de
dessalement d'eau de mer de Mostaganem**

III.1 Introduction

Dans un contexte de stress hydrique croissant et de raréfaction des ressources en eau douce, l'Algérie a adopté une stratégie proactive visant à diversifier ses sources d'approvisionnement en eau potable. Parmi les solutions retenues figure le dessalement de l'eau de mer, une technologie de plus en plus utilisée à l'échelle mondiale.

C'est dans ce cadre qu'a été mise en place la station de dessalement de Mostaganem (MTM), implantée sur la plage de Cheliff, dans la wilaya de Mostaganem. , cette infrastructure moderne utilise le procédé d'osmose inverse pour transformer l'eau de mer en eau potable, conforme aux normes de qualité exigées.

Ce chapitre se propose de présenter de manière détaillée cette installation stratégique, en décrivant son fonctionnement, ses différents systèmes techniques, ainsi que les étapes du processus de traitement de l'eau.

III.2 Présentation de station de dessalement de Mostaganem

L'usine de dessalement de Mostaganem, située sur la plage de Cheliff dans la wilaya de Mostaganem, possède une capacité de production de 200 000 m³ d'eau potable par jour.

Elle a été conçue pour fournir une eau conforme aux normes de qualité requises, tout en maintenant une consommation énergétique spécifique inférieure à celle garantie, fixée à 3,22 kWh/m³.

Cette station a été réalisée dans le cadre d'un partenariat entre les entreprises espagnoles spécialisées dans le traitement avancé de l'eau, GS INIMA et AQUALIA, en collaboration avec l'Union Temporaire des Entreprises « Opération & Maintenance Mostaganem » (UTE O&M MTM).

Implantée à Sonachter, dans la ville de Mostaganem, la station a été construite en 2005 et est entrée en exploitation en 2010. [32]



Figure III-1: Station de dessalement de l'eau de mer de Mostaganem

Le projet s'inscrit dans une stratégie nationale mise en place par le gouvernement algérien visant à diversifier les ressources en eau potable à travers le développement de plusieurs usines de dessalement.

Ce programme a également pour objectif de préserver les nappes phréatiques et d'en favoriser le renouvellement.

Le processus de traitement de l'eau de mer dans cette station comprend plusieurs étapes essentielles :

- Le captage et le pompage de l'eau de mer.
- Le prétraitement par filtration et microfiltration.

- La déminéralisation de l'eau par osmose inverse.
- La reminéralisation et le conditionnement de l'eau traitée.
- Le pompage de l'eau reminéralisée vers le réseau de distribution.
- L'évacuation des saumures et sous-produits issus du traitement.
- Le dessalement de l'eau est effectué selon le procédé d'osmose inverse, tel qu'illustré dans la figure suivante.

Les paramètres d'exploitation tels que l'énergie consommée, le volume d'eau brute et la quantité de produits chimiques utilisés varient selon le régime de fonctionnement, le type d'installation, ainsi que les dimensions de l'usine.

Enfin, l'exploitation de l'installation est entièrement automatisée grâce à un système centralisé utilisant un ordinateur et plusieurs automates programmables, assurant ainsi un fonctionnement efficace et optimisé. [32]

III.3 Description et fonctionnement normal des installations du procédé

III.3.1 Captage et pompage de l'eau de mer

Le système de captage a pour but impulser vers le prétraitement de l'eau de mer en quantité et à la pression nécessaire pour produire la quantité d'eau potable désirée.

Le système de captage comprend les sous-systèmes suivants:

- Tours et tuyauteries de prise
- Sous-système anti-méduses
- Sous-système d'amorçage des pompes d'eau de mer



Figure III-2: Salle de captage.

III.3.1.1 Tours de captage et tuyauterie de captage

Le captage de l'eau de mer se fait à travers de deux tours de prise connectées au réservoir de pompage d'eau de mer par deux tuyauteries en polyéthylène d'haute densité De 1.800 mm de diamètre où l'eau doit circuler à une vitesse d'environ 1 m/s.

Les tours de prise sont submergées à une distance de la côte d'environ 2 500 m et 16,5 mètres de profondeur.

L'eau de mer passe à l'intérieur de chaque tour de prise à travers de quatre grilles rectangulaires de 3,89 x 1,42 mètres et trous de 3,54 x 1,30 cm installées pour éviter le passage de poissons, méduses, cailloux et des autres éléments de grand taille pouvant nuire le processus de traitement. Ces grilles peuvent être extraites par plongeurs pour éliminer des éventuelles incrustations.

Les plongeurs peuvent aussi accéder aux tuyauteries de prise à travers des trous d'homme installés au long des tuyauteries et/ou à travers des tours de captage pour inspecter leur intérieur et réaliser des activités d'entretien.

Chaque une des tuyauteries de prise peut être isolé pour réaliser des activités d'entretien à l'intérieur sans arrêter l'usine avec l'aide des vannes murales installées dans le réservoir de captage.

III.3.1.2 Système anti-méduses

Une des raisons pour laquelle le niveau dans le réservoir de captage d'eau de mer peut être éventuellement trop bas est l'obturation des grilles des tours de captage occasionnée par des méduses, algues et/ou poissons. Le système anti-méduses a été conçu pour générer un rideau d'air au tour des grilles que fasse flotter ces animaux et(ou) éléments vers la surface.

III.3.1.3 Système d'amorçage des pompes de l'eau de mer

L'aspiration des pompes d'eau de mer sera normalement plus haute que le niveau d'eau du réservoir de captage.

Le système d'amorçage des pompes d'eau de mer a pour objet extraire l'air des conductions d'aspiration des pompes d'eau de mer.

III.3.1.4 Système de pompage de l'eau de mer

Le système de pompage d'eau de mer a pour objet fournir au prétraitement de l'eau de mer en quantité et à la pression nécessaire pour produire la quantité d'eau potable désirée.

Les pompes de captage de l'eau de mer ont été conçues pour pomper un débit de 2380 m³/h à une pression de 63 bar. Néanmoins ces pompes sont équipées avec des variateurs de fréquence pour permettre le changement du point de travail pour maintenir une pression au niveau de l'aspiration des pompes d'haute pression.

L'aspiration des pompes de haute pression préalable à l'osmose est maintenue à une pression de 2.5 bars grâce à des échangeurs de fréquence.

III.3.2 Système de prétraitement :

Le prétraitement de l'eau de mer constitue une étape cruciale avant son passage par les membranes d'osmose inverse.

En effet, ces dernières sont particulièrement sensibles au colmatage. Un prétraitement efficace garantit une qualité optimale de l'eau en amont des modules d'osmose, condition indispensable pour assurer des performances stables et durables du système.

Les procédés de prétraitement se divisent en deux grandes catégories :

- Prétraitement physique
- Prétraitement chimique

III.3.2.1 Prétraitement physique

Les traitements physiques incluent la filtration sur sable ainsi que la microfiltration à l'aide de filtres à cartouche.

Le rôle principal de ce système est de clarifier l'eau en éliminant les matières en suspension. Ce procédé permet également de réduire la turbidité, d'atténuer les odeurs, de limiter la présence bactérienne, et surtout de protéger les membranes d'osmose inverse, en optimisant leur efficacité.

L'unité de dessalement de Mostaganem est dotée de deux étapes de filtration successives :

- Une première étape utilisant des filtres mixtes à sable et anthracite,
- Une seconde étape faisant appel à des filtres à sable classiques.[32]

III.3.2.2 Prétraitement chimique

Le conditionnement chimique consiste à ajouter différents produits destinés à prévenir l'entartrage et à améliorer la qualité de l'eau. Cela inclut :

- Des inhibiteurs d'entartrage,
- Des agents coagulants et flocculants,
- Des désinfectants.

L'ensemble de ces opérations vise à préserver l'intégrité des membranes, prolonger leur durée de vie, et garantir une production continue et fiable d'eau potable. [33]

III.3.2.1.1 Système de filtration

Le système de filtration constitue un procédé physique essentiel visant à éliminer les matières solides en suspension dans l'eau de mer.

Il permet une réduction efficace de la charge bactérienne, des odeurs et de la turbidité. Cette étape est fondamentale pour préserver les membranes d'osmose inverse (OI) et en optimiser les performances à long terme.

L'usine de dessalement de Mostaganem est équipée d'un dispositif de filtration à deux niveaux, complété par un système de microfiltration. [32]



Figure III-3: système de filtration

III.3.2.1.1 Filtration de première étape

L'Usine est équipée avec deux lignes de filtration de première étape avec douze (12) filtres horizontaux à pression chacune, travaillant à une vitesse de $8,45 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ et à une vitesse maximale de $9,46 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ lorsque l'une des filtres soit en lavage.

La distribution de l'eau à filtrer sera réalisée à l'aide d'un collecteur perforé construit-enPEHD afin d'atteindre la distribution homogène du débit tout au long de la surface de filtration.

La couche de filtration a les caractéristiques décrites ci-dessous :

Tableau III-1: Les caractéristiques des couches de filtration (première étape).

COUCHE SUPÉRIEURE	
Nature	Anthracite
Granulométrie	0,8-1,60 mm
Coefficient d'uniformité	< 1,40
Densité apparente	0,71 t/ m ³
Densité réelle	1,40 t/ m ³
Haut de couche	0,80 m
Volume par filtre	73,70 m ³
COUCHE INFÉRIEURE	
Nature	Sable siliceux
Granulométrie	0,4-0,80 mm
Coefficient d'uniformité	< 1,40
Densité apparente	1,50 t/ m ³
Densité réelle	2,60 t/ m ³
Haut de couche	0,40 m
Volume par filtre	36,67 m ³

III.3.2.1.1.2 Filtration de deuxième étape

Ils existent deux batteries munies de huit (8) filtres de pression horizontale chacune, travaillant à une vitesse de 12.87 m³/h/m² avec un maximum de 15.09 m³/h/m², lorsque l'un d'eaux sera dans le nettoyage.

Chaque filtre a une surface filtrante moyenne de 90,04 m² et leurs dimensions et caractéristiques sont les mêmes que celles des filtres à sable de la première étape.

La couche de filtration a les caractéristiques ci-après détaillées:

Tableau III-2: Les caractéristiques des couches de filtration (deuxième étape).

Nature	Sable siliceux
Caractéristique	1-2
Granulométrie	1-2
Coefficient d' Uniformité	1,40
Contenu de SiO ₂	96%
Densité apparente	1,50 t/m ³
Densité réelle	2,60 t/m ³
Haut de couche	1,00 m
Volume par filtre	94 m ³

III.3.2.1.1.3 Système de microfiltration

La fonction du système de microfiltration est protéger le système d'osmose inverse empêchant le passage des particules suspendues dans l'eau filtrée non-retenues par les filtres au système de pompage d'haute pression. La microfiltration ne permet pas passer que des particules de taille inférieure à 5 microns.

Le système de microfiltration consiste à deux lignes équipées avec neuf (9) filtres, Chaque filtre est muni de 360 cartouches de 1250 mm de longueur. Le débit unitaire par cartouche est de 2,85 m³/h, lorsque les neuf seront en activité. Il atteindra celui de 3,20 m³/h lorsque l'un d'entre eux est isolé pour le changement de ses cartouches.[32]

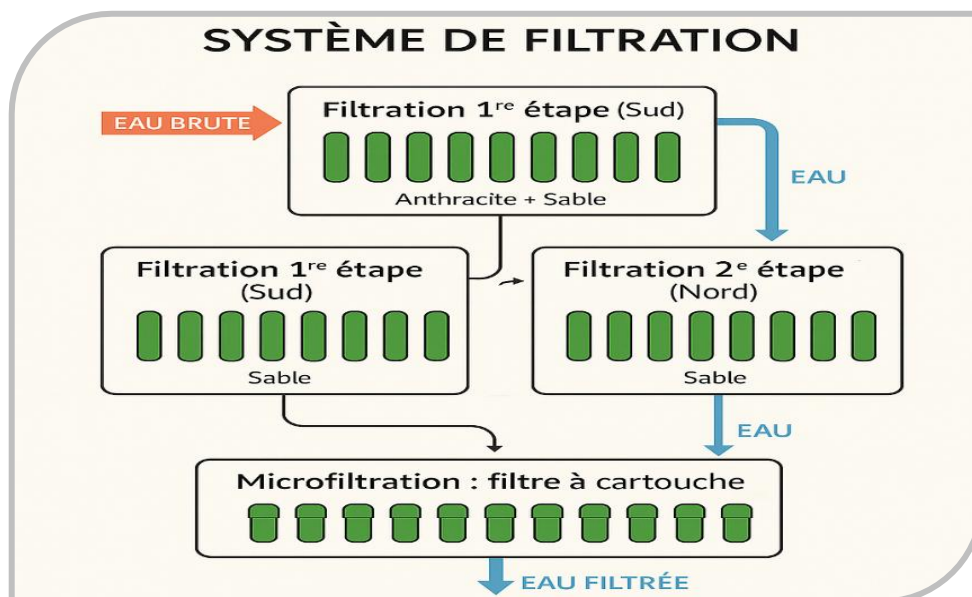


Figure III-4: Schéma représenter les trois étapes de filtration

III.3.3 Système d'osmose inverse :

Le système d'osmose inverse constitue le cœur opérationnel de l'usine de dessalement.

Il a pour rôle principal la réduction significative de la teneur en sels dissous dans l'eau préalablement microfiltrée.

Ce système se compose de plusieurs sous-ensembles essentiels, parmi lesquels :

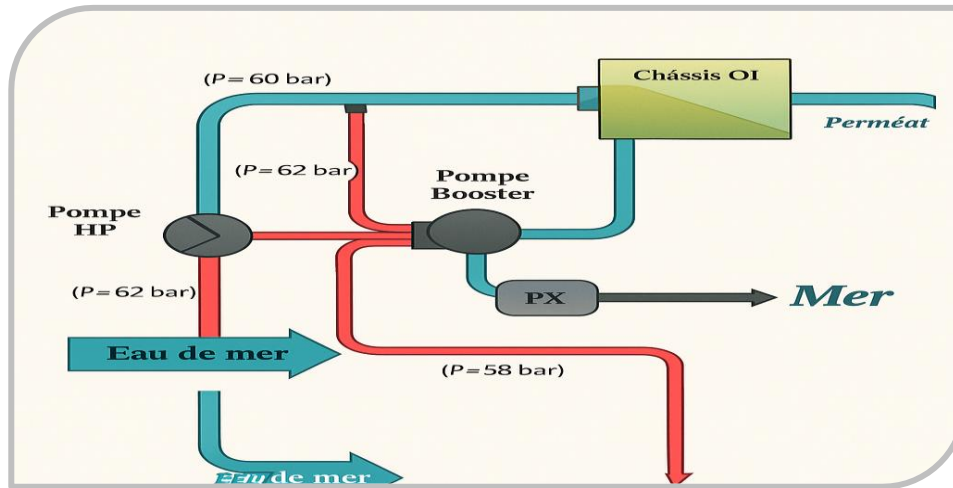


Figure III-5: Schéma général d'une installation d'osmose inverse.

III.3.3.1 Système de pompage haute pression, pompe booster et récupération d'énergie

La fonction du système de pompage haute pression est de propulser l'eau micro-filtrée vers les châssis d'osmose inverse en lui fournissant la pression nécessaire pour surmonter la pression osmotique, garantissant ainsi la production du débit d'eau déminéralisée souhaité. Environ 65 % du débit total d'eau micro-filtrée requis est acheminé vers les châssis par les pompes haute pression [32].

Le débit restant d'eau micro-filtrée est pressurisé jusqu'à atteindre la pression d'alimentation des membranes grâce aux échangeurs de pression et aux pompes Booster. Dans les chambres isobariques, l'énergie hydraulique résiduelle contenue dans la saumure est transférée à l'eau micro-filtrée.

Ensuite, les pompes Booster augmentent la pression de cette eau, poussée par les échangeurs de récupération d'énergie (ERI), jusqu'à atteindre la pression d'alimentation nécessaire aux châssis.

L'eau micro-filtrée, pressurisée à la fois par les pompes haute pression et les pompes Booster, est dirigée vers un collecteur commun qui alimente l'ensemble des châssis d'osmose inverse.

Ce collecteur est néanmoins équipé de plusieurs vannes permettant le fonctionnement indépendant des différentes unités de dessalement.

Dans cette configuration, l'eau micro-filtrée propulsée par chaque pompe haute pression alimente directement le châssis d'osmose inverse associé, tandis que l'eau pressurisée par

chaque pompe Booster est envoyée vers le châssis correspondant, via deux collecteurs distincts.

Ainsi, les pompes haute pression et Booster, alimentées par la même ligne de prétraitement, fournissent de l'eau pressurisée vers leur collecteur respectif, qui dessert les châssis associés.

Finalement, dans une autre configuration, toute l'eau micro-filtrée pressurisée est acheminée vers un unique collecteur commun, alimentant simultanément tous les châssis d'osmose inverse.

III.3.3.2 Châssis d'osmose inverse

Les membranes utilisées dans les châssis sont de type spiralé, à surface élevée, fabriquées à partir de polyamide aromatique par la marque NANO/LG.

Ces membranes sont insérées dans des tubes de pression, disposés en parallèle afin de respecter les exigences de débit et de pression du système.

Le procédé d'osmose inverse repose sur l'utilisation de membranes semi-perméables, qui laissent uniquement passer les molécules d'eau, tout en retenant jusqu'à 99,6 % des sels dissous, ainsi que 100 % des particules colloïdales, micro-algues, macromolécules organiques, argiles et autres impuretés, même infimes.

L'eau micro filtrée circule tangentiellement le long des membranes, créant un gradient de concentration entre les deux faces de la membrane. Ce flux transversal permet d'optimiser le rendement de séparation tout en limitant l'accumulation de dépôts.

III.3.3.3 Nettoyage chimique des membranes

Avec le temps, les membranes peuvent être sujettes à un encrassement dû à l'accumulation de matières colloïdales, de précipités minéraux ou de micro-organismes. Pour préserver leur performance, un nettoyage chimique périodique est indispensable.

Ce nettoyage devient obligatoire lorsque l'un des critères suivants est observé :

- Une baisse du débit de perméat normalisé dépassant 10 à 15 % par rapport à la valeur initiale.
- Une augmentation du passage des sels supérieurs à 10 % de la valeur initiale.
- Une hausse de la perte de pression à travers les membranes de plus de 10 %. [32]

III.3.4 Système de reminéralisation et de conditionnement de l'eau osmotique

Le système de reminéralisation a pour objectif de potabiliser l'eau osmotique issue de l'osmose inverse, en corrigeant son agressivité et en lui conférant les caractéristiques physico-chimiques conformes aux normes de consommation.

Ce processus vise à rétablir l'équilibre calco-carbonique de l'eau, en ajustant notamment les paramètres tels que l'alcalinité, la dureté, le pH, l'indice de saturation de Langelier (LSI) et le MTD, tout en assurant la protection des réseaux de distribution contre la corrosion.

Chaque ligne de production d'eau osmosée alimente le système de reminéralisation par l'intermédiaire de collecteurs indépendants.

L'eau est ensuite dirigée vers un réservoir de 6 mètres de hauteur, qui permet, par simple gravité, le passage de l'eau à travers des lits de calcite, assurant ainsi sa minéralisation progressive avant son transfert vers le réservoir final de stockage de l'eau traitée.

Le raccordement entre le réservoir de l'eau osmosée et les colonnes contenant les couches de calcite est équipé d'un système de dosage de dioxyde de carbone (CO_2).

Ce dernier favorise la dissolution contrôlée de la calcite, optimisant la reminéralisation.

L'eau est injectée à la base des colonnes, où elle est répartie uniformément grâce à des faux fonds, permettant une percolation homogène à travers les lits de calcite et garantissant ainsi une qualité d'eau finale stable et conforme aux exigences sanitaires.

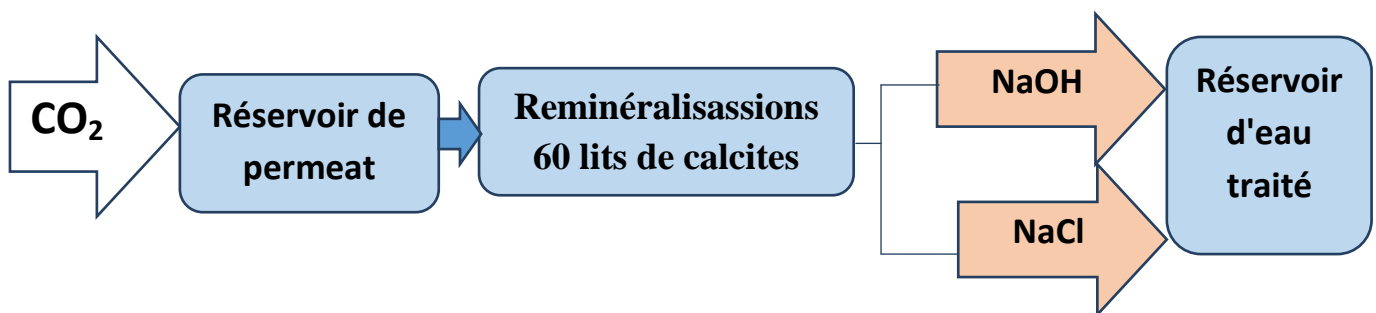


Figure III. 6: Schéma représente le système de reminéralisation.

III.3.5 Système de stockage et d'impulsion de l'eau produite

Le système de stockage et d'impulsion de l'eau potable produite a pour fonction essentielle de transférer l'eau traitée vers le réseau public de distribution, exploité par l'Algérienne des Eaux (ADE), via une infrastructure hydraulique dédiée.

L'eau reminéralisée est stockée dans un réservoir en béton armé d'une capacité de 4000 m^3 , conçu pour assurer un tampon hydraulique entre la production et la distribution, et garantir une alimentation continue et sécurisée du réseau externe.

Ce réservoir joue également un rôle crucial dans la régulation des débits et des pressions lors de la phase d'impulsion vers le réseau de desserte. [34]

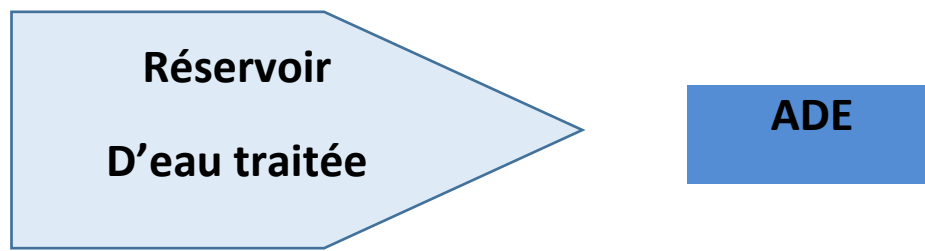


Figure III-7: Schéma représente le stockage et impulsion de l'eau produite.

III.3.6 Système de vidange des saumures

L'évacuation des rejets de station de dessalement est réalisée via un canal équipé par des diffuseurs au bout de son tronçon sous-marin.

Une fois que la saumure passe par les récupérateurs de pression, elle est ramassée par un collecteur, ce collecteur décharge dans un réservoir enterré chargé de collecter de l'eau pour le lavage des filtres.

La saumure est rejetée dans un hangar de sortie du canal auquel il est raccordé. [32]

III.4 Conclusion

La station de dessalement de Mostaganem illustre parfaitement les avancées technologiques et les choix stratégiques opérés par l'Algérie pour faire face à ses besoins croissants en eau potable. Grâce à un processus rigoureusement structuré – allant du captage de l'eau de mer à sa reminéralisation après osmose inverse l'usine garantit une production continue, efficace et de haute qualité. La centralisation du système d'exploitation et le recours à des équipements de pointe assurent une gestion optimisée, avec une consommation énergétique maîtrisée.

Cette installation constitue ainsi un modèle en matière de dessalement, contribuant non seulement à la sécurité hydrique de la région, mais aussi à la préservation des ressources naturelles souterraines, en ligne avec les objectifs de développement durable fixés par les autorités algériennes.

**Chapitre IV : Étude de Performance de la
Station de Mostaganem**

IV.1 Introduction

La station de dessalement de Mostaganem utilise le procédé d'osmose inverse (OI) pour transformer l'eau de mer en eau potable. Cette Technologie repose sur le passage de l'eau salée à travers des membranes semi-perméables sous haute pression retenant ainsi les sels dissous et autres impuretés. Le système est conçu pour fournir une capacité de 200 000 m³/jour.

Dans le cadre de ce travail, ce qui nous intéresse est d'évaluer la performance de ce système afin de mieux appréhender son fonctionnement et son comportement en situation d'exploitation.

IV.2 Choix techniques, économiques, environnementaux

Pour faire face à la pénurie d'eau, la station de Mostaganem utilise la technologie d'osmose inverse. Ce choix technique est justifié par sa grande efficacité et sa fiabilité, ainsi que par la qualité de l'eau produite. Ce procédé est également moins énergivore que d'autres techniques de dessalement, ce qui le rend économiquement viable pour la production d'eau à grande échelle.

La construction et le fonctionnement de l'usine respectent strictement la législation en matière d'hygiène, de sécurité et d'environnement. Il n'y a pas de rejets atmosphériques polluants, et la conception des équipements tient compte des normes acoustiques pour minimiser les nuisances sonores.

L'emplacement de l'usine est idéal, facilitant tous les raccordements nécessaires : réseau électrique, assainissement, rejets, captage et réseau de distribution d'eau potable. Le management et la maintenance de l'usine sont assurés par l'UTE O&M MTM, garantissant une exploitation et une production optimales.

IV.3 Caractéristiques du Site de Référence

L'usine de dessalement de Mostaganem est conçue pour :

- Fournir un maximum de 200.000 m³/jour d'eau potable satisfaisant les exigences de qualité garanties pour une eau de mer caractérisée par les valeurs des paramètres physicochimiques correspondantes.
- Conditions du Site de Référence (CSR) indiqués dans le tableau ci-dessous (cinquième colonne du tableau).

Tableau IV-1: Les caractéristiques de cite de référence

Paramètre	Unité	minimum	maximum	CSR
Température	°C	14,000	30,000	24,000
Total des MTD	mg/L	35 000,000	39 040,000	37 000,000
Total des MES	mg/L	1,000	10,000	5,000
Pétrole et hydrocarbures	mg/L	0 ,000	0 ,100	0,001
Chlorure	mg/L	19198,000	22500,000	21001,000
Calcium	mg/L	340,000	450,000	345,000
Sodium	mg/L	10739,000	12800,000	11332,000
Sulfate	mg/L	2200,000	3130,000	2255,000
Strontium	mg/L	0,000	5,000	1,000
Barium	mg/L	0,000	0,300	0,100
Magnésium	mg/L	1333,000	1470,000	1466,000
Fe (+3)	mg/L	0,000	0,020	0,010
Manganèse	mg/L	0,000	0,020	0,010
Aluminium	mg/L	0,000	0,010	0,005
SiO ₂	mg/L	0,000	2,500	0,240
Potassium	mg/L	418,000	500,000	437,200
Bicarbonates	mg/L	100,000	180,000	159,900
Fluor	mg/L	0,000	1,600	1,000
Bore	mg/L	0,000	4,500	4,000

IV.4 Les analyses effectuées sur l'eau de mer et l'eau traitée

Tableau IV-2: Les résultats d'analyses de l'eau de mer

Paramètre	Unité	Eau de mer captage
T	°C	19
pH		8,16
MTD	g/L	39,72
Turbidité	NTU	6,05

Tableau IV-3: Les résultats d'analyses de l'eau traitée

Paramètre	Unité	Références OMS	Eau traitée
MTD	Ppm	150<MTD<500	233
Dureté totale	ppm CaCO ₃	65	65
pH		7,5 a 8,5	8,33
Température	°C		20
Conductivité	µS/cm		480
TAC	ppm CaCO ₃	50 à 65	60
Calcium	mg/L		21,2
LSI		0 à 0,4	0,02
Bore	Ppm	<1	0,91
Turbidité	NTU	<5	0,79
Chlore libre	Ppm	<5	0,28

IV.4.1 Commentaire sur les chiffres d'eau traitée

- ✓ **MTD (233ppm)** : la valeur est bien inférieure à la limite recommandée. Cela signifie que l'eau peu salée.
- ✓ **Dureté (65ppmCaCO₃)** : Ce chiffre est exactement celui recommandé par l'OMS.
- ✓ L'eau a le bon équilibre pour être agréable à boire et pour ne pas endommager les canalisations
- ✓ **Bore (0,91ppm)** : La valeur est inférieure à la limite de 1ppm. Cela montre que le traitement est très efficace pour éliminer les éléments chimiques potentiellement nocifs.
- ✓ **Turbidité(0,79)** : Ce chiffre est très bas. L'eau est claire et exempte les particules.
- ✓ **Chlore libre (0,28ppm)** : Le niveau est suffisant pour que l'eau reste saine dans les tuyaux, sans pour autant lui donner un gout ou une odeur désagréable.

IV.5 Quantité d'eau traitée par la station

Tableau IV-4: les débits des quantités par heure

Paramètres	Résultats
Q entrée (m³/h)	18518,5
Taux de conversion(%)	45
Q permeat (m³/h)	8333,33
Q saumure (m³/h)=Q entrée –Q permeat	10185,17

Tableau IV-5: Les débits des quantités journalières

	Paramètres	Résultats
Station de dessalement « MOSTAGANEM »	Q (m ³ /j) captage	444444
	Capacité (m ³ /j)	200000
	Y% produite	45 %
	Y% saumure	55 %
	Saumure (m ³ /j)	244444
	Saumure (m ³ /année)	87999840

IV.6 Captage d'eau de mer

S'effectue à un débit de 444444 m³/j via un seul point pour garantir une bonne qualité et simplifier les prétraitements.

- ✓ Hypochlorite de sodium : il est injecté pour empêcher le développement d'organismes biologiques.
- ✓ Permanganate de potassium : Ce produit sert à oxyder et éliminer la matière organique.
- ✓ Acide sulfurique : l'acide est ajouté pour réduire le pH et empêcher la formation de calcaire (carbonate dissous).
- ✓ Coagulant/floculant : Ces substances sont utilisées pour éliminer les matières colloïdales en suspension et ainsi éviter l'encrassement des membranes.
- ✓ Bisulfite de sodium : il est utilisé pour neutraliser l'hypochlorite de sodium résiduel, protégeant ainsi les membranes de la corrosion.

IV.7 Pompage de l'eau de mer

Le processus de désalinisation commence par le pompage de l'eau de mer, vers les premières étapes de purification.

IV.8 Filtration sur sable

L'eau passe d'abord par des filtres à sable et à anthracite pour éliminer les particules en suspension de 5 à 10 micromètres. Des filtres rotatifs complètent cette étape en capturant les impuretés restantes.

IV.8 Microfiltration

Le débit est réduit à 251840 m³/j pour cette étape finale de prétraitement. La microfiltration utilise des filtres à cartouche pour retirer les dernières substances organiques et colloïdales, protégeant ainsi les membranes de l'osmose inverse.

IV.9 Pompage à haute pression

Une pompe à haute pression alimente l'unité d'osmose inverse. Elle applique une pression d'environ 63 bar nécessaire pour forcer l'eau à travers les membranes et la purifier.

IV.10 Pompes Booster

Le rapport entre le débit du perméat et le débit d'alimentation donne le facteur de conversion ($Y=45\%$), on déduit donc que **55%** de l'eau de mer est rejetée représente le concentrât qui possède une énergie hydraulique très importante qu'il convient de récupérer par des pompes Booster afin de réduire la consommation en énergie électrique.

Le concentrât s'écoule ensuite vers un bac de saumure pour son évacuation.

IV.11 Reminéralisations

Cette étape vise à corriger le goût de l'eau et ajuster ses propriétés chimiques. Des produits comme le Ca(OH)_2 ou le CaCO_3 sont ajoutés. Cet ajout augmente le TAC et le pH ce qui rend l'eau moins corrosive et apte à la consommation.

IV.12 Désinfection et stockage

Une désinfection finale est effectuée en injectant de l'hypochlorite de sodium pour éliminer toute contamination microbienne. Du NaOH est également ajouté pour ajuster le pH, ce qui complète le traitement. L'eau est ensuite stockée, prête à être distribuée.

IV.13 Le procédé d'osmose inverse dans la station de Mostaganem

L'usine de dessalement de Mostaganem est organisée de manière modulaire, ce qui la rend plus fiable. Elle dispose d'un total de 16 châssis d'osmose inverse, qui sont les principaux modules de purification. Pour plus de sécurité, ces châssis sont repartis en deux lignes de production distincte : une ligne nord et une ligne sud. Chaque ligne contient 4 unités, soit 8chassis au total. Cette structure permet à l'usine de continuer à fonctionner, même en cas de maintenance ou de panne.

IV.13.1 Châssis d'osmose inverse

Un châssis d'OI contient 152 tubes de pression. Chaque tube est équipé de 7 membranes disposées en série. Les membranes proposées sont de surface élevée de la marque « LG-440-R-L » fabriquées en polyamide et sa configuration est spirale.

Les caractéristiques de ces membranes sont les suivantes:

Tableau IV-6: Les caractéristiques de la membrane

Fabricant de la membrane	LG Chem
Surface active	41 m ²
Capacité initiale	37,5 m ³ /j
Rejets des sels (%)	99,7
Pression Maximale	82,7
Température maximale d'opération	45 ⁰ C
pH de l'opération	2-11
Perte de charge maximale (ΔP)	1,0 bar
Diamètre	200 mm
Longueur	1016 mm

IV.13.1.1L'efficacité de la membrane

- **Calcul de la perméabilité :**

$$A = \frac{J_p}{(\Delta P - \Delta \pi)} \dots\dots\dots \text{IV-1}$$

Où :

- ✓ Aest la perméabilité de la membrane
- ✓ J_pest le flux de permeat
- ✓ ΔPest la pression motrice
- ✓ ΔP = Pression appliquée – perte de charge
- ✓ La pression appliquée est egale à **63 bar**
- ✓ On prend une perte de charge égale à **1 bar**
- ✓ Δπ est la différence de pression osmotique égale à 26 bar
- ✓ **Pression nette (effective)= ΔP–Δπ**
- ✓ **Pression nette =62 –26**
- ✓ **Pression nette = 36 bar**

- **Calcul de flux de permeat (J_p) :**

$$J_p = \frac{Q_p}{S} \dots\dots\dots \text{IV-2}$$

Avec :

- ✓ Q_p est le debit de permeat
- ✓ S est la surface de la membrane

Application numérique :

$$J_p = \frac{37,5 \frac{m^3}{j}}{41 m^2}$$

$$J_p = 0,915 \text{ m/j}$$

Donc :

$$A = \frac{J_p}{\text{pressionnette}}$$

$$A = \frac{0,915 \text{ m/j}}{36 \text{ bar}}$$

$$A = 0,0254$$

$$A \approx 0,025 \text{ m/j.bar}$$

Conversion:

$$0,025 \text{ m/j.bar} \times \frac{1000L}{1m^3} \times \frac{1j}{24h}$$

Donc:

$$A = 1,04 \text{ L/h.m}^2 \cdot \text{bar}$$

▪ **Commentaire :**

La perméabilité de la membrane est de **1,04 L/h.m².bar**. Cette valeur indique que la membrane est très efficace pour laisser passer l'eau

Rejet de sels : un taux de rejet supérieur à **99%** ; un chiffre qui garantit une eau purifiée de haute qualité.

IV.14 La consommation spécifique d'énergie

On définit la consommation spécifique d'énergie par l'énergie nécessaire à la production d'un mètre cube de permeat avec une salinité souhaitable. Dans un procédé d'osmose inverse sans installation du système de récupération d'énergie, la sélection de la pompe à haute pression est importante.

IV.14.1OI sans système de récupération d'énergie

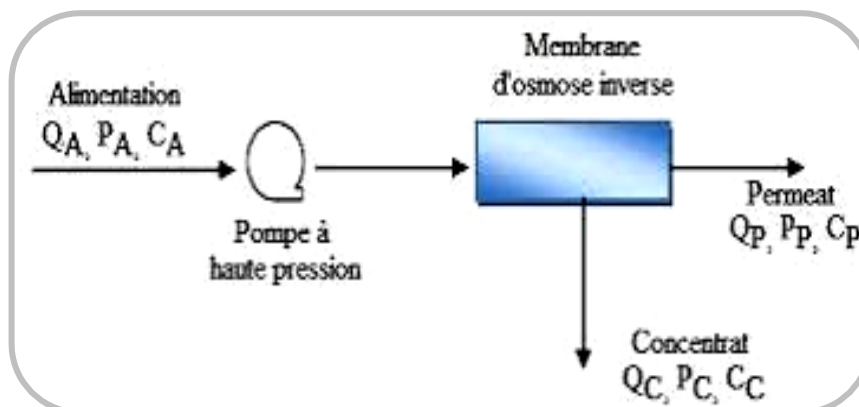


Figure IV-1: Schéma d'osmose inverse sans récupération d'énergie

La consommation spécifique d'énergie est définie sous la forme suivante :

$$cse = \frac{W_{\text{pump}}^{\circ}}{36.6 \times \eta_p \times Q_p} \dots \dots \dots \text{IV-3}$$

Le travail de la pompe à haute pression est donné par la relation suivante W_{pump}°

$$W_{\text{pump}}^{\circ} = P_A \times Q_A \dots \dots \dots \text{IV-4}$$

-Le rapport entre le débit du permeat et le débit d'alimentation est le taux de conversion est donné sous la formule suivante:

$$Y = \frac{Q_P}{Q_A} \dots \dots \dots \text{IV-5}$$

La consommation spécifique d'énergie est calculée à partir de l'équation de travail de la pompe à haute pression W_{pump}° et l'équation de taux de conversion Y :

$$cse = \frac{P_A}{36.6 \times \eta_p \times Y} \dots \dots \dots \text{IV-6}$$

Avec :

$P_A = 63 \text{ bar}$

$\eta_{\text{pump}} = 60\%$

$Y = 45\%$

Application numérique

$$cse = \frac{63}{36.6 \times 0.6 \times 0.45} = 6.375 \text{ kWh/m}^3$$

• **Commentaire :**

Dans cette configuration, l'énergie spécifique est élevée car l'énergie contenue dans la saumure à haute pression est gaspillée lors de son rejet. Cette perte d'énergie représente un surcoût significatif et un gaspillage qui nuit à la performance globale de l'usine.

IV.14.2OI avec système de récupération d'énergie

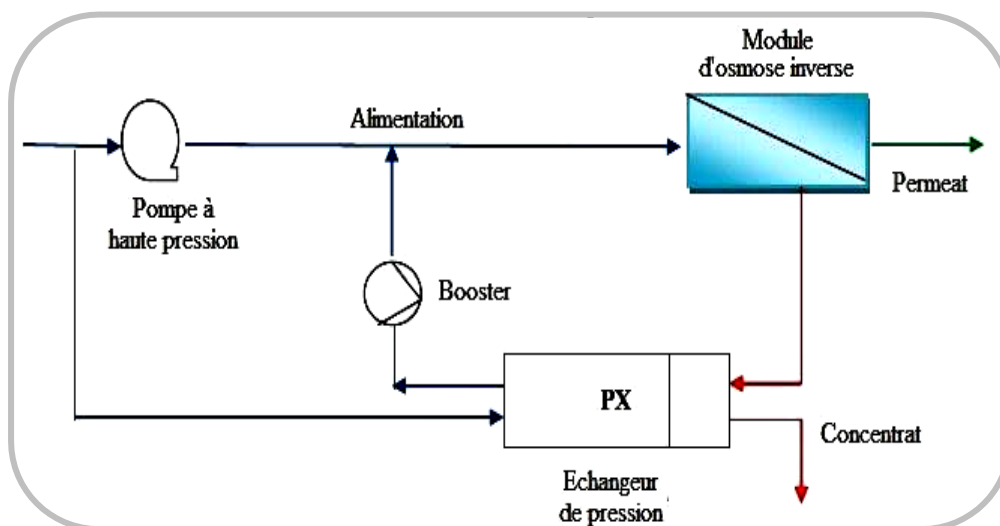


Figure IV-2: Schéma d'osmose inverse avec récupération d'énergie.

-On applique l'équation :

$$cse_{ep}(y, p, \eta_{Pomp}, \eta_E) = \frac{P_A(1-\eta_E(1-Y))}{36.6 \times \eta_{pump} \times Y} \dots\dots\dots \text{IV-7}$$

Avec :

- ✓ **P_A** : Pression d'alimentation ;
- ✓ **Y** : Taux de conversion de la membrane ;
- ✓ **Q_A** : Débit d'alimentation de l'eau de mer ;
- ✓ **Q_P** : Débit de permeat ;
- ✓ **Q_R** : Débit de retentat ;
- ✓ **η_E**: Efficacité de la pompe d'échangeur de pression
- ✓ **η_{pump}**: Efficacité de la pompe à haute pression

Application numérique :

- ✓ **P**=63 bar
- ✓ **Y**=45 %
- ✓ **Q_A** = 18518.5m³/h
- ✓ **Q_P** = 8333.33m³/h
- ✓ **Q_R**= 10185.17m³/h
- ✓ **η_E** = 90%
- ✓ **η_{pump}**= 60%

$$cseep(y, p, \eta_{pomp}, \eta_E) = \frac{63 \times [1 - 0.9(1 - 0.45)]}{36.6 \times 0.6 \times 0.45} = 3.22 \text{ kWh/m}^3$$

• **Commentaire :**

L'ajout d'un système de récupération d'énergie permet une réduction drastique de la consommation d'énergie spécifique. En réutilisant l'énergie de la saumure, l'usine réalise une économie financière considérable sur ses coûts d'exploitation, ce qui la rend plus durable et compétitive

Conclusion générale

Conclusion générale

En Algérie, le dessalement par osmose inverse, tel qu'illustré par la station de Mostaganem, est devenu une source d'eau vitale et un pilier de la sécurité hydrique face au manque de ressources naturelles. Grâce à l'utilisation de technologies avancées comme les membranes nano LG et les échangeurs de pression, la station de Mostaganem est considérée comme un modèle d'application réussi qui a démontré sa capacité à optimiser le processus et à répondre aux besoins en eau à grande échelle.

Cependant, malgré ses performances techniques, le dessalement pose des défis majeurs en matière de consommation énergétique et d'impact environnemental. Le processus reste très gourmand en énergie, et la gestion de la saumure reste un point crucial pour la préservation des écosystèmes marins.

Recommandations

Pour un avenir durable, nous recommandons de :

- Développer la législation pour encadrer strictement le rejet de la saumure.
- Privilégier les énergies renouvelables (comme l'énergie solaire) pour alimenter les usines et réduire les coûts et la pollution.
- Prendre des mesures de dilution de la saumure avant son rejet pour préserver les écosystèmes marins.
- Optimiser l'utilisation de l'eau pour que le dessalement soit une solution complémentaire et non la seule réponse au problème.

En somme, le dessalement est un pilier de la sécurité hydrique en Algérie. Cependant, pour qu'il soit durable, il doit s'inscrire dans une stratégie nationale qui allie innovation technologique, respect de l'environnement et gestion intégrée de toutes les ressources en eau.

Les références bibliographiques

- [1]BOYE, H. (2008). Eau, énergie, dessalement et changement climatique en méditerranée. Plan bleu, France.
- [2]LATTEMANN, S. (2010). Development of an environmental impact assessment and decision support system for seawater desalination plants, Phd Thesis in Delft, The Netherlands.
- [3]AMITOUCHE, M. (2016). Impacts des rejets des stations de dessalement sur le milieu receveur. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra. 175p.
- [4]CHENAOU, B. (2010). Dessalement de l'eau de mer à la station de MAINIS et son impact sur l'environnement". Séminaires 2010. Université Hassiba Benbouali Chlef. Algérie.
- [5]MANDRI, Y. (2011). Etude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide, *Thèse de doctorat*. Université Claude Bernard Lyon.
- [6]MOZAS, M et GHOSN, A. (2013). État des lieux du secteur de l'eau en Algérie. Etude et analyses.
- [7]ZOUINI D. (2009). Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse : une solution pour l'alimentation en eau des villes côtières d'Algérie.
- [8]DUNGLAS, J. (2014). Le dessalement de l'eau de mer, une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau. Groupe eau, Académie d'agriculture de France.
- [9]ATTALAH, A. (2014). Procède de dessalement et qualité physico-chimique de l'eau dessalement par la station de dessalement de l'eau de mer de Honaina, mémoire de master, en Biologie option Alimentation et Nutrition, université Abou BekrBelkaid Tlemcen,
- [10] Maurel, A. (2006). Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, 2 ème édition, TEC&doc. 286p.
- [11]CHERBOURG, N. (2012). PDF, Dessalement eau de mer, « Dossier thématique-La Cité de la Mer-Technopole.
- [12]RENAUDIN, V. (2003). Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, CNRS, Nancy

[13]SEBKI, M et AISSAOUI, I. (2016). Etude paramétrique pour le dimensionnement du diffuseur de saumure de la méga station de dessalement de Magtâa ; mémoire fin d'étude Ecole Nationale Polytechnique.

[14]Dossier thématique, (2012). La Cité de la Mer .Technopole Cherbourg Normandie

[15]FATHALLI, B. (2011). Influence des paramètres opératoires sur les performances d'un système de dessalement par osmose inverse» ; Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis.

[16]FAUST, S & Aly. (1998). Chemistry of Water Treatment, 2nd ed., CRC Press.

[17] Le dessalement est-il une solution de l'avenir ?, « comparatif des techniques », page consultée le 22 mars 2016.

[18]SCHIPPER, J. (2000). « Environmental impact from desalination plants –Pollution of the sea ».WHO cours, Desalination

[19]WADE ET FLETCHER. (1995). Energy allocation and other factors in the enhancing water cost in desalination and dual purpose power /waterplants of IDA World Congress, Abu Dhabi.

[20]ZIMMERMAN, R. (1999). The Larnaca seawater desalination plant. Environmental impact Assessment Report.

[21] ALFA ARZATE, PH, D. (2008). « Procédés de séparation membrane et leur application dans l'industrie alimentaire ». 142, Rang Lainesse Saint-Norbert d'Arthabaska Québec.

[22]ETTORI, A. (2011). « Vieillissement chimique de membranes d'osmose inverse ». Thèse en vue de l'obtention du DOCTORAT université de Toulouse III - Paul Sabatier FRANCE.

[23]Mr SAOUDI, A. (2010). « L'influence de la filtration sur sable sur la qualité des eaux potable ». Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en Hydraulique, université AboubakrBelkaid, Tlemcen.

[24]SALAH, B. (2014).« l'influence de la force ionique sur le dessalement des eaux faiblement saumâtres ». Département d'Hydraulique, Tlemcen, 171p.

[25] GENERAL. (2019). STEP documents: tech_Assessment for zero discharge technology assessment disponible sur:

https://www.mass.gov/envir/STEP/documents/techassessments/Zero_Discharge_Tech_Assessment.pdf.

[26]DEGAA, A et AL. (2019). Etude de déminéralisation des eaux souterraines par osmose inverse dans le sud est Algérien. Cas de la station d'EI Meghaier.

[27]MAZARI, L. (2019). Traitements physico-chimiques associés aux techniques membranaires d'une eau usée urbaine.

[28]MULDER, M. (1996). Basic Principles of Membrane Technology;2nd ed, Springer Science & Business Media.

[29]F. F. Ahmad, M. O. M. SHAFAWI, et AL. (2022), "Ceramic membranes for wastewater treatment: A review of recent developments and future prospects," Journal of Water Process Engineering, vol. 47, pp. 102681.

[30]MELLAL, N.H. (2011). Contribution à l'étude d'une station de dessalement par osmose inverse.Ecole nationale superieur agronomique, El Harrach.

[31]EI-DESSOUKY, H. T., &ETTOUNEY, H. M. (2002). Fundamentals of Salt Water Desalination. Elsevier.

[32]ALMUDENA,A. (2011). MANUEL D'exploitation et d'entretien. « Usine de dessalement de Mostaganem »

[33]ATALLAH, A. (2014). Procédé de dessalement et qualité physico-chimique de l'eau dessalée par la station de dessalement de l'eau de mer, Mémoire de Master en Biologie, Université de, Tlemcen.

[34]AMMOUR, L. (2015). « Mémoire Station de dessalement Mostaganem ». Université Abd el Hamid Ibn Badis, Mostaganem.