REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté *des Sciences et de la technologie*

Département de Génie de l'Environnement

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : **Génie des Procédés**

Spécialité : Gestion des changements environnementaux en Méditerranée

Par

- **KERIOUDJ Nada**
- **MESSAOUDENE Khouloud**

Intitulé

Efficacité du dessalement de l'eau de mer par osmose inverse

Soutenu le : 30/06/2025

Devant le Jury composé de :

Nom & Prénom	*Grade*	*Qualité*	*Etablissement*
Mr. Houssam Eddine KARCE	*MCA*	*Président*	*Univ-Mohamed El Bachir El Ibrahimi BBA*
Mr. Abdelhak HELLATI	*Prof*	*Encadreur*	*Univ-Mohamed El Bachir El Ibrahimi BBA*
Mr. Riad AYECHE	*Prof*	*Examinateur*	*Univ-Mohamed El Bachir El Ibrahimi BBA*
Mr. Aymen BENHAOUA	*Ing*	*Invité*	*GCB-DWT Station de dessalement Corso*

Année Universitaire 2024/2025

Remerciements

Avant tout, nous tenons à adresser nos remerciements les plus sincères à Monsieur Abdelhak Hellati, pour son encadrement bienveillant, sa patience, ses conseils éclairés, et surtout pour la confiance qu'il nous a accordée tout au long de ce travail. Son accompagnement constant et ses remarques pertinentes ont grandement enrichi cette expérience et nous ont permis d'avancer avec rigueur et clarté.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants et intervenants rencontrés au cours de notre cursus pour la qualité de leur enseignement, leur disponibilité et leur engagement. Leurs apports ont été essentiels dans la construction de notre parcours académique.

Nos remerciements vont également au personnel de la station de dessalement de Corso, pour nous avoir offert un cadre favorable à l'accomplissement de cette étude. Nous tenons à remercier chaleureusement Ziad, Islam, Sarah, Aymen et Jazia, pour leur accueil, leur disponibilité, ainsi que pour le partage de leur savoir-faire et leur assistance précieuse durant la période de stage.

Nous exprimons aussi notre profonde reconnaissance à toute l'équipe de l'entreprise ***GCB,*** *en particulier les agents du département de l'exploitation, qui nous ont accueillis chaleureusement lors de notre premier stage. Grâce à leur encadrement, leurs explications claires et leur accompagnement généreux, nous avons pu définir avec justesse les objectifs de notre mémoire. Cette première immersion professionnelle a grandement facilité notre intégration et notre compréhension lors du stage suivant à la station de dessalement de Corso.*

Enfin, merci à toutes et à tous, pour votre soutien, votre écoute, et votre présence, qui ont fait toute la différence.

Dédicace :

À celui qui m'a dit un jour que je suis la prunelle de ses yeux, et qui voyait dans mon plus simple succès la plus grande réalisation, à l'homme qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui car il est mon Père, celui dans les yeux duquel je vois la fierté de moi, mon model de respect et d'amour d'un père, de la compréhension et de la générosité. Grace à toi j'ai appris à être la fille qui ne cesse pas de faire tout pour te rendre heureux et fier.

À celle dont ses paroles m'accompagnent depuis que j'étais petite, la première Femme Forte, courageuse qui a souffert sans nous laisser souffrir, celle qui m'a appris à être une fille forte et qui cherche toujours à achever ses objectifs à tout prix ; celle qui m'a encouragé à poursuivre mes rêves même les obstacles semblaient insurmontables. Mon ange gardien ton amour et ta présence dans ma vie et le fait d'être ma Mère continueront d'éclairer mon chemin.

À mes chers témoins des étapes de ma vie, dans mon succès, joie, tristesse, mes chers sœur Basma et Mon frère Badriddine je n'oublierai jamais vos encouragements permanents et soutiens morals, votre présence dans mon cœur est un trésor précieux.

À mon Binôme Nada merci d'être la meilleure version de toi-même, ta contribution a été essentielle à cette réussite.

Ma profonde gratitude va à mon encadrant, Monsieur Abdelhak Hellati,
en qui j'ai eu une entière confiance tout au long de l'élaboration de ce mémoire

À toutes mes amies que j'ai rencontré tout au long mon cursus universitaire et ceux que passées par vous êtes les meilleurs.

MESSOUDENE Khouloud

Dédicace

À ma fierté, mon pèr Saad , que je considère comme ma force et ma stabilité,

À celui qui a été mon modèle et mon exemple dans le travail,

À l'homme qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui,

Je te dédie les fruits de cette réussite.

À celle dont les paroles m'ont accompagnée depuis mon enfance,

Celle qui m'a encouragée à poursuivre mes rêves, même lorsque les obstacles semblaient insurmontables,

Ton amour Nabila, ta présence dans ma vie et le fait que tu sois ma mère, seront toujours la lumière qui éclaire mon chemin.

À mes amis, dont la compagnie m'a été accordée durant mes années universitaires,

Vous avez été une compagnie précieuse et un soutien sincère dans mon parcours,

Et plus particulièrement à Khouloud, qui a choisi de partager cette aventure avec moi,

Je vous adresse toute ma gratitude et mon estime.

Je dédie également mes sincères remerciements à mes chers enseignants,

Qui ne m'ont jamais refusé leur savoir ni leur accompagnement,

Et cela jusqu'à la dernière année de mes études.

Ma profonde gratitude va à mon encadrant, Monsieur Abdelhak Hellati,

en qui j'ai eu une entière confiance tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Il a su m'accompagner dans chacune de mes idées et à chaque étape de ce travail,

et fut un guide précieux et présent tout au long de ce parcours

Aujourd'hui, j'atteins la fin d'un parcours universitaire qui m'a coûté beaucoup,

Mais qui en valait chaque effort.

Et je témoigne que cet accomplissement est d'abord grâce à Dieu,

Puis grâce à mon travail acharné et ma foi en moi-même.

Je me prépare désormais à une autre étape, une nouvelle rencontre peut-être.

D'ici là, je continuerai de chérir mes plus simples réussites,

Et je les prendrai comme moteur pour aller encore plus loin,

Vers des horizons que je n'aurais jamais imaginé atteindre un jour.

KERIOUDJ Nada

Résume :

Dans sa recherche d'autosuffisance, l'Algérie a mis en place une stratégie majeure axée sur le dessalement et le traitement de l'eau de mer. L'objectif principal est de fournir de l'eau potable aux wilayas côtières pour satisfaire leurs besoins hydriques.

Le processus de dessalement de l'eau de mer est complexe et multi-étages, et il est strictement encadré par des lois et des normes rigoureuses afin d'assurer la qualité de l'eau avant sa distribution aux consommateurs.

Des stations de dessalement ont été établies le long du littoral algérien, respectant les standards internationaux. Le suivi de chaque phase du processus est routinier, et le personnel des stations s'assure du bon déroulement de l'ensemble des opérations de production.

Ce mémoire présente un stage effectué dans une station de dessalement à Corso (wilaya de Boumerdès). Durant ce stage, les principales analyses de contrôle réalisées en laboratoire ont été suivies et comparées aux normes officielles du Ministère de l'Environnement.

De plus, ce travail expliquera pourquoi l'Algérie a majoritairement choisi la technologie de l'osmose inverse pour ses stations de dessalement

Mots-clés : Osmose inverse – Stations de dessalement – Étapes de traitement – Laboratoire d'analyses

Abstract:

As part of its drive for self-sufficiency, Algeria has implemented a major strategy centered on seawater desalination and treatment. The primary goal is to provide safe drinking water to coastal wilayas to meet their water needs.

The seawater desalination process is complex and multi-stage, strictly governed by rigorous laws and standards to ensure water quality before distribution to consumers.

Desalination plants have been established along the Algerian coast, adhering to international standards. Each phase of the process is routinely monitored, and plant personnel ensure the smooth operation of all production activities.

This thesis presents an internship carried out at a desalination plant in Corso (Boumerdès wilaya). During this internship, key control analyses performed in the laboratory were monitored and compared against official standards from the Ministry of Environment.

Furthermore, this work will explain why Algeria has predominantly chosen reverse osmosis technology for its desalination plants.

Keywords: Reverse osmosis – Desalination plants – Treatment stages – Analysis laboratory

ملخص:

تركز الجزائر، ضمن سعيها لتحقيق الاكتفاء الذاتي، على مشروع تحلية ومعالجة مياه البحر لتأمين مياه الشرب للولايات الساحلية. هذه العملية تتم عبر مراحل متعددة ومعقدة، وتخضع لقوانين ومعايير صارمة لضمان جودة المياه قبل وصولها للمستهلك.

تم إنشاء محطات التحلية على طول الساحل الجزائري وفقًا للمعايير الدولية، مع متابعة روتينية لكل مراحل الإنتاج لضمان سير العمليات بفعالية.

يتناول هذا الملخص أيضًا فترة تربص في إحدى محطات تحلية المياه بقورصو (ولاية بومرداس)، حيث تم رصد ومتابعة أهم التحاليل الروتينية المخبرية، ومقارنتها بالمعايير الرسمية الصادرة عن وزارة البيئة. كما سيوضح الأسباب التي جعلت الجزائر تختار تقنية لتناضح العكسي كخيار أساسي في غالبية محطاتها لتحلية مياه البحر.

الكلمات المفتاحية: مرشحات التناضح العكسي -محطات التحلية -مراحل المعالجة -مخبر التحلية

Table des matières

Remerciements 2
Dédicace : 3
Dédicace 4
Résume : 5
Table des matières 6
Liste de figures 10
liste de tableau 12
Nomenclatures 13
Introduction générale : 1
Introduction : 2
I-1-Historique des stations de dessalement en Algérie : 2
I-2-Définition des stations de dessalement : 3
Ⅰ-3-Schéma de principe des stations de dessalement: 4
I-3-1-Le prétraitement : 4
I-3-2-Traitement : 4
I-3-3-Le post-traitement : 5
I-4-Les propriétés de l'eau de mer de méditerranée : 6
I-5-Caractéristiques des eaux marines et saumâtres : 7
I-5-1-Les eaux marines : 7
I-5-2-Les eaux saumâtres : 7
I-6-Les stations de dessalement en Algérie : 8
Conclusion : 11
Chapitre Ⅱ : 12
Introduction : 10
II-1-Les principales technologies de dessalement des eaux : 10
II-2-Classification des procédés de Dessalement : 11
II-3- Procédés par distillation : 12
II-3-1-Distillation « Multi stages Flash » ou (MSF) : 12
II-3-1-1-Principe de Fonctionnement : 12
II-3-1-2-Principaux avantages : 13
II-3-1-3-Principaux Inconvénients : 13
II-3-2-Distillation par compression de vapeur : 13
II-3-2-1-Principe de fonctionnement : 13
Ⅱ-3-2-2-Principaux avantages: 15
Ⅱ-3-2-3-Principaux Inconvénients: 15

Ⅱ-3-3-Distillation Multi-Effets (MED): 15
Ⅱ-3-3-1-Principe de Fonctionnement: 15
II-3-3-2-Principaux avantages : 16
II-3-3-3-Principaux Inconvénients : 17
II-4- Procédés membranaires : 17
II-4-1-Electrodialyse : 17
II-4-1-1-Principe de fonctionnement : 17
II-4-1-2-Principaux Avantages : 18
II-4-1-3-Principaux Inconvénients : 18
II-4-2-Distillation membranaire : 19
II-4-2-1-Principe de fonctionnement : 19
II-4-2-3-Principaux Inconvénients : 20
II-4-3-2-Principaux avantages : 21
II-4-3-3-Principaux Inconvénients : 21
II-5-Comparaison des méthodes: 22
II-6-L'impact de dessalement de eaux de mer sur l'environnement : 23
a) Impact Négatifs : 23
b) Impact Positifs : 23
Conclusion : 24
Chapitre Ⅲ : 25
Introduction : 24
Ⅲ-1-Qu'est-ce que l'osmose inverse ? : 24
Pression osmotique : 24
III -2- Paramètres de fonctionnement d'une osmose inverse : 25
III-3-Diffèrence entre l'osmose et osmose inverse : 25
III-4-Pression osmotique: 26
III-5-Membranes d'osmose inverse : 27
III-5-1-Materiel et Conditions Expérimentales Utilises: 27
III-7-1-Les modules tubulaires : 28
III-7-2-Les modules fibres creuses : 28
III-7-3-Les modules plans : 29
III-7-4-Les modules spirales : 30
III-9-Nettoyage en Place (NEP) de Système d'Osmose Inverse (OI) : 30
III-9-1-Composants Principaux du Système NEP : 30
III-9-2-Procédure de Nettoyage : 31
Conclusion : 32

Chapitre IV : 34
IV-1-Présentation de la station de CORSO : 33
IV-2-Localisation géographique de la station : 34
IV-4-Les étapes de dessalement des eaux de mer : 35
IV-5-Le prétraitement : 36
IV-5-1-Captage de l'eau de mer : 36
IV-5-2-Traitement physique : 36
IV-5-3-Traitement chimique : 37
IV-6-Système d'osmose inverse : 40
IV-6-1-Récupération d'énergie : 41
IV-7-Post traitement : 41
IV-7-1- Reminéralisation : 41
IV-7-2-Désinfection : 42
IV-8-Les analyses physico-chimiques dans la station : 42
a) Ph : 42
b) Conductivité : 43
c) Turbidité : 43
d) Test la dureté totale : 44
e) Dureté calcique : 44
f) Alcalinité TA+TAC : 45
g) Comparateur colorimétrique : Test colorimétrique du chlore libre (par DPD) : 46
h) Test de L'indice de saturation de Langelier (LSI) : 46
i) Test TDS: 47
j) Test MES : 47
IV-9-La norme algérienne de l'eau potable : 48
IV-10-Résultats et discussion : 49
IV-10-1-La température : 49
IV-9-2-La turbidité : 50
IV-9-3-Conductivité : 51
IV-9-4- Solides Totaux Dissous (TDS) : 51
IV-9-5-Matière on suspension (MES) : 52
IV-9-6-Dureté totale TH : 53
IV-9-7-Alcalinité : 54
IV-9-8-L'indice de saturation de Langelier (LSI) : 55
Conclusion : 56
Conclusion générale : 58

Référence bibliographique : 59

Liste de figures

Figure 1 : Schéma de principe des stations de dessalement…….. 4
Figure 2 : Classification des procédés de Dessalement …… 11
Figure 3 : Principe de distillation Multi stage flash ……. 13
Figure 4 : Photo réel de distillation MSF…….. 13
Figure 5 : principe de distillation par compression de vapeur…….. 14
Figure 6 : Photo réel de distillation par compression de vapeur…… 14
Figure 7 : principe de distillation Multi-Effets MED…… 15
Figure 8 : Photo réel de distillation Multi-Effets MED……. 16
Figure 9 : Principe de distillation Electrodialyse…….. 17
Figure 10 : Défirent type de distillation membranaire…… 19
Figure 11 : Principe de distillation membranaire……. 19
Figure 12 : Photo réel d'osmose inverse…….. 20
Figure 13 : principe d'osmose inverse…….. 20
Figure 14 : Différence entre osmose et osmose inverse…… 26
Figure 15 : Pression osmotique……..... 27
Figure 16 : les couches de Membranes d'osmose inverse……. 27
Figure 17 : membrane d'osmose inverse…….. 27
Figure 18 : Les modules tubulaires……... 28
Figure 19 : Les modules fibres creuses……. 29
Figure 20 : Les modules plans…….. 29
Figure 21 : Les modules spirales…….. 30
Figure 22 : Nettoyage en Place (NEP) de Système d'Osmose Inverse (OI)…… 31
Figure 23: station de dessalement de l'eau de mer corso…….. 34
Figure 24 : localisation de station de dessalement de l'eau de mer corso…….. 34
Figure 25 : Logos des entreprises contribuant à la construction de la station Corso (GCB-AEC-Metito)……... 35
Figure 26 : schéma générale dessalement de l'eau de mer……..…….. 35
Figure 27 : schéma de captage des eaux de mer…… 36
Figure 28 : dégrillage……... 36
Figure 29 : tamiseur……..... 37
Figure 30 : bâche de coagulation……..... 38
Figure 31 : bâche de floculation……..……..... 38

Figure 32 : filtre à sable…….……... 39
Figure 33 : filtre à cartouche……. 39
Figure 34 : les racks de membrane…… 40
Figure 35 : les pompes PX…… 41
Figure 36 : pH mètre……. 42
Figure 37 : conductivité mètre……..... 43
Figure 38 : turbidimètre……..... 43
Figure 39 : schéma de la dureté totale avant étalonnage…….. 44
Figure 40 : schéma de la dureté totale après étalonnage…… 44
Figure 41 : schéma de la dureté calcique avant étalonnage……... 45
Figure 42 : schéma de la dureté calcique après étalonnage……... 45
Figure 43 : schéma de la TA après étalonnage…….. 45
Figure 44 : schéma de la TAC avant étalonnage…… 46
Figure 45 : schéma de la TAC après étalonnage……... 46
Figure 46 : colorimétrique…….……... 46
Figure 47 : diagramme de température…… 49
Figure 48 : diagramme de conductivité…… 51
Figure 49 : diagramme de TDS……..…… 52
Figure 50: diagramme de MES…… 53
Figure 51 : diagramme de dureté totale…… 54
Figure 52: diagramme d'alcalinité…….……... 55
Figure 53 : diagramme de LSI..……... 56

liste de tableau

Tableau 1:station de dessalement en Algérie 10
Tableau 2:caractiristique des différents procédés de dessalement 23
Tableau 3:les valeur de turbidité 48
Tableau 4: les normes algériennes de l'eau potable 50

Nomenclatures

SDEM : Station De Dessalement D'eau De Mer

AEC : Algerian Energy Company

GCB : Génie Civil Et Bâtiment

ADE : Algérienne Des Eaux

PH : Potentiel Hydrogène

MSF: Multi Stages Flash

MED: Multiples Effets

MCV : Compression De Vapeur

DM : Distillation Membranaire

OI : Osmose Inverse

MF : Microfiltration

UF : Ultrafiltration

NF : Nanofiltration

HP : Haute Pression

OIEM : Osmose Inverse D'eau De Mer

SWRO : Sea Water Reserve Osmosis

MES : Matières En Suspension

PPM : Particules Par Million

SDI : Selt Density Index (L'indice De Densité De Sédiments)

NTU : Nephelometric Turbidity Unit (Unité Néphélométrique De Turbidité)

TDS : Solides Dissous Totaux

CIP : Clean In Place

NEP : Nettoyage En Place

SMBS : Sodium Metabisulfite

Introduction générale :

Dans un contexte mondial marqué par la rareté croissante des ressources en eau douce, la recherche de solutions alternatives devient une nécessité stratégique. L'Algérie, confrontée à un climat aride et à une demande croissante en eau potable, surtout dans les régions côtières à forte densité de population, a opté pour le dessalement de l'eau de mer comme l'une de ses principales stratégies de sécurisation de l'approvisionnement en eau.

Le développement de stations de dessalement sur le littoral algérien s'inscrit dans une politique nationale visant à renforcer l'autosuffisance hydrique. Ces installations complexes permettent de transformer l'eau de mer en eau potable grâce à des procédés de plus en plus performants, respectant des normes strictes de qualité imposées par les autorités compétentes.

La station de dessalement de Corso, située dans la wilaya de Boumerdès, constitue un exemple concret de cette dynamique. Un stage a été effectué au sein de cette station, dans le but de suivre les analyses physico-chimiques routinières effectuées avant et après chaque étape du traitement, et de les comparer aux normes de potabilité définies par la réglementation algérienne (Journal Officiel).

À travers cette étude, nous visons à mieux comprendre les enjeux technologiques, environnementaux et analytiques liés à la production d'eau potable à partir de l'eau de mer.

Ce mémoire est structuré en quatre parties principales :

* Le premier chapitre présente un aperçu général du contexte hydrique en Algérie et l'intérêt stratégique du dessalement.

* Le deuxième chapitre est consacré aux différentes techniques de dessalement existantes à l'échelle mondiale et nationale.

* Le troisième chapitre traite en profondeur de la technologie des membranes d'osmose inverse, largement utilisée en Algérie.

* Enfin, le quatrième chapitre est dédié à l'étude de la station de Corso, avec un accent particulier sur les analyses effectuées, la gestion des déchets issus du processus (eau saumâtre, cartouches usées…), l'impact environnemental de l'unité, ainsi que les méthodes de gestion des incidents techniques.

Chapitre I :

Généralités sur les stations de dessalement

Introduction :

La gestion des ressources hydriques constitue un enjeu majeur pour l'Algérie, un pays méditerranéen confronté à des défis environnementaux et démographiques croissants. La concentration urbaine sur le littoral, les disparités territoriales, les périodes de sécheresse récurrentes et l'intensification de la pollution fragilisent l'équilibre déjà précaire de l'approvisionnement en eau. Face à cette situation, le dessalement de l'eau de mer s'est imposé comme une solution stratégique, permettant de pallier la pénurie d'eau potable, en particulier dans les régions septentrionales où réside la majorité de la population. Ce choix s'est traduit par un essor sans précédent dans la réalisation de stations de dessalement, portant leur nombre à 19 et augmentant la capacité de production nationale de 2,2 à 3,7 millions de mètres cubes par jour, couvrant ainsi 42 % de la demande nationale en eau potable. Le dessalement, ou désalinisation, est un processus complexe qui consiste à séparer les sels de l'eau brute, qu'il s'agisse d'eau de mer ou d'eau saumâtre. L'eau de mer, avec une salinité moyenne de 35 g/L, nécessite un prétraitement rigoureux pour éliminer les matières en suspension et les organismes vivants, suivi d'un traitement membranaire ou thermique pour extraire les sels. Enfin, un post-traitement est indispensable pour rendre l'eau potable, en corrigeant sa corrosivité et en assurant une désinfection finale. Ce document explore en détail l'historique, la définition et le fonctionnement des stations de dessalement en Algérie, en mettant l'accent sur les spécificités des eaux marines et saumâtres de la région. Il examine également les propriétés de l'eau de mer méditerranéenne, dont la composition chimique complexe influence les processus de dessalement. Enfin, il présente un état des lieux des stations de dessalement en Algérie, en soulignant les défis et les perspectives de cette technologie cruciale pour la sécurité hydrique du pays. À travers cette analyse, nous souhaitons apporter une contribution éclairée à la compréhension des enjeux liés au dessalement de l'eau de mer en Algérie, et à son rôle dans la gestion durable des ressources hydriques.

I-1-Historique des stations de dessalement en Algérie :

L’Algérie a commencé à s’intéresser au dessalement de l’eau de mer dès les années 1960, principalement pour des usages industriels, notamment dans les complexes pétrochimiques à Arzew et Skikda. La première station thermique a été mise en service à Arzew en 1964. Ce n’est qu’à partir des années 2000 que le pays a réellement lancé un programme national de dessalement à grande échelle, en réponse aux problèmes chroniques de pénurie d’eau et de sécheresse. Ce programme a permis la mise en service progressive de plusieurs stations de

grande capacité, utilisant principalement la technologie de l'osmose inverse. Aujourd'hui, le dessalement constitue une solution stratégique pour sécuriser l'approvisionnement en eau potable, notamment dans les régions côtières. **[1]**

L'Algérie a connu un essor sans précédent dans la réalisation de stations de dessalement d'eau de mer, portant le nombre de stations à 19, ce qui a permis d'augmenter la capacité de production nationale de 2,2 millions de mètres cubes à 3,7 millions de mètres cubes par jour, représentant ainsi 42 % de la demande nationale totale en eau potable**. [2]**

I-2-Définition des stations de dessalement :

Le dessalement, également désigné sous les termes de désalinisation ou, plus rarement, de dessalage, constitue un ensemble de procédés visant à produire de l'eau douce (potable ou destinée à l'irrigation) à partir d'eaux brutes salées, telles que l'eau de mer ou les eaux saumâtres d'origine continentale. Ce processus repose sur la séparation des sels et de l'eau. L'eau de mer, par exemple, présente une salinité moyenne de 35 g/L, composée principalement de chlorures de sodium (76 %) et de magnésium (11 %), ainsi que de sulfates de magnésium (5 %), de calcium (3,5 %) et de potassium (2,4 %). Ces sels se dissocient en ions, formant des anions (chlorures et sulfates) et des cations (sodium, magnésium, calcium et potassium). Il convient de noter que la salinité de l'eau de mer n'est pas uniforme ; elle tend à être plus élevée dans les zones maritimes chaudes et semi-fermées, comme la Méditerranée (36 à 39 g/L), et plus faible dans les mers froides recevant d'importants apports fluviaux, à l'instar de la mer Baltique (7 g/L). Bien que le dessalement permette de pallier le manque d'eau douce dans les régions où les sources conventionnelles sont rares ou insuffisantes, il est généralement plus économique et plus simple de traiter les eaux douces existantes (eaux de surface ou souterraines). **[3-4]**

Ⅰ-3-Schéma de principe des stations de dessalement:

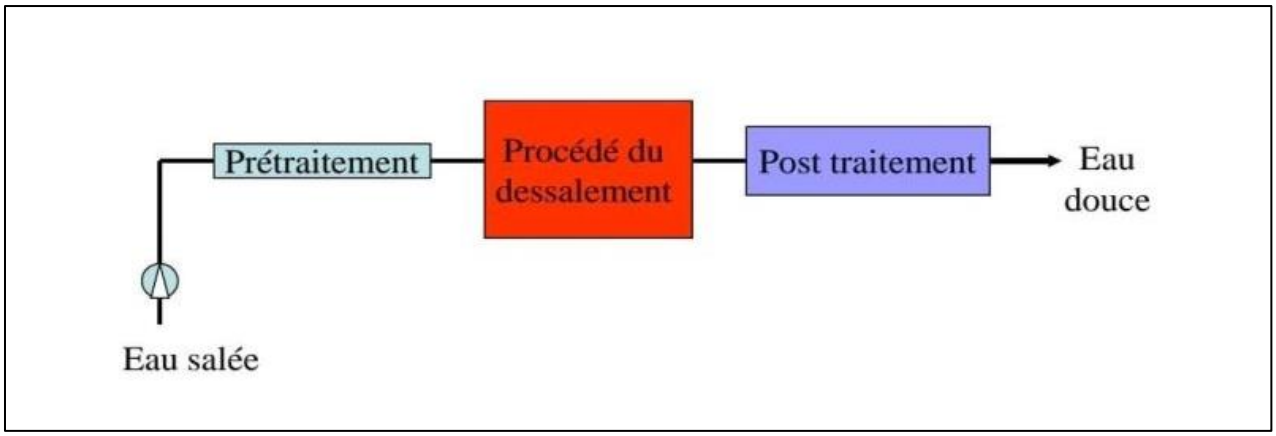


Figure 1: Schéma de principe des stations de dessalement

I-3-1-Le prétraitement :

La salinité, les matières en suspension ainsi que les matières organiques des différents océans ou mers du globe sont très variables. Les systèmes de prétraitement de l'eau de mer avant dessalement ont pour but d'éliminer les matières en suspension et le plancton qui sont susceptibles de colmater les installations de dessalement.

Les techniques de prétraitement de l'eau de mer sont :

► Chloration : Bloque la prolifération des organismes vivants. Evite l'obstruction des conduites

► Filtration : Protège les pompes et assure le bon fonctionnement des pulvérisateurs.

► Antitartre : La distillation favorise la précipitation du carbonate de calcium qui se dépose sur la paroi des échangeurs et réduit le transfert de chaleur**. [4]**

I-3-2-Traitement :

C'est le système qui retire les sels de l'eau brute (eau saumâtre ou eau de mer). Ce Système peut être un « système membranaire », un « système thermique » ou « un autre Système ». Le choix de la meilleure technologie de dessalement peut dépendre de la géographie, de l'environnement, de la maturité de la technologie, de l'eau brute et de la qualité de l'eau produite, de la disponibilité des technologies, de l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'installation disponible, de la capacité des opérateurs à faire fonctionner cette technologie, des coûts, … etc.

I-3-3-Le post-traitement :

Permet de potabiliser l'eau en 2 étapes (en sortie de l'unité de dessalement, l'eau n'est pas potable car elle est déminéralisée).

► Correction de la corrosivité : le traitement consiste à ajouter du $Ca(OH)_2$ ou du $CaCO_3$.

►Désinfection finale : bien que certains procédés (osmose inverse) retiennent tous les microorganismes, il est nécessaire d'assurer une désinfection à la sortie de l'usine. **[4]**

I-4-Les propriétés de l'eau de mer de méditerranée :

Dans l'eau de mer, des éléments tels que le carbone, l'azote et le phosphore - en relation avec l'oxygène dissous et les nutriments - sont à la base de toute la chaîne alimentaire marine. D'autres, comme le calcium, le magnésium et le strontium reflètent la dynamique des échanges continent-océan-atmosphère et sont des outils précieux en paléo-océanographie ou pour la modélisation des climats du passé.

Un dogme vieux de 155 ans remis en question Sur les 94 éléments chimiques naturels recensés dans le fameux tableau de Mendeleïev, une grande partie entre dans la composition de l'eau de mer fut-ce à l'état de traces. Cette solution est composée à 96,5% d'eau pure et à 3,5% de substances dissoutes (sels, gaz). Si le Chlore et le Sodium sont les composants les plus fréquents, océanographes et climatologues s'appuient sur la mesure d'autres éléments pour estimer les températures passées de l'océan bien évidemment inaccessibles. Il s'agit en particulier des rapports entre la quantité de matière en Calcium (Ca), Magnésium (Mg) et Strontium (Sr) sous la forme Mg/Ca et Sr/Ca (avec comme unité la mole). En 1865, un géologue danois trouve que ces rapports dits molaires sont les mêmes quelle que soit la zone de mer global considérée. C'est le Principe de Forchhammer, du nom de son inventeur. Autrement dit, si la concentration totale des sels dissous varie en fonction du lieu, la proportion des composants les plus importants resterait à peu près constante. Avec comme corollaire la certitude que les eaux des différents mers se seraient mélangées très rapidement (par rapport aux périodes de temps géologiques qui se comptent en millions d'années), avec des flux d'entrée et de sortie en équilibre. Il aura fallu la collaboration de chercheurs de plus de dix pays pour mettre à bas ce dogme. Ceux-ci ont collecté et analysé, lors de 79 expéditions océanographiques, plus de 1000 échantillons d'eau provenant de 14 écosystèmes marins allant de la surface à 6000 mètres de profondeur.

Les rapports molaires Mg/Ca et Sr/Ca dissous dans l'eau de mer sont « enregistrés » sous forme particulaire dans les squelettes riches en carbonates de calcium d'organismes marins fossiles et actuels tels que les foraminifères les mollusques ou les coraux. Leur étude permet de comprendre les fluctuations de température de l'eau de mer et d'autres conditions environnementales du passé. L'analyse à grande échelle dont les résultats sont publiés dans les Proceedings of the National Academy of Sciences (USA) a donc mis à l'épreuve l'hypothèse selon laquelle les rapports Mg/Ca et Sr/Ca seraient relativement constants selon la province océanique, l'écosystème, la profondeur, la latitude et les conditions chimiques (pH, salinité, oxygène dissous). [5]

I-5-Caractéristiques des eaux marines et saumâtres :

I-5-1-Les eaux marines :

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates). La salinité moyenne des eaux des mers et océans est de 35 $g.L^{-1}$ (27,2 $g.L^{-1}$ de NaCl, 3,8 $g.L^{-1}$ de $MgCl_2$, 1,7 $g.L^{-1}$ $MgSO_4$, 1,26 $g.L^{-1}$ $CaSO_4$, 0,86 $g.L^{-1}$ K_2SO_4).

Cette salinité peut être différente dans le cas de mers fermées :

- Mer Méditerranée : 36 à 39 $g.L^{-1}$,
- Mer Rouge : environ 40 $g.L^{-1}$,
- Mer Caspienne : 13 $g.L^{-1}$,
- Mer Morte : 270 $g.L^{-1}$,
- Golfe Arabo-Persique : 36 à 39 $g.L^{-1}$.

Le pH moyen des eaux de mer varie entre 7,5 et 8,4 : l'eau de mer est un milieu légèrement basique. **[6]**

I-5-2-Les eaux saumâtres :

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le $CaCO_3$, le $CaSO_4$, le $MgCO_3$ et le NaCl. **[6]**

I-6-Les stations de dessalement en Algérie :

L'Algérie a franchi une étape décisive dans sa stratégie de lutte contre la pénurie d'eau. Avec la mise en service de 19 stations de dessalement d'eau de mer d'ici fin 2024, le pays a considérablement renforcé sa capacité de production. À ce jour, 11 stations sont opérationnelles le long du littoral, assurant une production totale de 2,11 millions de mètres cubes par jour.

Le plan d'urgence a porté ses fruits avec l'achèvement de trois stations supplémentaires, chacune produisant 70 000 mètres cubes par jour. Ces installations, situées à Bateau Cassé et El Marsa (Alger), ainsi qu'à Corso (Boumerdès), ont atteint leur pleine capacité opérationnelle. Ces nouvelles stations contribuent à augmenter la production de 80 000 mètres cubes par jour, répondant ainsi à la demande croissante en eau.

Lancé en 2022, le programme complémentaire de construction de 11 nouvelles stations de dessalement a progressé à un rythme soutenu. Les cinq stations principales, situées à El Tarf, Béjaïa, Boumerdès, Tipaza et Oran, sont opérationnelles à 70%. La station de Béjaïa à Tigremt, en particulier, grâce aux efforts soutenus des équipes algériennes. Ce programme représente une avancée majeure pour garantir la sécurité hydrique du pays et satisfaire les besoins des populations et des secteurs économiques.

La Société Algérienne de l'Energie (AEC), filiale de Sonatrach, a joué un rôle clé dans la réalisation de ces projets, avec l'objectif ambitieux d'atteindre une production de 3,76 millions de mètres cubes d'eau potable par jour d'ici 2030. Ce volume couvrira 60% des besoins en eau de la population, un accomplissement crucial face à la crise hydrique.

Les projets de dessalement sont actuellement en phase d'acceptation des équipements et d'installation, étapes essentielles pour assurer l'efficacité et la fiabilité avant les tests et la mise en service. Cette étape est cruciale pour garantir la capacité des stations à répondre à la demande croissante en eau, notamment en raison de la croissance démographique et des besoins des secteurs économiques.

M. Mohamed Boutabba, Président Directeur Général de l'AEC, a souligné l'importance stratégique de ces projets, qui porteront la part de l'eau dessalée à 42% de l'approvisionnement total en eau de l'Algérie. Sonatrach a réceptionné plusieurs livraisons d'équipements, facilitant ainsi l'avancement des projets. Une opération logistique aérienne de grande envergure a été menée pour acheminer ces équipements vers les cinq stations principales. Récemment, une cargaison de 79 tonnes d'équipements mobiles est arrivée à l'aéroport international Houari

Boumediene, fruit d'une collaboration entre l'AEC et La Société Algérienne de Réalisation de Projets Industriels (SARPI)

Le deuxième programme d'urgence prévoit la construction de six nouvelles stations de dessalement, portant le nombre total à 25 d'ici 2030, selon le Président Directeur Général de l'AEC. Ce programme a été confié à plusieurs entreprises algériennes, dont quatre filiales de Sonatrach et Cosider Canalisations.

L'équipe d'Advanced Electronics Company travaille à identifier les sites côtiers pour installer des solutions temporaires, afin de déterminer les options les plus adaptées à l'expansion des capacités. Le dessalement requiert des investissements considérables en raison des coûts élevés de la technologie et de la consommation énergétique. Pour minimiser cette consommation, les stations doivent privilégier les énergies renouvelables, telles que le solaire et l'éolien, assurant ainsi la durabilité des opérations et réduisant l'impact environnemental. **[7]**

Tableau 1: Stations de dessalement en Algérie

Wilaya	Lieu	Capacité (m³/jour)	Année de création
Oran	Mactaa	500 000	2014
	Capblanc	300 000	2025
	Arzew	90 000	
	Kahrama	80 000	
Tipaza	Fouka Ⅰ	120 000	2012
	Fouka Ⅱ	300 000	-
Tlemcen	Honaine	200 000	
	Souk Tleta	200 000	2022
Chlef	Ténès	200 000	2015
Mostaganem	Schalk Plage	200 000	
Aïn Témouchent	Beni Saf	200 000	2010
Boumerdès	Cap Djenet Ⅰ	100 000	2012
	Cap Djenet Ⅱ	300 000	2025
	Corso	80 000	2023
Béjaïa	Toudja	300 000	2024
El Tarf	Berrihane	300 000	2025
Tizi Ouzou	Azeffoun	60 000	2026
Alger	El Marsa	60 000	2022
	Bateau Cassé	10 000	2022
	El-Hamma	200 000	2008

Conclusion :

L'Algérie, confrontée à une plus grande pénurie d'eau, à l'origine de défis environnementaux et démographiques, a jeté son dévolu sur le dessalement de la mer comme solution, stratégique. L'extension impressionnante des stations de dessalement, avec une production en pleine croissance, en font foi. D'une part et cependant, une narration des évolutions de la mortalité imprévoyante met en équilibre les concurrents, une anecdote, le démarrage ! L'actualité entre eux, j'expliquerai d'une part qu'une telle incidence vaudra à la description peu évidente de la mondialisation de la mortalité pendant cette période. L'avenir sera soumis à une vision globale, fédérant dessalement, économies d'eau et sauvegarde des ressources conventionnelles pour garantir la sécurité hydrique du territoire.

Chapitre Ⅱ :

Les procédés de dessalement

Introduction :

Face à la raréfaction des ressources en eau douce, notamment dans les régions arides et semi-arides comme l'Algérie, le dessalement de l'eau de mer apparaît comme une solution stratégique pour répondre aux besoins croissants en eau potable. Diverses technologies ont été développées à travers le monde, chacune reposant sur des principes de fonctionnement spécifiques et présentant des avantages et des limites propres.

Les technologies employées pour le dessalement se répartissent en deux grandes familles : les procédés thermiques et les procédés membranaires. Les premiers, incluant des techniques éprouvées comme le MSF et le MED et le MCV, exploitent l'énergie thermique pour vaporiser et condenser l'eau. Les seconds, tels que l'OI et l'DM et électrodialyse, utilisent des membranes semi-perméables et des gradients de pression ou de potentiel électrique pour séparer les ions et les molécules d'eau. Ces deux catégories de méthodes présentent des caractéristiques distinctes en termes d'efficacité, de coût énergétique et d'empreinte environnementale, des aspects qui seront comparés dans les développements suivants.

Ces deux familles de procédés se distinguent par leur efficacité, leur consommation énergétique et leur impact environnemental. Une analyse comparative, présentée en fin de chapitre, permettra de mettre en lumière les avantages respectifs de chaque technologie et d'expliquer pourquoi certaines, comme l'osmose inverse, sont privilégiées dans les stations de dessalement en Algérie.

II-1-Les principales technologies de dessalement des eaux :

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories, selon le principe appliqué :

- Les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phases : la congélation et la distillation.
- Les procédés utilisant des membranes : l'osmose inverse et l'électrodialyse.

Parmi les procédés précités, la distillation et l'osmose inverse sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. En effet, ces deux procédés sont les plus commercialisés dans le marché mondial du dessalement. Les autres techniques

n'ont pas connu un essor important dans le domaine à cause de problèmes liés généralement à la consommation d'énergie et/ou à l'importance des investissements qu'ils requièrent.

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes :

- Une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière.
- Un pré-traitement avec une filtration plus fine, l'addition de composés biocides et de produits anti-tarte.
- Le procédé de dessalement lui-même.
- Le post-traitement avec une éventuelle reminéralisation de l'eau produite.

A l'issue de ces 4 étapes, l'eau de mer est rendue potable ou utilisable industriellement, elle doit alors contenir moins de 0,5 g de sels par litre. **[8]**

II-2-Classification des procédés de Dessalement :

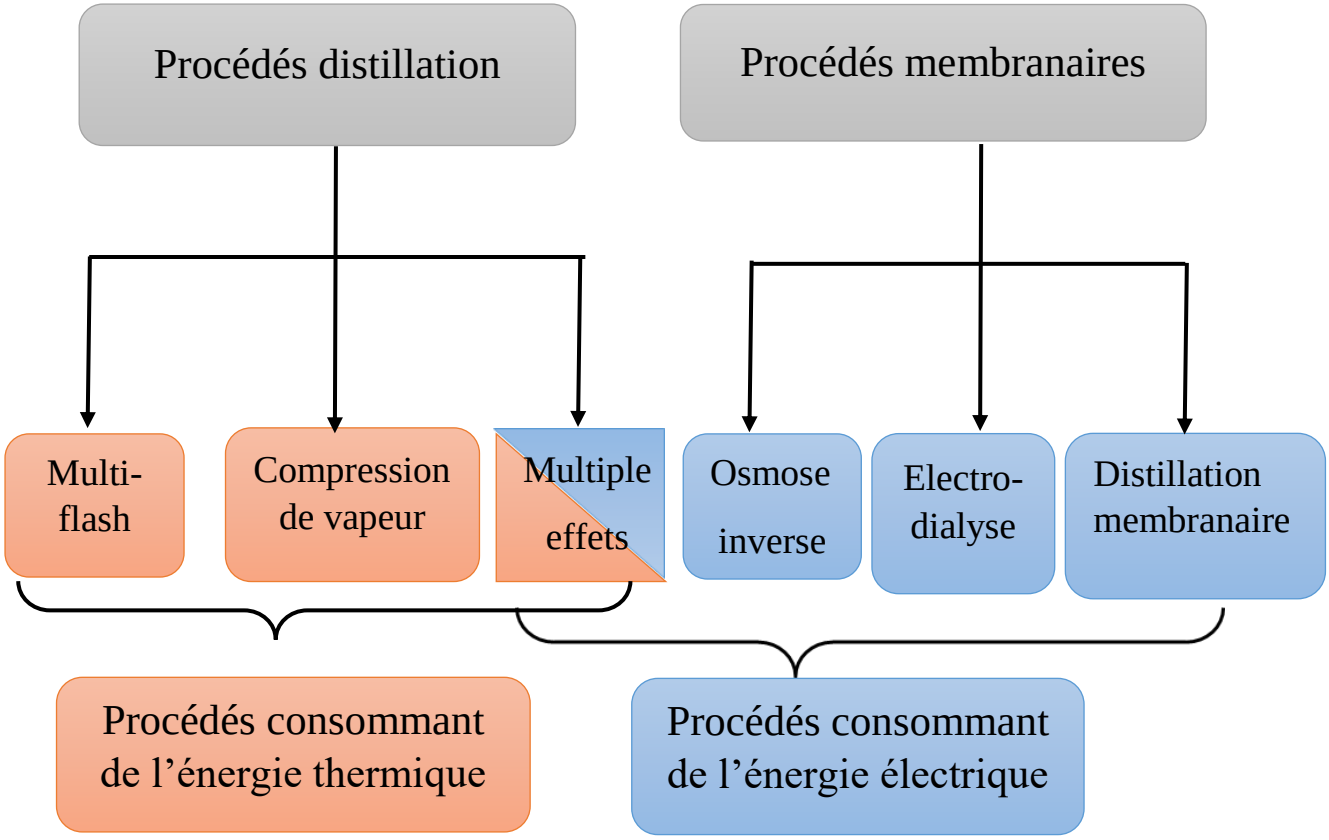


Figure 2 : Classification des procédés de Dessalement

II-3- Procédés par distillation :

Les procédés de distillation consistent à chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur obtenue ne contient pas de sels, et donc une condensation de cette vapeur sert à Obtenir de l'eau douce liquide. Il s'agit en fait d'accélérer le cycle naturel de l'eau. Dans la Nature l'eau s'évapore des océans, la vapeur s'accumule pour former les nuages puis l'eau Douce retombe sur terre par les précipitations. Ce procédé de dessalement a été utilisé dès L'antiquité pour générer de très faibles quantités d'eau douce sur les navires. **[9]**

II-3-1-Distillation « Multi stages Flash » ou (MSF) :

II-3-1-1-Principe de Fonctionnement :

Dans le procédé MSF, l'eau de mer est chauffée dans une chaudière. Cela est généralement fait en condensant la vapeur sur un faisceau de tuyaux véhiculant de l'eau de mer qui passe à travers la chaudière. Cette eau de mer chauffée coule alors dans une autre cuve correspondant à un autre étage où la pression ambiante est plus basse, si bien que l'eau commence aussitôt à bouillir. L'introduction soudaine de l'eau chauffée à chaque étage déclenche une détente et son évaporation instantanée (« flash »). En général, seule une petite fraction de cette eau est convertie en vapeur, en fonction de la pression maintenue à l'étage, étant donné que l'ébullition continuera jusqu'à ce que l'eau retombe au point d'ébullition. Le concept de distillation de l'eau dans des étages successifs dont chacun est maintenu à la pression inférieure à la pression saturante correspondant à la température de l'eau dans l'étage n'est pas nouveau et est appliqué depuis plus d'un siècle. Dans les années 1950, une unité MSF qui comportait des étages en série maintenus à des pressions de plus en plus basses a été mise en place. Dans cette unité, l'eau d'alimentation circule d'un étage à l'autre et est portée à ébullition à plusieurs reprises sans que l'on augmente la chaleur. Habituellement, une usine MSF comporte 15 à 25 étages. La figure 2 illustre le schéma d'une usine de type MSF. **[10]**

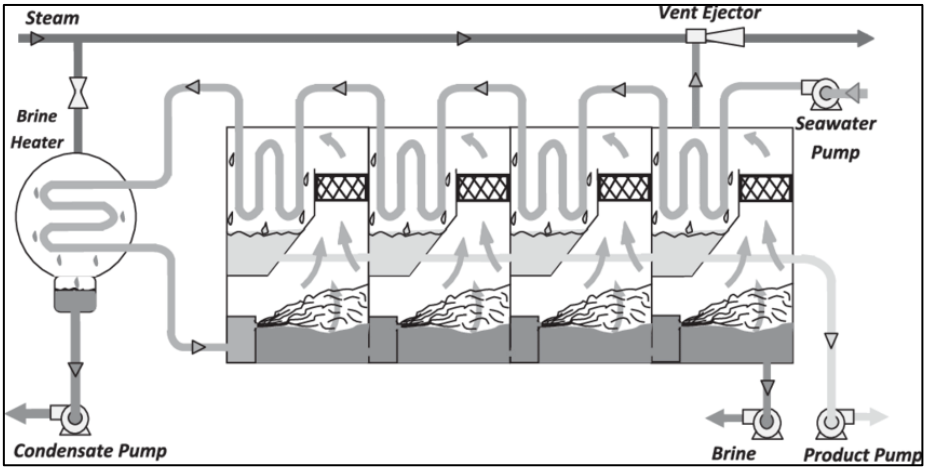


Figure 3: Principe de distillation multi stage flash

II-3-1-2-Principaux avantages :

- Technologie mature, maitrisée et largement utilisée dans le monde entier.
- Faible taux de prétraitement d'alimentation.
- Bonne qualité d'eau produite. **[11]**

II-3-1-3-Principaux Inconvénients :

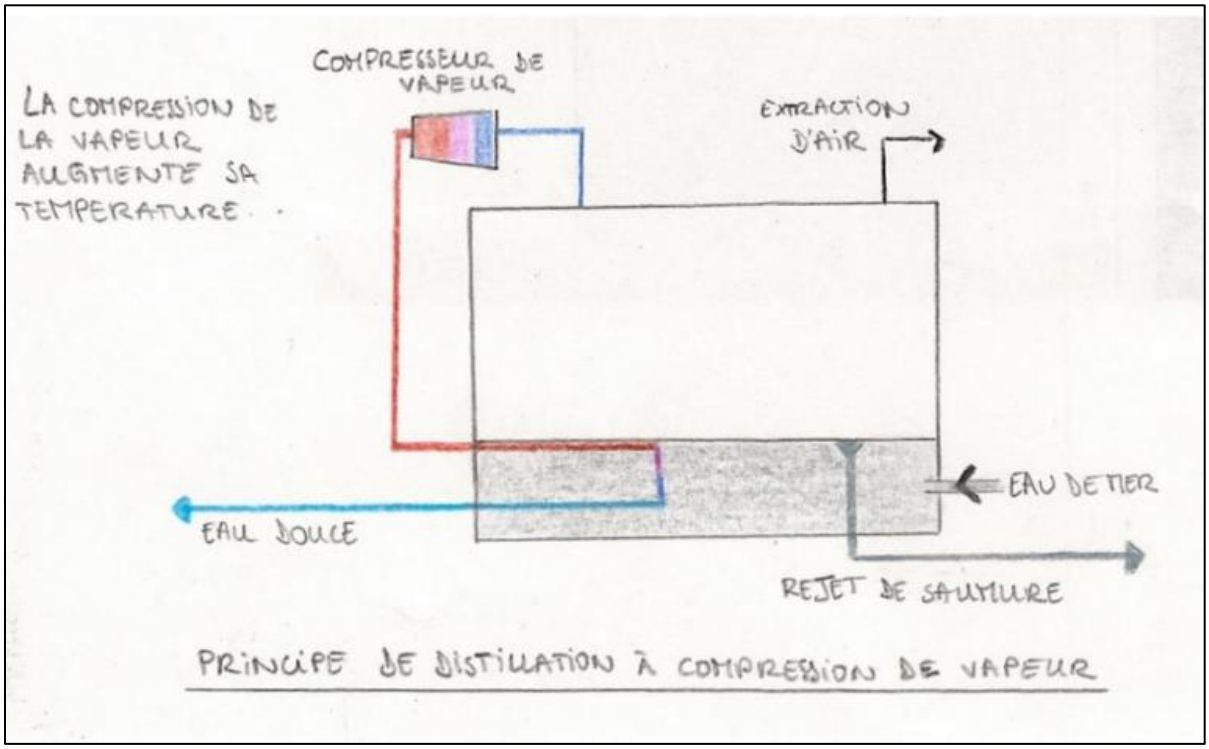
- Consommation d'énergie thermique élevée.
- Faible taux d'extraction d'eau douce.
- Nécessite une reminéralisation de l'eau produite.
- Coût élevé dans le cas des petites capacités de production.
- Difficile à contrôler les pressions pour avoir un fonctionnement stable. **[11]**

Figure 4: photo réelle de distillation MFS

II-3-2-Distillation par compression de vapeur :

II-3-2-1-Principe de fonctionnement :

La distillation par compression de vapeur fonctionne en créant une différence de pression entre les côtés chaud (eau pure/vapeur) et froid (saumure saline) d'une surface d'échange thermique. La compression vapeur/vapeur augmente la température et la pression pour entraîner l'évaporation de l'eau d'une saumure. La compression de vapeur peut être effectuée thermiquement par un éjecteur de vapeur, compression thermique de vapeur (TVC), ou mécaniquement par un compresseur, compression mécanique de vapeur (MVC)) .La distillation par compression de vapeur a été utilisée pour le dessalement de l'eau de mer, la déshydratation du concentré d'osmose inverse et la déshydratation des saumures produites .L'évaporateur d'un procédé de compression de vapeur fonctionne de manière similaire aux procédés MED cependant, les procédés de compression de vapeur fonctionnent avec un seul effet. Dans cet effet, la vapeur d'eau d'une saumure préchauffée est extraite et comprimée, ce qui augmente sa pression et sa température. La vapeur comprimée circule dans un échangeur de chaleur, formant de la vapeur d'eau supplémentaire lors de sa condensation. La vapeur d'eau ainsi formée est ensuite acheminée vers l'éjecteur ou le compresseur à vapeur. L'eau produite et la saumure rejetée sont utilisées pour préchauffer l'eau de mer douce entrant dans le



procédé. **[12]**

Figure 5: Principe de distillation par compression de vapeur

Figure 6 : Photo réel de distillation par compression de vapeur

Ⅱ-3-2-2-Principaux avantages:

- Technologie mature et maitrisée.
- Possibilité d'être combinée avec le procédé à effet multiple.
- Taux d'extraction d'eau douce élevée par rapport aux procédés d'évaporation à effets multiple et détente à étages multiple.
- Faible traitement chimique.
- Bonne qualité d'eau produite. **[11]**

Ⅱ-3-2-3-Principaux Inconvénients:

- Consommation d'énergie électrique élevée par rapport à l'osmose inverse.
- Cout élevé par rapport à l'osmose inverse.
- Risque d'encrassement élevé.
- Nécessite une maintenance fréquente du compresseur. **[11]**

Ⅱ-3-3-Distillation Multi-Effets (MED):

Ⅱ-3-3-1-Principe de Fonctionnement:

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le 1er effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2ème effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2ème effet et ainsi de suite (voir figure 4). Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m3 d'eau douce produite). **[9]**

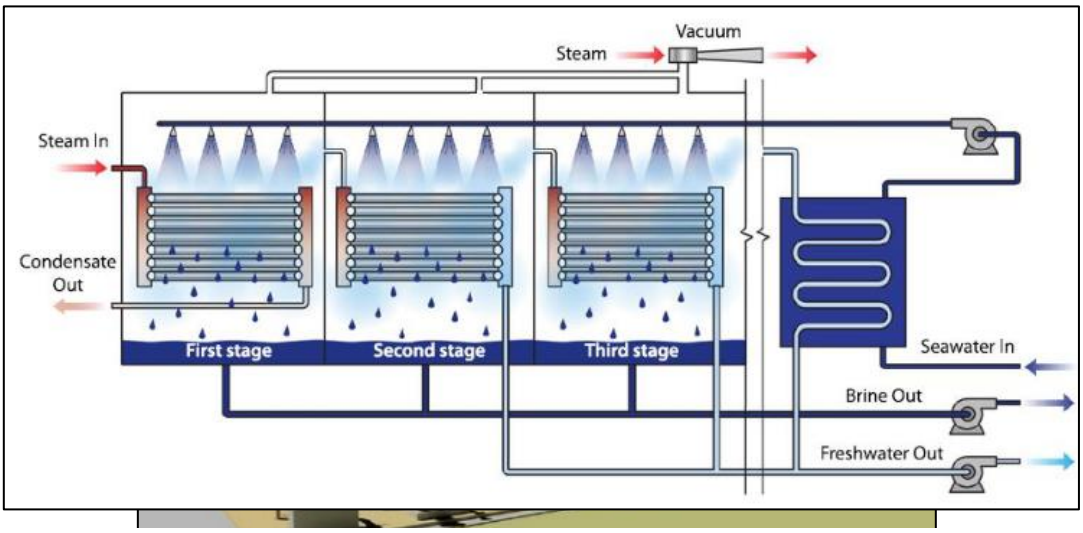


Figure 7 : Principe de distillation multi-effets MED

Figure 8: Photo réelle de distillation multi-effets MED

II-3-3-2-Principaux avantages :

- Technologie mature et maitrisée.
- Possibilité d'utiliser des faibles écarts de température grâce au développement de la technologie d'évaporation. Ce qui permet d'augmenter le nombre d'effet et réduire la consommation d'énergie.
- Fonctionnement à faible température (≈70°C).
- Faible prétraitement par rapport aux procédés d'osmose inverse.

- Bonne qualité de l'eau produite. **[11]**

II-3-3-3-Principaux Inconvénients :

- Consommation d'énergie thermique élevée.
- Faible taux d'extraction d'eau à partir de l'eau salée.
- Cout de production d'eau douce élevé pour les petites installations.
- Nécessité de reminéralisation d'eau produite. **[11]**

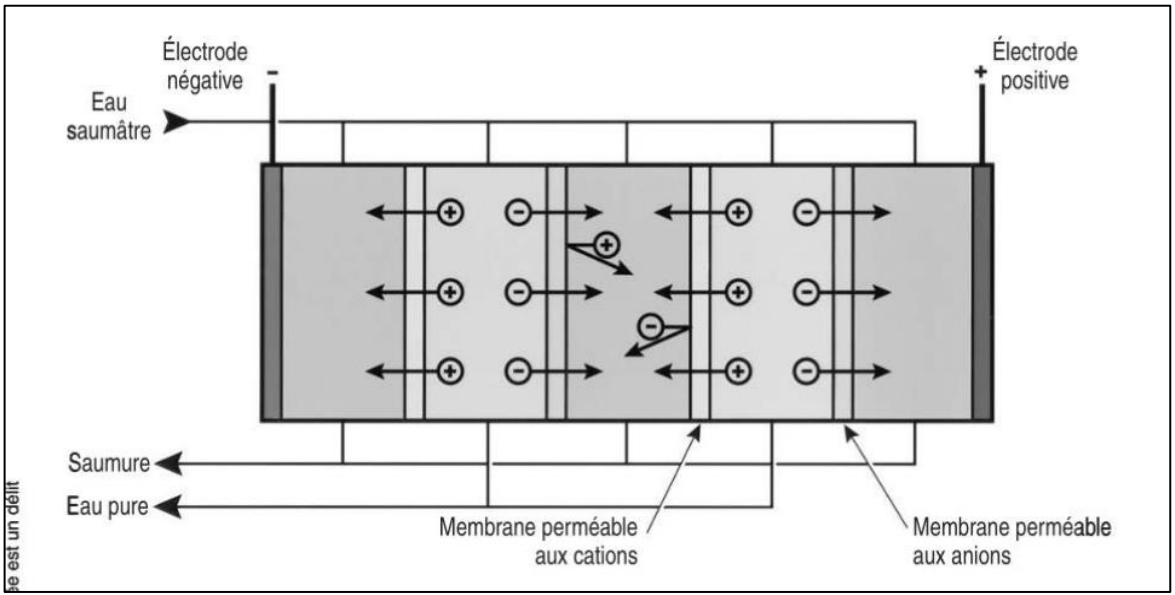
II-4- Procédés membranaires :

Une membrane permsélective est une barrière matérielle (film polymère, céramique ou, rarement, métallique) qui permet certains transferts de matière entre deux milieux qu'elle sépare et qui en interdit d'autres ou, de façon moins restrictive, qui en favorise certains par rapport à d'autres sous l'action d'une force agissante. Le terme « membrane permsélective », souvent utilisé pour désigner les membranes en général, est à réserver pour les techniques d'électrodialyse et pervaporation. **[13]**

II-4-1-Electrodialyse :

II-4-1-1-Principe de fonctionnement :

Ce procédé purement électrique repose sur l'utilisation de membranes sélectives, imperméables soit aux anions (ions négatifs) soit aux cations (ions positifs). Les ions migrent sous l'effet d'un champ électrique et sont bloqués dans des compartiments où l'eau salée se concentre, tandis que l'on récupère de l'eau plus pure dans les autres compartiments. La consommation énergétique est ici proportionnelle à la masse de sel extraite : 1 kWh/kg de sel, et non à la quantité d'eau produite. Il devient économiquement moins avantageux de réduire



la salinité en dessous de 350 ppm. Bien que l'électrodialyse soit principalement utilisée pour traiter des eaux légèrement salées (moins de 5 g/l) destinées à des usages domestiques, elle reste une technique prometteuse pour le dessalement de l'eau de mer, surtout lorsqu'elle est combinée avec d'autres techniques. La taille typique des unités d'électrodialyse varie entre 200 et 750 m3/jour, bien que certaines installations puissent traiter plus de 20 000 m3/jour. **[14]**

Figure 9 : Principe de distillation électrodialyse

II-4-1-2-Principaux Avantages :

- Ce procédé se distingue par une consommation énergétique modérée, notamment lors du traitement des eaux saumâtres, le rendant plus rentable que d'autres technologies comme l'osmose inverse dans certains cas.
- L'électrodialyse permet d'extraire efficacement une grande quantité d'eau douce à partir de solutions salines, ce qui en fait une technologie précieuse pour la valorisation des ressources en eau.
- Les membranes électro dialytiques présentent une durée de vie supérieure à celles utilisées dans d'autres techniques de dessalement, réduisant ainsi les coûts d'entretien et les impacts environnementaux liés à leur remplacement. **[11]**

II-4-1-3-Principaux Inconvénients :

- L'électrodialyse devient moins performante lorsqu'il s'agit de traiter de l'eau de mer brute, limitant ainsi son usage dans certains contextes de dessalement.
- Les matières organiques, les colloïdes et les particules en suspension peuvent provoquer l'encrassement des membranes, nécessitant des prétraitements coûteux et réguliers.
- Le procédé engendre une saumure qu'il est impératif de gérer adéquatement afin de minimiser les risques de pollution des milieux naturels. **[11]**

II-4-2-Distillation membranaire :

II-4-2-1-Principe de fonctionnement :

La distillation membranaire (MD) utilise des membranes polymériques hydrophobes ayant des porosités comprises entre 0,01 et 0,5 µm.

Le distillat de vapeur dans le procédé MD peut être produit grâce à des gradients de température, de pression partielle ou de vide.

La distillation membranaire à contact direct (DCMD), la distillation membranaire à espace d'air (AGMD), la distillation membranaire à gaz balayé (SGMD) et la distillation membranaire sous vide (VMD) sont différentes configurations du procédé MD qui ont connu des applications plus avancées. [15]

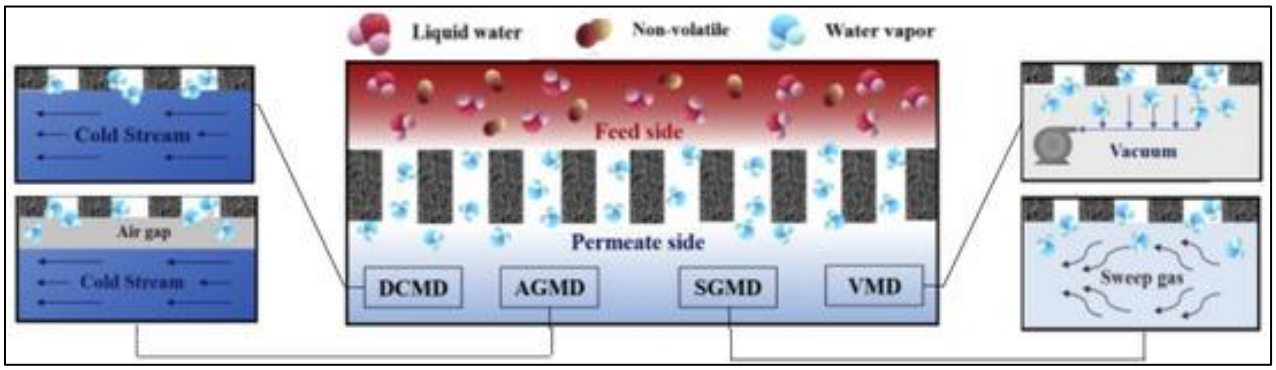


Figure 10 : Défirent type de distillation membranaire

La distillation membranaire est une méthode de dessalement qui utilise une membrane hydrophobe pour séparer l'eau pure de l'eau salée. Contrairement à la pervaporation, elle n'implique pas d'adsorption ou de désorption. Le processus repose sur le chauffage de l'eau salée, dont la vapeur traverse une membrane spéciale pour se condenser en eau pure de l'autre côté. Ce système, fonctionnant à des températures modérées et sous vide, utilise des membranes en matériaux résistants avec de très petits pores. Il est moins sensible aux impuretés que l'osmose inverse et consomme peu d'électricité pour les pompes. Cependant, il présente des défis liés au faible flux de vapeur et à la consommation d'énergie thermique, ce qui limite son application industrielle à grande échelle. **[14]**

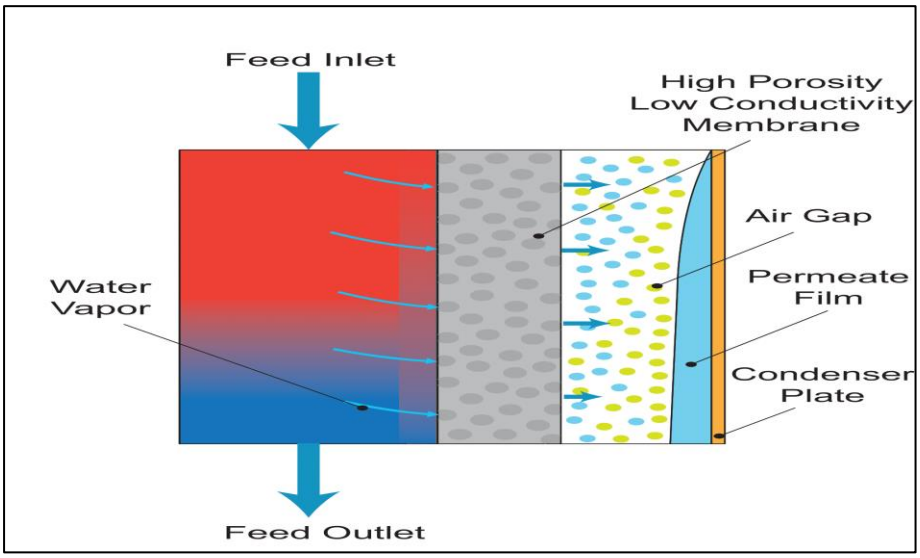


Figure 11 : Principe de distillation membranaire

Ⅱ-4-2-2-Principaux avantages:

- Possibilité de fonctionnement à basse température.
- Nécessité de prétraitement est faible par rapport à l'osmose inverse.
- Bonne qualité de l'eau produite.
- Les membranes utilisées sont plus résistantes à l'oxydation par rapport à celle de l'osmose inverse. **[11]**

II-4-2-3-Principaux Inconvénients :

- Technologie non mature, les informations concernant l'application de la technologie à grande échelle sont limitées.
- Membranes utilisées non optimisées.
- Cout élevé par rapport à l'osmose inverse et l'électrolyse **[11]**

II-4-3-Osmose inverse :

II-4-3-1-Principe de fonctionnement :

Le principe de l'osmose inverse repose sur l'utilisation d'une membrane semi-perméable, caractérisée par des pores très fins (inférieurs à 1 µm), permettant de retenir la majorité des ions dissous et des particules dans l'eau. Lorsqu'une solution diluée et une solution concentrée sont séparées par cette membrane, un flux naturel se dirige de la solution la moins concentrée

vers la plus concentrée, phénomène appelé osmose. Ce processus s'arrête une fois que l'équilibre des concentrations est atteint des deux côtés de la membrane. La différence de pression résultant de cette différence de hauteur entre les solutions est appelée pression osmotique. En appliquant une pression supérieure à cette pression osmotique sur la solution concentrée, le phénomène est inversé, et le solvant traverse la membrane dans l'autre sens, ce qui constitue l'osmose inverse. **[16]**

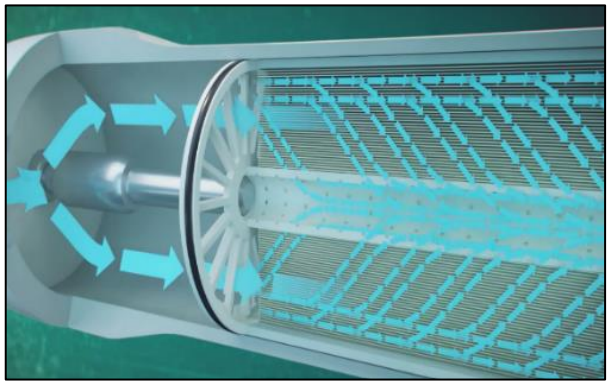


Figure 12 : Principe d'osmose inverse

Figure 13 : Photo réelle d'osmose inverse

II-4-3-2-Principaux avantages :

- L'équipement de traitement de l'eau par osmose inverse peut éliminer efficacement les métaux lourds, les pesticides, le trichloroéthène et d'autres polluants chimiques dans la qualité de l'eau.
- L'osmose inverse peut éliminer toutes les particules de polluants et de bactéries. **[17]**

II-4-3-3-Principaux Inconvénients :

- Utilise des pompes HP et consomme de l'électricité.
- Structure plus complexe et probablement plus coûteuse.
- Plus de joints, donc potentiellement plus de points de défaillance
- La durée de vie relativement courte des filtres à osmose inverse, généralement comprise entre 3 et 5 ans, ainsi que le coût élevé de leur remplacement et de leur installation. **[17]**

II-5-Comparaison des méthodes:

Tableau 2: Caractiristique des différents procédés de dessalement

Procédé / Paramètre	procède thermique			Procède membranaire		
	MSF	**MED**	**MVC**	**Electrodialyses**	**MD**	**OI**
Température de tête °C	**<120**	**<70**	**<70**	**-**	**70-80**	**20-30**
Source d'énergie principale	**Vapeur**	**Vapeur, eau chaud**	**Électricité**	**Électricité (courant)**	**Eau chaude, énergie solaire ou résiduelle**	**Électricité**
Consommation thermique KWh/m³	**70-80**	**50-70**	**0**	**0**	**50-100**	**0**
Consommation électrique KWh/m³	**3.5**	**1.5**	**8-4**	**6-8**	**1.5-3**	**3-5**
Capacité par ligne m³/j	**5000-70000**	**500-12000**	**10-2500**	**500-1000**	**100-5000**	**10000**

L'analyse révèle des différences significatives entre les procédés thermiques (MSF, MED, MVC) et les procédés membranaires (Électrodialyse, MD, OI). Les procédés thermiques, bien qu'établis, requièrent des températures de fonctionnement élevées et une consommation énergétique thermique substantielle. En revanche, les procédés membranaires, notamment l'OI, se distinguent par une absence de consommation thermique directe et une consommation électrique variable en fonction de la salinité de l'eau à traiter et de la pression opératoire.

L'électrodialyse, spécifiquement adaptée aux eaux faiblement saumâtres, ne dépend pas d'une température de tête élevée mais d'un courant électrique pour le transport ionique. La distillation membranaire (MD), quant à elle, exploite un gradient thermique modéré et peut intégrer des sources d'énergie renouvelables ou de la chaleur résiduelle, bien que sa consommation thermique puisse être notable.

Enfin, la capacité de production par ligne varie considérablement entre les technologies, l'OI se distinguant par son potentiel de production à grande échelle. Cette comparaison souligne les compromis inhérents au choix d'une technologie de dessalement, qui doit être optimisée en fonction des spécificités de la source d'eau, des exigences de qualité, des coûts énergétiques et des considérations environnementales.

II-6-L'impact de dessalement de eaux de mer sur l'environnement :

Le dessalement de l'eau de mer émerge comme une solution technologique de plus en plus sollicitée. Bien que cette technique offre une alternative prometteuse pour sécuriser l'approvisionnement en eau douce, elle n'est pas sans conséquences sur l'environnement, en particulier sur les écosystèmes marins.

a) Impact Négatifs :

Les répercussions négatives, sur l'environnement, sont dues à divers éléments :

- Evacuation de la saumure ou des eaux résiduelles, produites par le dessalement ;

- Additifs chimiques antisalissures ou anticorrosion ;

- Impact visuel, au niveau du paysage ;

b) Impact Positifs :

Le principal effet positif direct est un accroissement des disponibilités en eau.

L'impact positif indirect, sur l'environnement, découle d'une salinisation réduite du sol grâce à une irrigation à base d'eau dessalée par rapport à l'utilisation d'eaux saumâtres. **[18]**

Conclusion :

En somme, le choix entre les technologies de dessalement thermique et membranaire implique des compromis clairs en termes de consommation énergétique et de capacité. Si l'OI domine la production à grande échelle avec une faible consommation thermique directe, les procédés thermiques restent pertinents dans certains contextes. L'électrodialyse et la MD offrent des alternatives spécifiques. Toutefois, l'impact environnemental du dessalement, notamment les rejets de saumure, exige une gestion rigoureuse pour assurer la durabilité de cette solution cruciale pour l'approvisionnement en eau.

Chapitre Ⅲ :

System d’Osmose inverse

Introduction :

Face à une demande mondiale en eau douce en constante augmentation et à la diminution des ressources conventionnelles, le dessalement de l'eau de mer représente une alternative essentielle pour de nombreuses nations. Parmi les technologies disponibles, l'osmose inverse (OI) s'est imposée comme la méthode de dessalement la plus largement adoptée à l'échelle planétaire, représentant environ 70% des capacités installées. Cette prédominance, s'explique par son efficacité énergétique, la réduction continue de ses coûts de production et sa capacité à traiter de grands volumes d'eau avec un taux de rejet de sel supérieur à 99%. Dans le contexte algérien, la technologie de l'osmose inverse est au cœur de la stratégie nationale pour la sécurité hydrique. En 2025, l'Algérie a considérablement augmenté sa capacité de dessalement, visant à couvrir 42% des besoins nationaux en eau potable grâce à cette technologie. Le pays exploite plusieurs grandes stations, dont celle de Mactaa (Oran) avec une capacité de 500 000 m³/jour et celle de Fouka II (Tipaza) avec 300 000 m³/jour, parmi d'autres. L'objectif ambitieux est d'atteindre 60% de couverture des besoins en eau potable d'ici 2030 grâce au dessalement de l'eau de mer par osmose inverse OI, avec de nouveaux projets de stations en cours de réalisation à El Tarf, Béjaïa et Boumerdès, visant une capacité additionnelle de 1,5 million de m³/jour d'ici fin 2025. Cette étude s'inscrit dans ce contexte global et national en examinant les fondements scientifiques de l'osmose inverse, en distinguant clairement ce processus de l'osmose naturelle, et en analysant les différents facteurs qui influencent son fonctionnement, tels que la pression osmotique et les caractéristiques des membranes. De plus, nous explorerons les aspects pratiques liés à l'exploitation des systèmes d'OI, incluant les techniques de nettoyage et les implications énergétiques et économiques, tout en mettant en lumière les développements technologiques les plus récents dans le domaine. **[20,21,22]**

Ⅲ-1-Qu'est-ce que l'osmose inverse ? :

Pression osmotique :

L'osmose inverse de l'eau de mer (OIEM) est la technologie de dessalement la plus répandue, capable de fournir de l'eau douce à une population mondiale en pleine expansion. Dans un procédé SWRO classique fonctionnant avec un taux de récupération de 50 %, des

pompes haute pression forcent l'eau de mer (35 g/L de Solides totaux dissous (TDS) ; pression osmotique (π) ≈ 28 bars) à travers des membranes sélectivement perméables pour en extraire les sels. Il en résulte la génération d'un flux de perméat (0,2–0,3 g/L de TDS) et d'un concentré hypersalin (saumure SWRO avec 70 g/L de TDS ; $\pi \approx 56$ bar). Les saumures hypersalines sont généralement définies comme des mélanges liquides contenant une concentration en TDS ≥ 70 g/L. À l'échelle mondiale, plus de 140 millions de m^3 / jour de saumure OIEM sont générés par les usines de dessalement, la majorité étant rejetée dans l'océan sans traitement adéquat. La forte teneur en sel et en produits chimiques des saumures OIEM est connue pour dégrader les écosystèmes côtiers et marins, et le rejet direct de saumures résiduaires OIEM a donc fait l'objet d'un examen minutieux. Conformément aux objectifs de dessalement durable et de rejet liquide minimal, certains chercheurs ont proposé de dessaler davantage la saumure OIEM hypersaline afin de réduire le volume de saumures résiduaires rejetées dans les océans, ainsi que d'obtenir une meilleure récupération d'eau douce**. [23]**

III -2- Paramètres de fonctionnement d'une osmose inverse :

Les principaux paramètres de fonctionnement d'une unité d'osmose inverse sont :

- La pression osmotique ;
- Débit de l'eau osmosée et d'eau concentrée ;
- Le taux de conversion et le taux de rejet ;
- Le passage en sel et la salinité du perméat**. [24]**

III-3-Diffèrence entre l'osmose et osmose inverse :

L'**osmose** est un phénomène naturel qui se manifeste lorsqu'une membrane semi-perméable sépare deux solutions aqueuses de concentrations différentes en solides dissous (TDS). Conformément au deuxième principe de la thermodynamique, l'eau, solvant, migre spontanément de la solution à faible concentration en solutés vers la solution à concentration élevée, dans le but d'équilibrer les niveaux de concentration de part et d'autre de la membrane. Ce flux d'eau à travers la membrane génère une différence de niveau hydrostatique, dont la pression correspondante est définie comme la **pression osmotique**.

L'**osmose inverse** (OI), en revanche, est un procédé de séparation membranaire non spontané utilisé pour le traitement de l'eau. Contrairement à l'osmose naturelle, l'OI requiert l'application d'une pression externe supérieure à la pression osmotique sur le côté de la membrane où la concentration en TDS est la plus élevée. Cette surpression induit le passage de l'eau à travers la membrane, mais cette fois-ci du compartiment à forte concentration vers le compartiment à faible concentration. Par conséquent, les solutés dissous sont retenus du côté de la haute pression, permettant ainsi la production d'une eau purifiée avec une faible concentration en TDS.

L'application de l'osmose inverse s'avère particulièrement efficace pour la purification d'eaux saumâtres ou fortement chargées en sels dissous. En surmontant la pression osmotique naturelle, l'OI permet de séparer l'eau des solutés indésirables, concentrant ces derniers dans un effluent (saumure) qui est ensuite évacué. Bien que fondamentalement opposés dans leur déroulement spontané, la compréhension des principes de l'osmose et de l'osmose inverse est essentielle pour l'application de cette dernière, une technique de traitement de l'eau reconnue pour son efficacité et son large spectre d'élimination des polluants. **[25-26]**

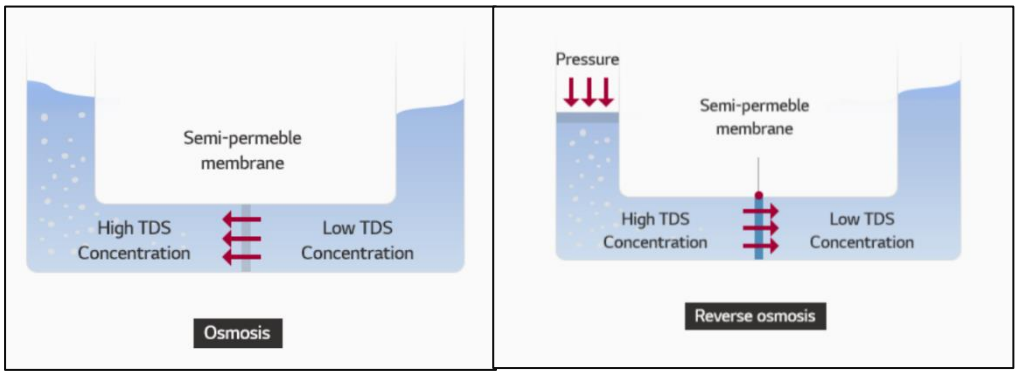


Figure 14: Différence Entre Osmose Et Osmose Inverse

III-4-Pression osmotique:

Rappelons que l'on appelle osmose le transfert de solvant (eau, dans la plupart des cas) à travers une membrane sous l'action d'un gradient de concentration.

Considérons un système à deux compartiments séparés par une membrane permsélective et contenant deux solutions de concentrations différentes (figure 14). Le phénomène d'osmose va se traduire par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la

quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera. Si, pour simplifier, nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique. **[27]**

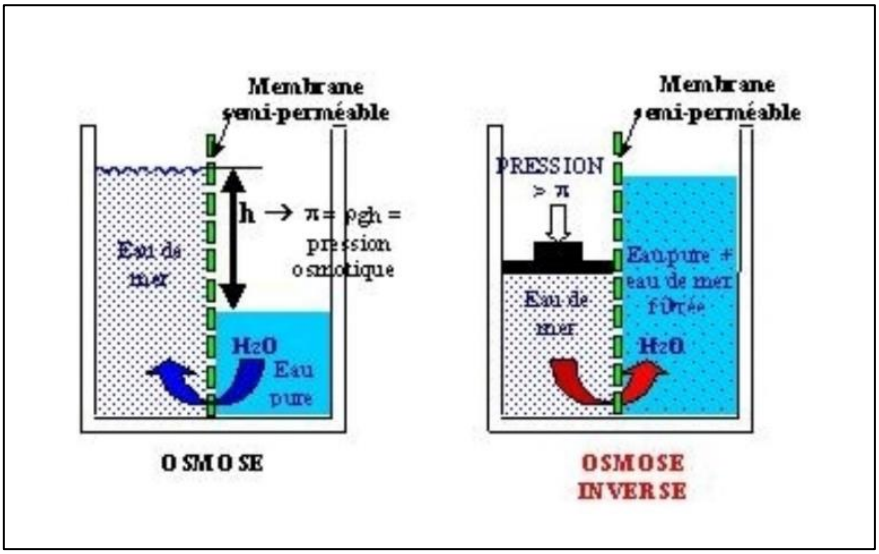


Figure 15 : Pression osmotique

III-5-Membranes d'osmose inverse :

Ⅲ-5-1-Materiel et Conditions Expérimentales Utilises:

Préparation et caractérisation des membranes Les membranes ayant servi à l'étude sont constituées de trois éléments différents schématisés sur la figure 14 qui représente la coupe transversale d'une membrane.

On y distingue :

1. Une pellicule ultra-mince en polyhydroxyméthylacrylamide réticulé qui confère à la membrane sa sélectivité ;
2. Une couche microporeuse et asymétrique en polysulfone sert vant de support protecteur à la pellicule précédente, l'épaisseur de cette couche est d'environ 50 µm ;
3. Un non tissé en polyester ou en polypropylène selon les cas ayant une épaisseur de 100 à 120 µm et dont le rôle est

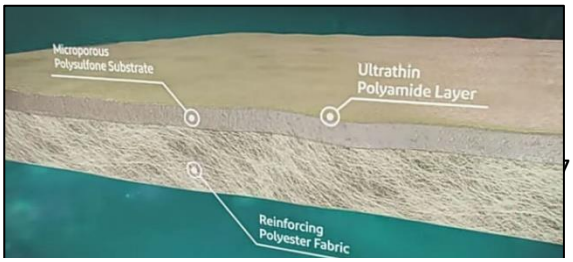


Figure 16: Les couches de membrane d'osmose inverse

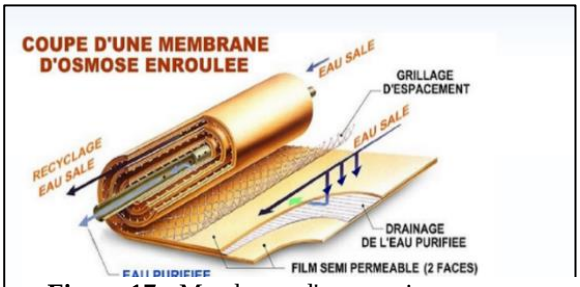


Figure 17 : Membrane d'osmose inverse

d'augmenter la tenue mécanique de la membrane. **[28]**

III-7-Type de membranes d'osmose inverse :

III-7-1-Les modules tubulaires :

Un module tubulaire contient plusieurs tubes qui peuvent être en série ou en parallèle. L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes. Les tubes constituent des canaux d'écoulement tangentiel. C'est le seul type de module qui peut être nettoyé mécaniquement avec un système de balles de mousse qui raclent les parois des tubes. L'écoulement à l'intérieur des tubes est turbulent 17 voire très turbulent. A cause de la taille des canaux tangentiels, cette configuration entraîne a priori une dépense d'énergie plus importante que dans les autres configurations.

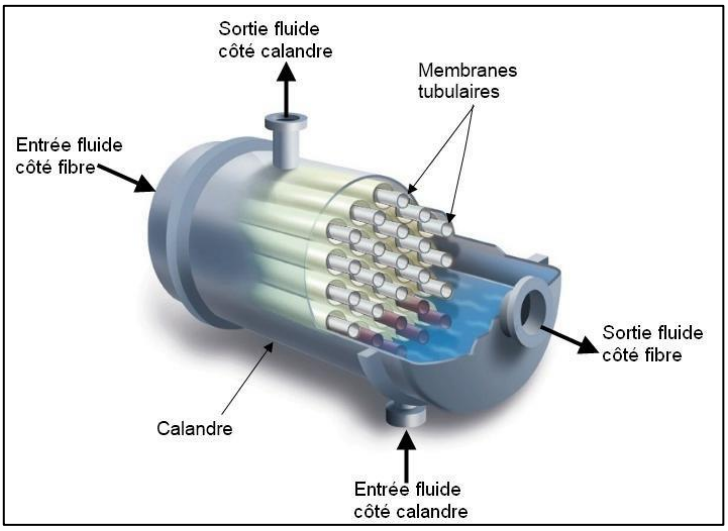


Figure 18: Les modules tubulaires

III-7-2-Les modules fibres creuses :

Ce sont des membranes sous forme des fibres en U dont le diamètre est de l'ordre du mm sont mises en faisceau. Les faisceaux ainsi obtenus sont encollés aux extrémités de façon à assurer l'étanchéité entre le compartiment (perméat) et l'alimentation. L'alimentation peut se faire à l'intérieur (intime externe) ou à l'extérieur (externe-interne) des fibres creuses, sont peu coûteux, sensibilités au colmatage et ils sont Inapplicables hors traitement de l'eau. **[29]**

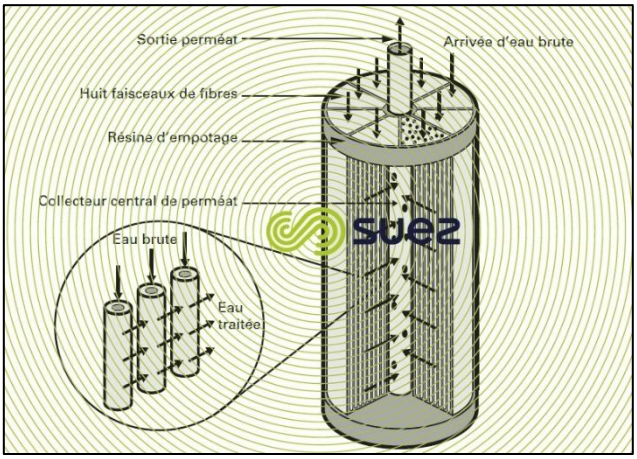


Figure 19 : Les modules fibres creuses

III-7-3-Les modules plans :

Cet arrangement est le plus ancien et le plus simple, les membranes sont rigides et ne peuvent être enroulées, elles ne sont donc utilisables que dans des dispositifs de type filtre presse (membranes en feuille montées de part et d'autre de cadres rgides, empilés). En raison de leur coût relativement élevé ils ont remplacé dans les procédés d'osmose inverse par les modules spiralés et les modules fibres creuses. **[29]**

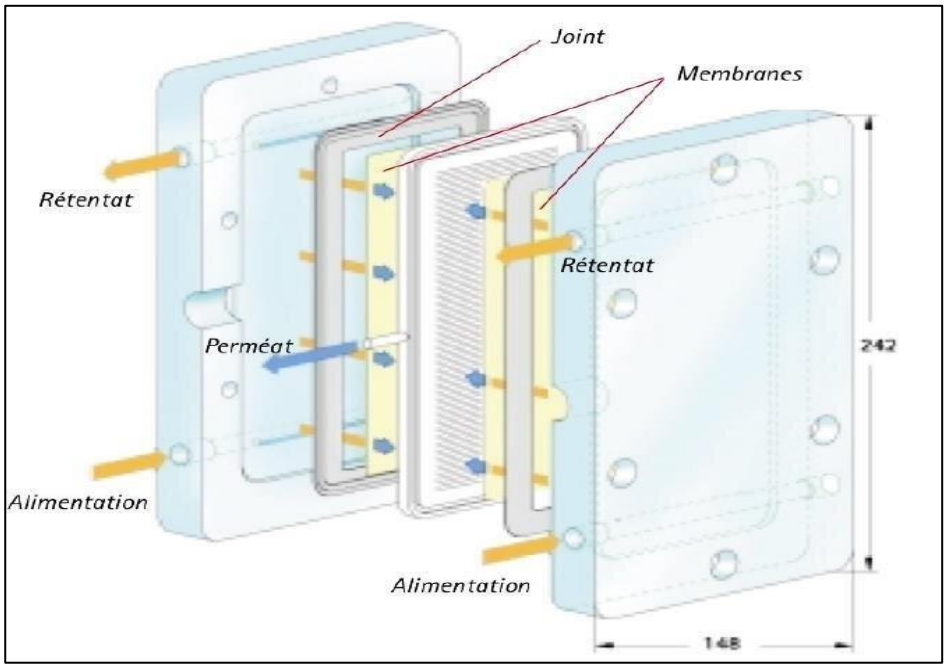


Figure 20 : les modules plans

III-7-4-Les modules spirales :

Pour diminuer les surfaces nécessaires à l'implantation des membranes, celles-ci sont configurées en spirale, comme l'indique la figure 20. Les zones de circulation de l'eau d'alimentation et de reprise du perméat sont aménagées à l'aide de grilles placées entre les membranes et enroulées avec elle pour former des éléments aux dimensions standardisées **[29]**

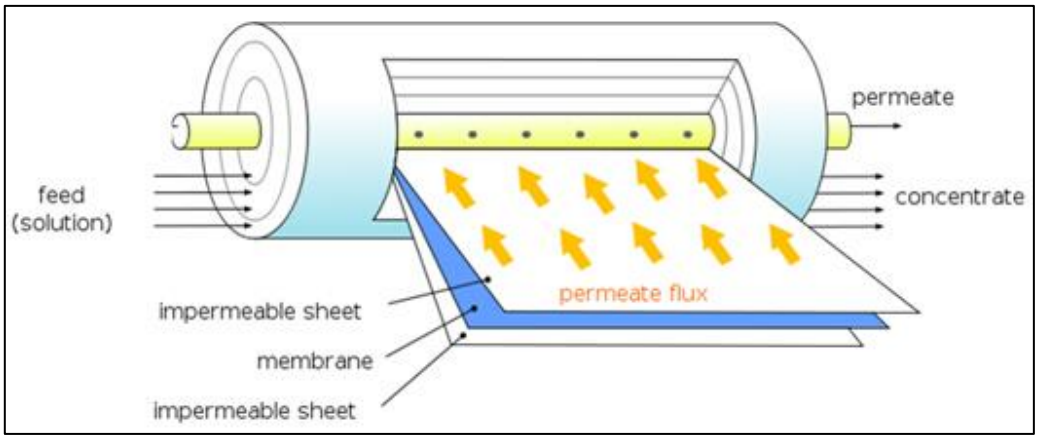


Figure 21: Les modules spirales

III-9-Nettoyage en Place (NEP) de Système d'Osmose Inverse (OI) :

Le Nettoyage en Place (NEP), ou Cleaning In Place (CIP), est une procédure essentielle pour maintenir l'efficacité et prolonger la durée de vie des membranes d'osmose inverse (OI). Ce processus séquentiel vise à éliminer les dépôts et les contaminants qui peuvent s'accumuler sur les membranes, compromettant ainsi la performance du système. Les étapes clés du NEP pour les trains d'OI sont les suivantes :

III-9-1-Composants Principaux du Système NEP :

1. **Réservoir de Nettoyage :** Un réservoir d'une capacité de **120 m³**, équipé d'un agitateur, est dédié au stockage des solutions chimiques de nettoyage.
2. **Pompes de Nettoyage :** Trois pompes sont utilisées pour assurer la circulation des solutions de nettoyage à travers le système d'OI.

3. **Tuyauteries et Collecteurs :** Un réseau de tuyauteries et de collecteurs permet la distribution uniforme des solutions de nettoyage vers les modules d'OI.
4. **Filtres Cartouches :** Des filtres cartouches sont intégrés pour éliminer les particules et les impuretés présentes dans les solutions de nettoyage, protégeant ainsi l'intégrité des membranes.
5. **Gestion des Effluents :** Les effluents issus du nettoyage sont neutralisés conformément aux réglementations environnementales avant leur élimination.

III-9-2-Procédure de Nettoyage :

La procédure de nettoyage se déroule en plusieurs phases séquentielles pour chaque skid d'OI individu élément et s'étend sur une durée de **3 à 4 jours**. Les étapes typiques sont les suivantes :

1-Prérinçage à l'Eau : Le premier réservoir est rempli d'eau, qui est ensuite pompée à travers les filtres cartouches et les membranes d'osmose inverse. Cette étape initiale permet d'éliminer les dépôts superficiels et de préparer les membranes pour le nettoyage chimique.

2-Nettoyage Chimique (Phase 1) : Le deuxième réservoir est rempli de la première solution chimique **Ethylenediaminetetraacetic acid (EDTA)** de nettoyage. Cette solution est ensuite circulée à travers les filtres cartouches et les membranes d'osmose inverse.

1. **Rinçage Intermédiaire :** Après la première phase de nettoyage chimique, un rinçage à l'eau est effectué pour éliminer les résidus de la première solution.
2. **Nettoyage Chimique (Phase 2 et suivantes) :** La même procédure est répétée avec les solutions chimiques de nettoyage suivantes **Acide sulfurique (NaOH)**, en fonction du protocole de nettoyage spécifique et de la nature des contaminants.
3. **Rinçage Final :** Un rinçage final à l'eau de haute qualité est effectué pour éliminer toute trace des solutions chimiques de nettoyage avant la remise en service du système d'OI.

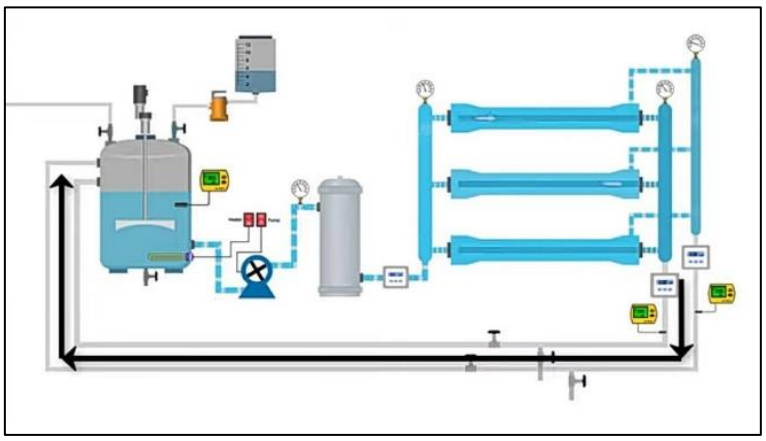


Figure 22 : Nettoyage en place (NEP) de système d'osmose inverse (OI)

Conclusion :

L’osmose inverse (OI) se révèle une technologie de dessalement essentielle à l'échelle mondiale, particulièrement pour les nations confrontées au stress hydrique, comme l'Algérie. Face à une demande croissante en eau douce, l'OI offre une solution efficace pour la production d'eau potable.

L'étude souligne la complexité du procédé, nécessitant une compréhension approfondie de la pression osmotique et des membranes. L'adoption globale de l'OI est significative, représentant la majorité des capacités de dessalement. Des pays comme l'Algérie illustrent son importance stratégique pour leur approvisionnement en eau. L'Algérie, en particulier, mise sur l'OI pour sa sécurité hydrique, avec des objectifs ambitieux d'augmentation de sa production.

Chapitre IV :
Etude de cas
(Station de CORSO)

IV-1-Présentation de la station de CORSO :

La station de dessalement d'eau de mer située dans la commune de Corso (Boumerdès) a atteint sa capacité de production maximale de 80 000 mètres cubes par jour, selon un communiqué de la Société algérienne de l'énergie, une filiale du groupe Sonatrach.

La société a précisé dans son communiqué qu'« après avoir achevé toutes les étapes de démarrage mécanique et d'essais et vérifié toutes les conditions de sécurité et de conformité aux normes, la station de Corso de dessalement d'eau de mer est entrée aujourd'hui, à 10 heures du matin dans la phase de production à sa pleine capacité de production de 80.000 mètres cubes par jour, soit 80 millions de litres par jour».

« Cela intervient après le lancement de la production partielle dans cette station destinée aux wilayas de Boumerdès et d'Alger le 4 juillet 2023 en tant que première étape des opérations de mise en service », a souligné la même source. La société a ajouté que « le groupe Sonatrach, avec sa filiale, la Société algérienne de l'énergie, a ainsi terminé et livré toute la capacité de production du programme d'urgence pour le dessalement d'eau de mer (Eau 2021) ».

La société a également souligné que « cette station, considérée comme un défi relevé par le groupe Sonatrach, est une réussite en termes d'acquis grâce aux compétences nationales qui ont su démontrer leur grande maîtrise à toutes les étapes de réalisation jusqu'à la phase d'exploitation, devenant ainsi la troisième station de dessalement d'eau de mer réalisée et exploitée grâce aux efforts nationaux en Algérie ».

Cette station, d'une superficie globale de 6,25 hectares, s'inscrit dans le cadre du plan d'urgence. Après la mise en service des stations de Bateau Cassé (10.000 m3 par jour) et d'El-Marsa (60.000 m3 par jour) à Alger, la station de Corso, une fois opérationnelle, assurera une production de 80.000 m3 supplémentaires dans la wilaya de Boumerdès. **[30]**

Figure 23 : Station de dessalement de l'eau de mer CORSO

IV-2-Localisation géographique de la station :

La réalisation de la SDEM de Corso rentre dans le projet d'urgence initié par Mr le président de la république pour alléger la région d'Alger et Boumerdes ouest est du stress hydrique sur une superficie de 6,15 Ha ; l'assiette se situe à 60 Km à l'ouest d'Alger. **[31]**

Figure 24 : Localisation de station de dessalement de l'eau de mer CORSO

IV-3-Les entreprises contribuant à la construction de la station :

La station de dessalement d'eau de mer de Corso, opérationnelle depuis sa mise en service, est le fruit d'une collaboration tripartite. **Algerian Energy Company (AEC)**, société par actions détenue à 100% par SONATRACH depuis 2018, a joué un rôle de promoteur du projet,

conformément à sa mission de développer des projets d'envergure dans le secteur de Production d'électricité ; Dessalement de l'eau de mer ; Énergies renouvelables.

L'expertise de conception du processus a été assurée par **Metito**, une entreprise émirienne spécialisée dans l'eau et l'environnement, forte de sa vaste expérience dans les installations d'osmose inverse d'eau de mer et déjà impliquée dans des projets similaires en Algérie. La réalisation et la mise en œuvre de cette station ont été confiées conjointement à AEC et à la **Société Nationale des Travaux Publics et du Bâtiment (GCB)**, filiale de Sonatrach spécialisée dans le génie civil et le bâtiment, qui a mis à profit ses compétences en construction mécanique et maintenance industrielle. **[32,33,34]**

Figure 25 : Logos des entreprises contribuant à la construction de la station CORSO (GCB-AEC-METITO)

IV-4-Les étapes de dessalement des eaux de mer :

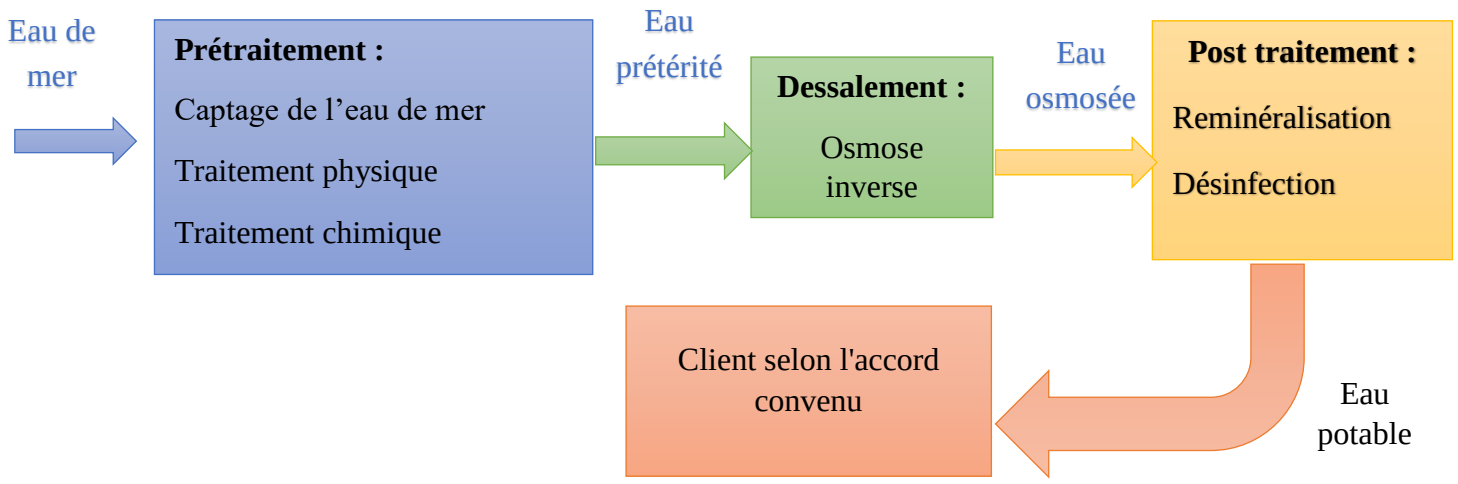


Figure 26 : Schéma générale de dessalement de l'eau de mer

IV-5-Le prétraitement :

IV-5-1-Captage de l'eau de mer :

Afin d'assurer un bon captage de l'eau de mer, deux tours circulaires en béton sont conçues au niveau bathymétrie 14,6 m. chaque tour contient six 6 fenêtres d'admission par des grilles amovible. **[35]**

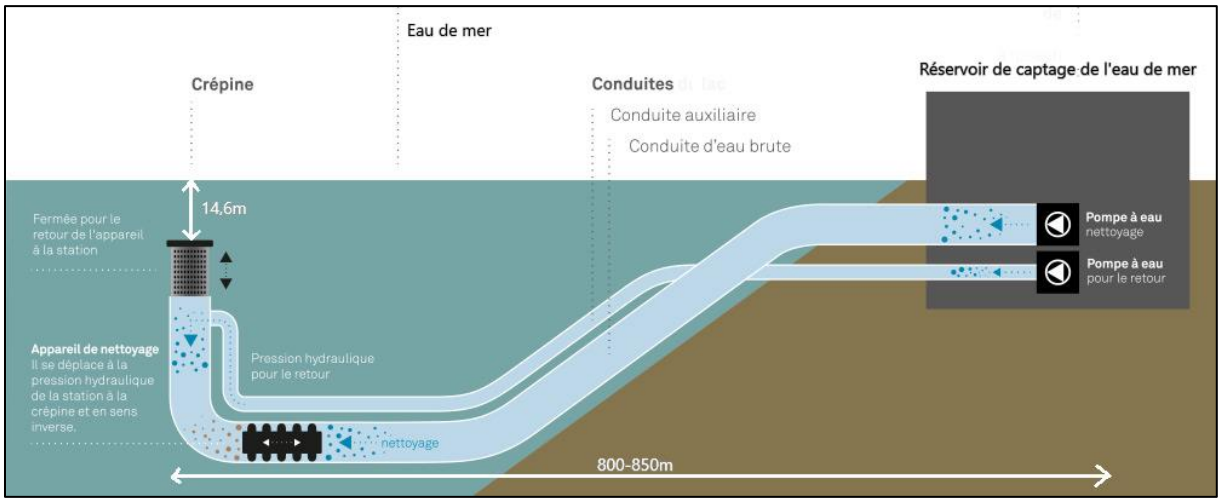


Figure 27 : schéma de captage des eaux de mer

IV-5-2-Traitement physique :

a) Dégrillage :

Pour fileter les grosses particules indésirables

Figure 28 : Dégrillage

b) Tamiseur :

Utilisé pour éliminer les débris fins

Figure 29 : Tamiseur

IV-5-3-Traitement chimique :

a) Dosage de l'hypochlorite de sodium :

-Pour tuer les micro-organismes et bactéries indésirables.

-Dosage choc d'hypochlorite de sodium (12%) dose 10 mg/l de chlore actif par choc.

b) Coagulation :

Il prévu l'installation d'un système de dosage de coagulant inorganique, le chlorure ferrique $FeCl_3$ (concentration 40%).

Les coagulants sont dosés pour obtenir la coagulation des particules très fines en suspension ou colloïdales pour formes des flocs de grande taille ce flocs sont éliminée plus efficacement pendant le processus des filtrations. **[35]**

Figure 30 : Bâche de coagulation

c)Floculation :

Dosage de polymère : Les polymères sont essentiellement dosés pour améliorer le phénomène de floculation de sorte que de très fines particules en suspension ou colloïdale s'adhérent pour formes des flocs de grande taille, qui sont éliminés plus efficacement pendant le processus des filtrations. **[35]**

Figure 31 : Bâche de floculation

d) filtres à sable :

La filtration est une étape majeure de processus de traitement. Un système de filtration est fourni consistant en système de filtration à deux lignes conçus pour alimenter les membranes osmose inverse avec une eau de mer de qualité de composition conforme aux condition requises par le fabricant de membranes [SDI inférieur à 3].

Le système de filtration fonctionnera en ligne directe avec le système RO. Cela signifie que le débit de système de filtration aura une pression résiduelle suffisante pour alimenter l'aspiration des pompes haute pression de l'unité d'osmose inverse est obtenu en contrôlant le débit d'alimentation du système de filtration via une bouche de contrôle qui maintient la pression d'alimentation du système.

La batterie de filtration se compose de seize (16) filtres à sable sous pression horizontaux (8 filtres ligne de production) qui travaillent à une vitesse nominale de 8.34 m^3 / h/m^2 (545m^3/ h), en cas de lavage d'un filtre. chaque filtre à une surface de filtration de 57.2m^2, un diamètre de 8.30 m et une longueur de la partie rectiligne de 15m et du fond bombé de 0.95 m chacune, ils seront construits en acier au carbone revêtue à l'intérieur par de caoutchouc. **[35]**

Figure 32 : Filtre à sable

e) Filtre à cartouches :

- le système de filtre à cartouche est fourni après le filtre à sable comme protection
- la filtration sue cartouche est la dernière étape de prétraitement avent que l'eau ne soit a cheminée vert les unités d'osmose inverse (comme système de sécurité)
- ce système est conçu 2 linges principale à vitesse 10m / h
- 9 filtres (8 en service + 1 réserve) (4 filtres par linge de production) (capacité 950 m3/h)

Figure 33 : Filtre à cartouche

f) Dosage des les métabisulfites de sodium SMBS :(déchloration) :

Les métabisulfites de sodium (SMBS) est ajoute à l'eau d'alimentation des racks OI, il élimine le chlore (déchloration) qui a été ajoute en mont des pompes d'alimentation du filtre pour la désinfection. Même de petites traces de chlore sont nocives pour les membranes RO car le chlore décompose la structure des membranes ce qui entrave par conséquent la capacité de rejet du sel.

La solution SMBS est injectée directement dans la conduite d'eau d'alimentation des racks OI le bisulfite de sodium agit pour neutraliser tout le chlore libre dans l'eau d'alimentation des racks OI. **[35]**

J) Antiscalant :

Antiscalant est un antitartre liquide à base de polyphosphate, utilisé pour prévenir la formation de dépôts dans les systèmes de traitement d'eau par osmose inverse et nanofiltration (NF). Grâce à sa forte capacité de séquestration des cations comme Ca^{2+}, Mg^{2+} et Fe^{2+}, il assure une protection efficace et économique des membranes, tout en étant compatible avec toutes les membranes en polyamide. **[36]**

IV-6-Système d'osmose inverse :

-Produire une eau de salinité 57-178 mg/l

-Le flux d'alimentation suivant les taux respectivement 45 eaux perméat et 55 eaux saumure

-Le flux de production appelé perméat et flux de rejet appelé saumure

-L'unité d'OI se compose de pompes haut pression de tube de pression composant les membranes, d'un dispositif de récupération d'énergie et de pompes booster

Figure 34 : Les racks de membrane

IV-6-1-Récupération d'énergie :

Face à l'intensification des sécheresses, aux effets du changement climatique et à la raréfaction des ressources hydriques, la recherche de solutions durables pour la production d'eau douce est devenue une priorité mondiale. Les pompes de récupération d'énergie jouent un rôle fondamental dans ce contexte, en particulier dans les systèmes d'osmose inverse (SWRO).

Depuis plus de 30 ans, les technologies développées par Energy Recovery permettent d'optimiser la consommation énergétique et de réduire significativement les émissions de carbone dans les processus de dessalement et de traitement des eaux usées. Grâce à ces systèmes, il est possible d'économiser jusqu'à 19,7 millions de tonnes de CO_2 chaque année.

Les dispositifs à haute pression de type PX, fabriqués en céramique d'alumine hautement technique, intègrent une seule pièce mobile, ce qui leur confère une résistance exceptionnelle aux environnements extrêmes ainsi qu'un avantage économique sur l'ensemble de leur cycle de vie. Ils sont utilisés à grande échelle dans des projets de dessalement de toutes tailles à travers le monde, offrant une récupération d'énergie optimale et une efficacité énergétique maximale. **[37]**

Figure 35 : Les pompes PX

IV-7-Post traitement :

IV-7-1- Reminéralisation :

a) Cellules de calcite :

Après la sortie du perméat des racks d'osmose inverse, le flux est divisé en deux parties. La première partie est introduite dans le réservoir de mélange pour être mélangée ultérieurement

avec l'eau reminéralisée tandis que l'autre partie du flux est introduite dans huit (08) cellules de calcite.

Avant d'entrer dans la cellule de calcite, le CO_2 doit être dosé à l'entrée à travers un diffuseur. Le système est équipé de deux transmetteurs indicateurs de débit, chacun associé à un flux.

b) Système de soude caustique NaOH :

À ce stade, ils injectent une solution de NaOH dans l'eau pour ajuster et augmenter l'acidité de l'eau afin qu'elle soit égale à la valeur de l'eau potable.

IV-7-2-Désinfection :

La dernière étape du traitement de l'eau est la désinfection qui peut être effectuée par différentes méthodes. L'une des méthodes de désinfection est réalisée par l'hypochlorite. La dose habituelle est de 1 ppm.

IV-8-Les analyses physico-chimiques dans la station :

a) Ph :

Le pH, abréviation de potentiel hydrogène, est une mesure qui permet de déterminer le degré d'acidité ou de basicité d'une solution. Le pH n'a pas d'unité de mesure.

L'échelle de pH permet de comparer le caractère acide, neutre ou basique des solutions. L'échelle de pH varie généralement de 0 à 14.

Figure 36 : pH mètre

b) Conductivité :

Grandeur physique σ, caractérisant la capacité de conduction d'une substance, égale au rapport de la densité de courant électrique j traversant la substance au champ électrique appliqué E (j = σE). [L'unité SI de conductivité électrique est l'ohm−1. mètre−1 (Ω−1. m−1), ou siemens par mètre (S. m−1).]

Figure 37: Conductivité mètre

c) Turbidité :

Courant sous-marin charriant à forte vitesse des particules en suspension (argile, limon et sable mêlés) et s'écoulant sur le lit des canyons en traversant des couches de densité moindre.

Figure 38 : Turbidimètre

d) Test la dureté totale :

- Prélever 50 ml d'eau produit dans un bécher, rajouter 1mL de la solution tampon de pH 10.
- Ajouter 7 gouttes de l'indicateur coloré Noir Ériochrome (NET) La solution devient bleu.
- Remplir la burette jusqu'au zéro avec la solution d'Éthylène Diamine Tétra Acétique (EDTA).
- Placer la solution à tester sur un agitateur magnétique sous la burette.
- Ajouter très progressivement l'EDTA à la solution colorée jusqu'au changement de couleur violet.

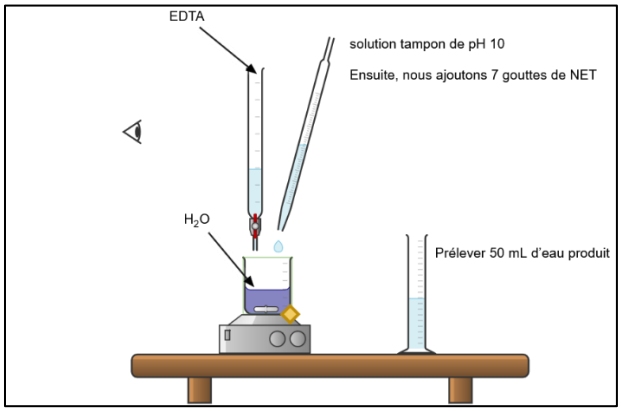


Figure 39 : Schéma de la dureté totale avant étalonnage

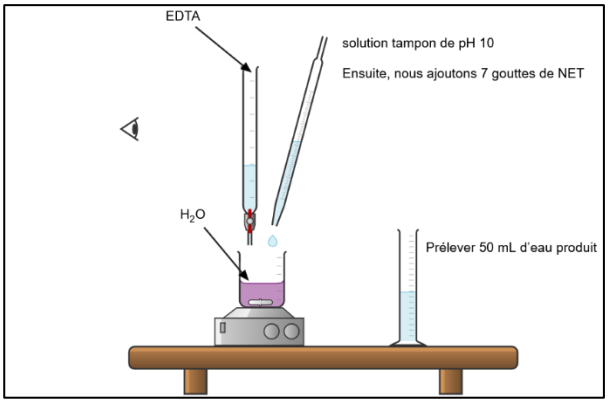


Figure 40 : Schéma de la dureté totale après étalonnage

e) Dureté calcique :

- Prélever 50 ml d'eau produit dans un bécher, ajouter 2 ml de NaOH, Ajouter l'indicateur coloré Murexide La solution devient rose.
- Placer la solution à tester sur un agitateur magnétique sous la burette.
- Ajouter très progressivement l'EDTA à la solution colorée jusqu'au changement de couleur violet

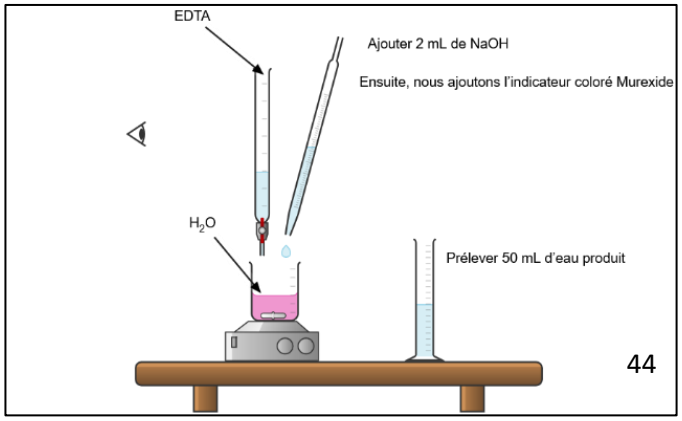


Figure 41 : Schéma de la dureté calcique avant étalonnage

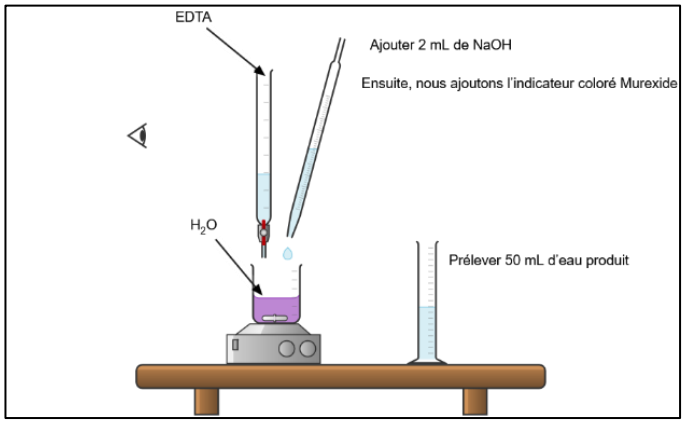


Figure 42 : Schéma de la dureté calcique après étalonnage

f) Alcalinité TA+TAC :

-Titrage de TA (Titre Alcalimétrique) :

- Prélever 50 ml d'eau produit dans un bécher
- Ajouter 2-3 gouttes de l'indicateur phénolphtaléine à l'échantillon.
- Placer la solution à tester sur un agitateur magnétique sous la burette.
- Ajouter très progressivement acide sulfurique

Si l'échantillon devient rose, cela indique la présence de TA, Si l'échantillon reste incolore, la TA est nulle. Passez directement à l'étape du titrage de l'alcalinité totale.

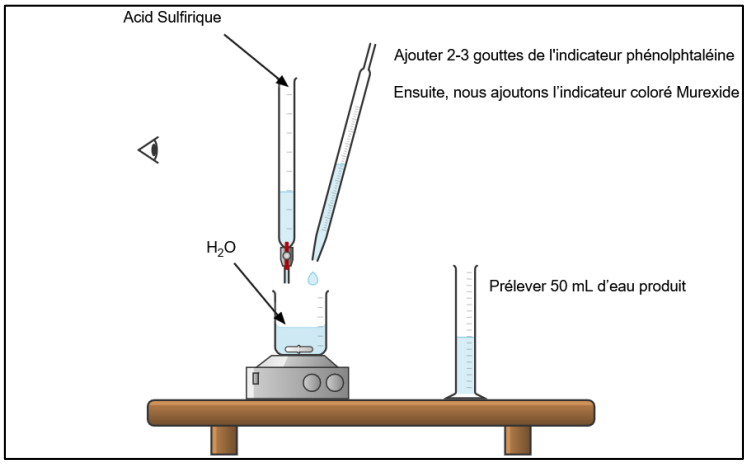


Figure 43 : Schéma de la TA après étalonnage

-Titrage TAC (Titre Alcalimétrique Complet) :

- Dans le même échantillon (après le titrage de TA ou l'échantillon était initialement incolore avec la phénolphtaléine), ajouter 2-3 gouttes de l'indicateur méthyl orange la solution vire de l'orange.
- Continuez le titrage avec l'acide sulfurique depuis le volume déjà noté.
- Le virage de l'indicateur se produit lorsque la couleur change de manière nette et persistante rouge brique.

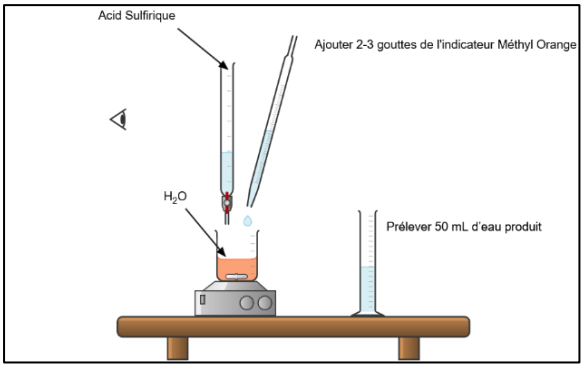


Figure 44 : Schéma de la TAC avant étalonnage

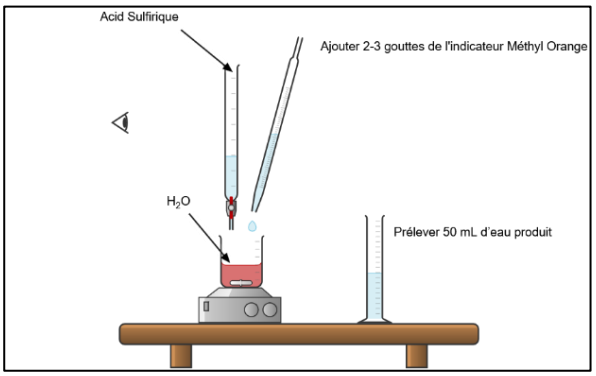


Figure 45 : Schéma de la TAC après étalonnage

g) Comparateur colorimétrique : Test colorimétrique du chlore libre (par DPD) :

Dans une solution faiblement acide le chlore libre réagit avec le diéthyl-p-phénylènediamine (DPD) pour donner un colorant rouge violet. La concentration en chlore est déterminée semi-quantitativement par comparaison visuelle de la couleur de la solution à mesurer avec les zones colorées d'une carte colorimétrique.

Figure 46 : Colométrique

h) Test de L'indice de saturation de Langelier (LSI) :

L'indice de saturation de Langelier (LSI) permet de définir la tendance agressive ou incrustante d'une eau. Il est calculé selon la formule suivante :

$$LSI = pH - pHs$$

à partir des paramètres suivants :

- Potentiel en Hydrogène (pH)
- Potentiel en Hydrogène de saturation (pHs)

Si LSI = 0 alors l'eau est inerte ; Si LSI < 0 alors l'eau est agressive ; Si LSI > 0 alors l'eau est incrustante.

$$pHs=(9.3+A+B) -(C+D)$$

A= (Log [TDS]-1)/10

B=-13.12*Log(°C+273) +34.55

C=log $[Ca^{2+}]$ en $CaCO_3$

D= log [alcalinité] en CaCO3

i) Test TDS:

Les « Total des Solides Dissous » se réfèrent à tous minéraux, sels, métaux, cations ou anions dissous dans l'eau. Cela inclut n'importe quel élément présent dans l'eau autre que les molécules H2O.

Un TDS mètre mesure la conductivité (EC) de l'eau ; l'eau pure ayant une conductivité de 0.

$$TDS\ (mg/L) = K \times Conductivities\ (\mu S/cm)$$

K : est un facteur de conversion qui dépend de la composition chimique de l'eau, généralement compris entre 0.5 – 0.7.

j) Test MES :

La présence de matière en suspension tout comme de matière organique affecte la qualité de l'eau. Elles indiquent la présence dans la colonne d'eau de particules plus grosses que 0,45 µm.

Elles servent d'indicateur de la qualité de l'eau et de sa turbidité. Ces solides en suspension sont généralement des matières décantables, sous forme de boues

$$MES\ (mg\ /l) = \frac{(m1 - m0)}{V}$$

m_0 : masse du filtre à vide (en mg)

m_1 : masse du filtre après filtration et séchage (en mg)

V : volume d'eau filtrée (en L)

IV-9-La norme algérienne de l'eau potable :

Les paramètres de qualité de l'eau destinée à la consommation humaine sont définis conformément aux dispositions du décret exécutif n° 11-125 du 22 mars 2011, publié au Journal officiel de la République algérienne. **[38]**

Tablea3 : Normes algériennes de l'eau potable **[26]**

Paramètres	Unités	Valeurs limites
Alcalinité	mg/L en $CaCO_3$	500
Calcium	mg/L en $CaCO_3$	200
Chlorures	mg/L	500
Concentration en ions hydrogène	/	≥6.5 et ≤9
Conductivité à °C	µs/cm	1500
Dureté	mg/L en $CaCO_3$	200
Potassium	mg/L	12
Résidu sec	mg/L	1500
Sodium	mg/L	200
Sulfates	mg/L	400
Température	°C	25
TDS	mg/L	500

IV-10-Résultats et discussion :

IV-10-1-La température :

Le schéma présenté est un histogramme à barres groupées illustrant l'évolution des valeurs mensuelles (de Février à Mai) pour différents ouvrages, désignés par des abréviations (CaP, E.F.Sa, OI, etc.).

Avec :

- Ca P : captage de l'eau
- E.F.Sa : entrée filtre sable ligne a
- E.F.Sb : entée filtre sable ligne b
- S.F.Sa : sortie filtre sable ligne a
- S.F.Sb : sortie filtre sable ligne b
- S.F.Ca : sortie filtre cartouche ligne a
- S.F.Cb : sortie filtre cartouche ligne b
- OI : osmose inverse

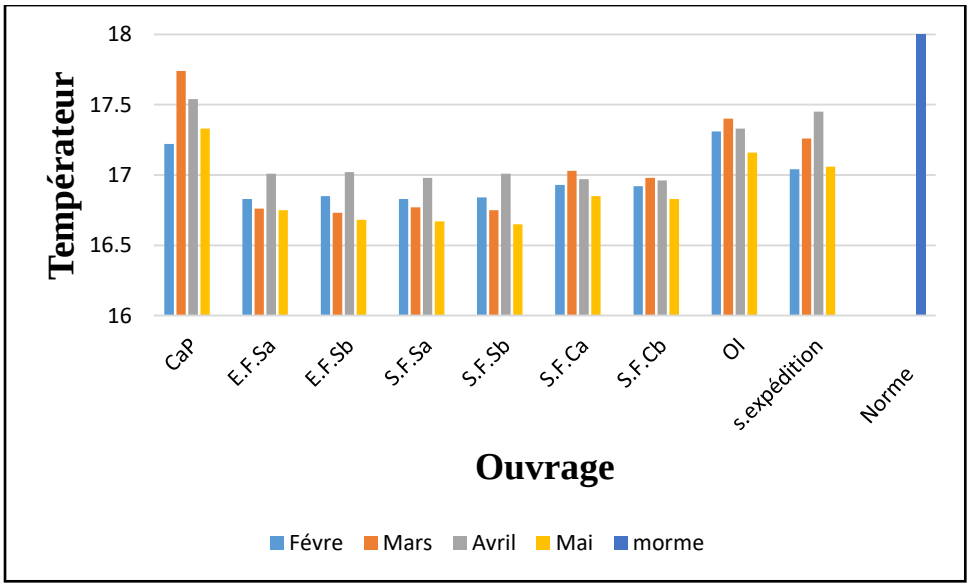


Figure 47 : Diagramme de température

Les températures relevées au cours des différents mois présentent globalement peu de variations significatives. Le mois de Mai affiche des valeurs relativement similaires à celles

des mois précédents, avec de légères fluctuations selon les points de mesure. Ces écarts, bien que visibles sur le graphique, restent faibles et ne traduisent pas une évolution notable. Ainsi, la température apparaît comme un paramètre relativement stable au cours de la période étudiée.

IV-9-2-La turbidité :

Le tableau suivent exprime les valeurs de turbidité de l'eau (en NTU ou unité équivalente) mesurées à différents ouvrages sur la période Février à Mai.

Tableau 4: Les valeurs de turbidité

Ouvrage	Février	Mars	Avril	Mai
Captage des eaux	0.99	0.88	1.11	2.76
Entrée filtre à sable ligne a	0.82	0.7	0.78	2.35
Entrée filtre à sable ligne b	0.89	0.63	0.77	2.33
Sertie filtre à sable ligne a	-	<0.01	<0.01	<0.01
sortie filtre à sable ligne b	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Sortie filtre cartouche ligne a	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Sortie filtre cartouche ligne b	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Osmose inverse	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
Sotie d'expédition	0.04	-	0.065	0.04
Norme	5 NTU			

La turbidité reflète la présence de particules en suspension dans l'eau. Plus elle est élevée, plus l'eau est trouble, ce qui peut poser problème pour la potabilisation et les écosystèmes aquatiques.

Nous constatons dans le tableau que le taux de turbidité varie d'un ouvrage à l'autre, et cela détermine le pourcentage d'eau produite, comme nous le constatons :

Dans les ouvrages CaP, E.F.Sa, E.F.Sb, la turbidité de l'eau augmente, notamment en février et en mai, ce qui indique des précipitations ou une accumulation de sédiments.

En ce qui concerne les ouvrage S.F.Sa, S.F.Sb, S.F.Ca, S.F.Cb, OI, l'eau de ces ouvrages est considérée comme très claire en raison de la qualité et de la précision du processus de dessalement de l'eau, car la valeur de turbidité est considérée comme très négligeable.

IV-9-3-Conductivité :

Le schéma présent l'évolution des valeurs cumulées mensuelles (Février à Mai) pour différents ouvrages : OI, sortie expédition, S.F.Ca, et S.F.Cb.

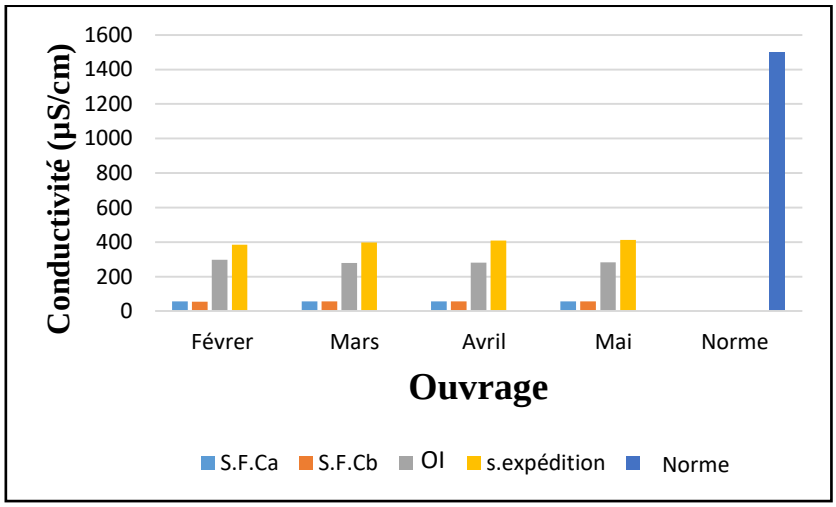


Figure 48 : Diagramme de la conductivité

Le diagramme montre l'évolution mensuelle de la conductivité de Février à Mai pour plusieurs points du traitement. La **sortie expédition** présente les valeurs les plus élevées (~400 µS/cm), indiquant une forte présence d'ions dissous. En revanche, les points **S.F.Ca** et **S.F.Cb** affichent des valeurs faibles et stables (~50 µS/cm), témoignant de l'efficacité du traitement. L'**OI** présente une conductivité intermédiaire, suggérant un prétraitement de l'eau brute. Ces résultats confirment la performance du processus de dessalement.

IV-9-4- Solides Totaux Dissous (TDS) :

Le diagramme à barres présente l'évolution des valeurs du Total des Solides Dissous (TDS) pour quatre entités distinctes (OI, sortie expédition, S.F.Ca, S.F.Cb) sur une période de quatre mois : Février, Mars, Avril et Mai.

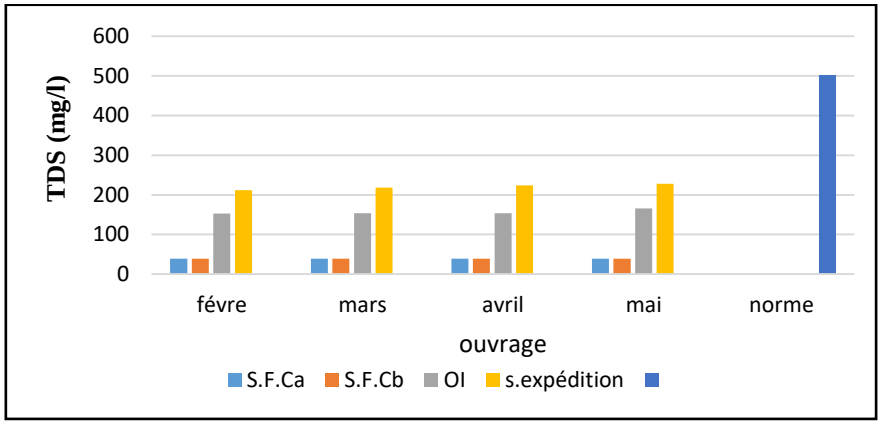


Figure 49 : Diagramme de TDS

"OI" : Les valeurs de TDS pour cette entité sont relativement stables sur la période. Elles sont d'environ 152 en Février, 153 en Mars, 155 en Avril et 165 en Mai. On note une très légère tendance à l'augmentation au mois de mai, mais la variation globale est minime, suggérant une source ou un traitement avec une composition en TDS assez constante.

s.expédition" : Cette entité présente une légère augmentation progressive du TDS sur les quatre mois. Cette légère hausse continue du TDS pourrait indiquer une concentration progressive des solides dissous, potentiellement due à l'évaporation, à des apports continus de minéraux ou d'autres contaminants, ou à des changements dans les conditions environnementales affectant la dissolution des solides.

"S.F.Ca" et "S.F.Cb" : Les valeurs de TDS pour ces deux entités sont remarquablement constantes et faibles sur l'ensemble de la période, se situant autour de 40 mg/l pour chaque mois. Cette stabilité et ces faibles niveaux de TDS suggèrent une eau très pure ou ayant subi un traitement d'élimination des solides dissous (comme l'osmose inverse, d'où le "OI" qui pourrait être une référence, mais pour les deux catégories distinctes "S.F.Ca" et "S.F.Cb", cela indique une source d'eau très peu minéralisée ou un traitement très efficace).

IV-9-5-Matière on suspension (MES) :

Le diagramme à barres illustre l'évolution des concentrations de Matière en Suspension (MES) dans le réservoir d'eau de mer "Cap" sur une période de quatre mois : Février, Mars, Avril et Mai.

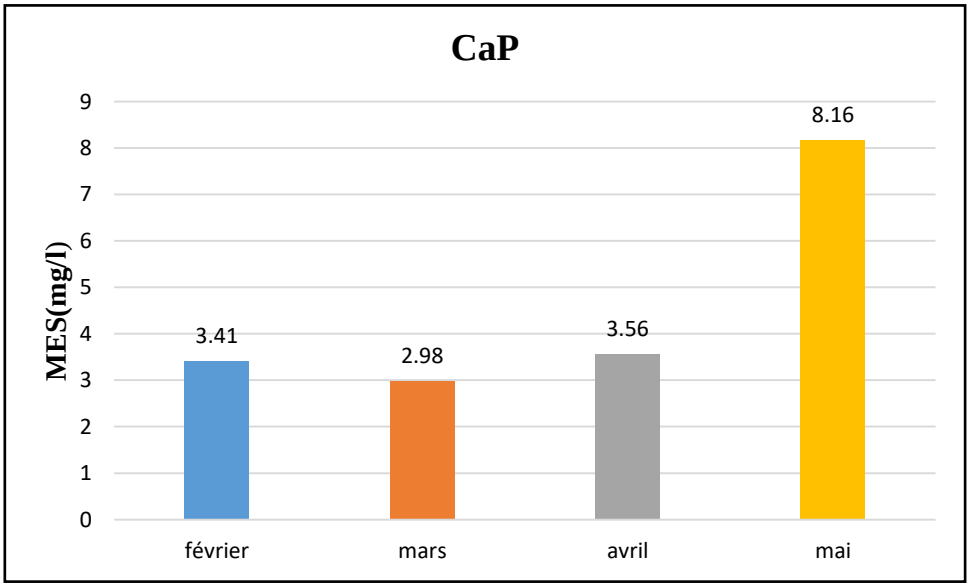


Figure 50 : Diagramme de MES

Au cours des trois premiers mois, les niveaux de MES dans le réservoir CaP sont relativement stables et se situent dans une fourchette très faible. En le mois de Février la concentration est d'environ 3.4 mg/l. Le mois de Mars : Environ 3.0 mg/l de MES, et Avril : Environ 3.6 mg/l de MES.

Ces valeurs indiquent une eau relativement claire, avec une faible quantité de particules en suspension. Les légères fluctuations peuvent être attribuées à des variations naturelles, des courants faibles, ou des apports minimes de sédiments ou de particules organiques.

Le mois de mai révèle une augmentation spectaculaire et très significative de la concentration en MES. La valeur bondit à environ 8.1 mg/l de MES. Cette valeur est plus du double de celle d'avril et représente le niveau le plus élevé enregistré sur la période.

IV-9-6-Dureté totale TH :

Le diagramme à barres présente l'évolution de la dureté totale de l'eau de la sortie d'expédition de l'eau produit sur une période de quatre mois : février, mars, avril et mai.

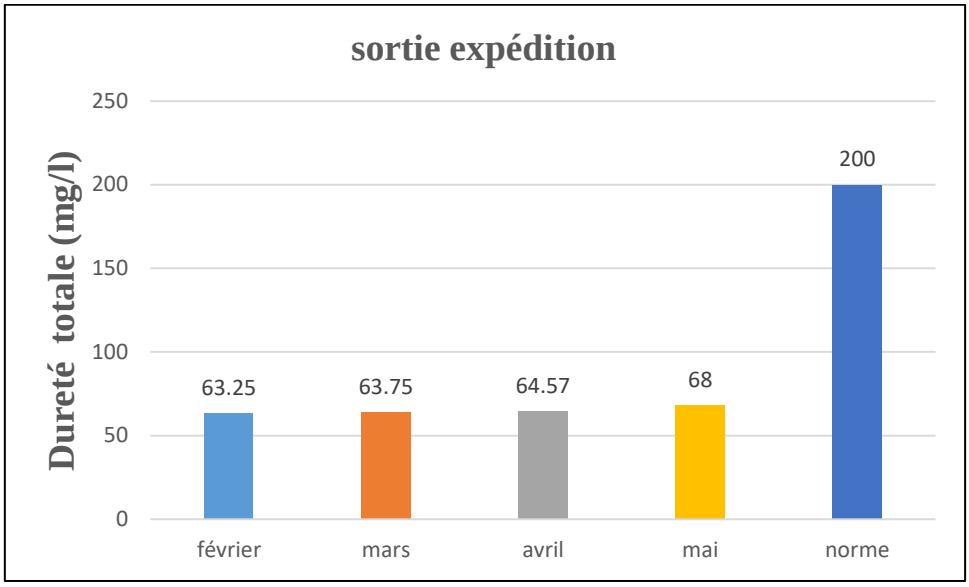


Figure 51 : Diagramme de dureté totale

Le graphique montre une augmentation progressive et constante de la dureté totale de l'eau produite par "sortie expédition" au fil des mois :

Février : La dureté totale est d'environ 63.3 mg/l.

Mars : La dureté totale augmente légèrement pour atteindre environ 63.7 mg/l.

Avril : La dureté totale continue d'augmenter pour atteindre environ 64.5 mg/l.

Mai : L'augmentation est plus marquée, la dureté totale atteignant environ 68 mg/l.

IV-9-7-Alcalinité :

Le diagramme à barres présente l'évolution des niveaux d'alcalinité de l'eau produite par la sortie d’expédition sur une période de quatre mois : février, mars, avril et mai.

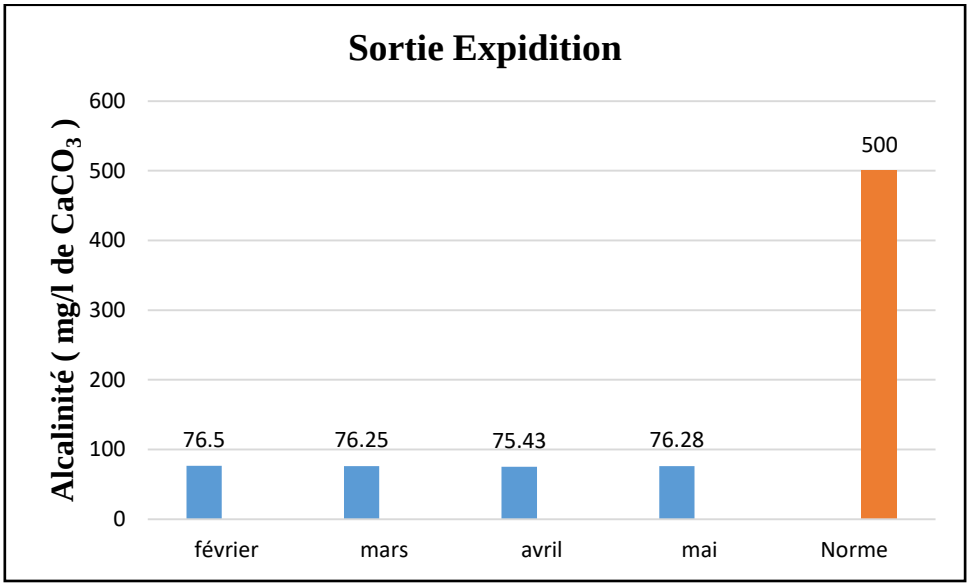


Figure 52 : Diagramme de l'alcalinité

L'évolution de l'alcalinité de l'eau produite par "sortie expédition" montre une tendance à la baisse entre février et avril, suivie d'une légère remontée en mai.

Le graphique révèle une dynamique des niveaux d'alcalinité de l'eau expédiée par "sortie expédition" sur la période de quatre mois. Après un pic en février, l'alcalinité a diminué progressivement jusqu'en avril avant de remonter en mai. Ces fluctuations, même si elles sont relativement faibles en valeur absolue, nécessitent une compréhension des processus de production et des sources d'eau pour déterminer si elles sont le résultat de variations naturelles, de changements dans la qualité de l'eau brute, ou d'ajustements/problèmes dans le système de traitement. Une surveillance continue est essentielle pour assurer la stabilité et la conformité de l'alcalinité de l'eau produite.

IV-9-8-L'indice de saturation de Langelier (LSI) :

Commentaire sur les valeurs du LSI (Indice de Saturation de Langelier) de l'eau produite da ns sorti d’expédition au cours des quatre mois (Février, Mars, Avril, Mai)

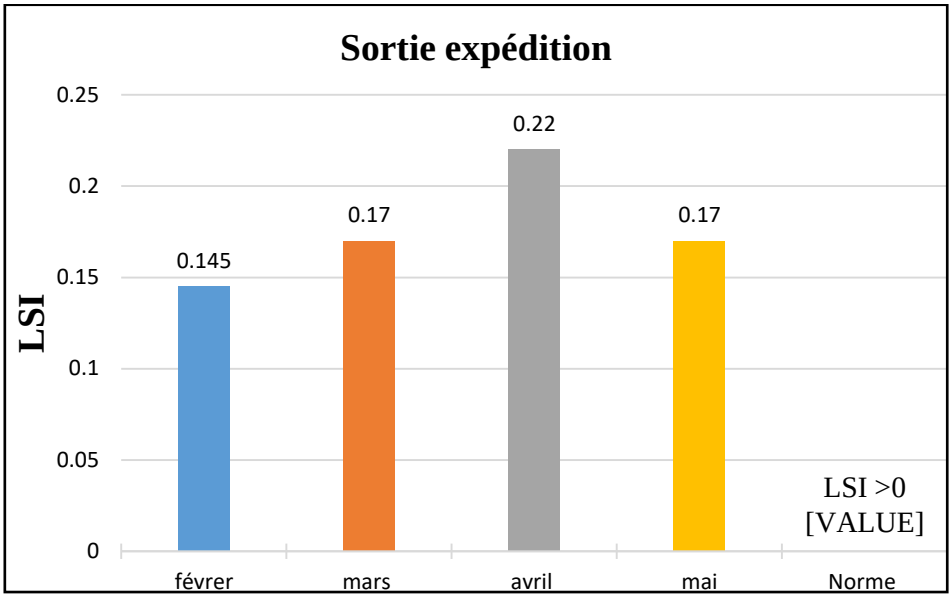


Figure 53 : Diagramme de LSI

Le graphique met en évidence que l'eau produite de la sortie d'expédition" présente une tendance constante à l'entartrage (LSI > 0) sur les quatre mois. La période d'avril est la plus critique avec le LSI le plus élevé, indiquant le risque le plus fort de formation de tartre. La légère diminution en mai est positive, mais une surveillance continue et potentiellement des mesures correctives (ajustement du traitement de l'eau, contrôle de la qualité de l'eau brute) sont nécessaires pour maintenir le LSI dans une plage acceptable et minimiser les problèmes d'entartrage dans les systèmes utilisant cette eau.

Conclusion :

Les mesures des paramètres physico-chimiques (température, turbidité, conductivité, TDS, MES, TH, alcalinité et LSI) réalisées de février à mai confirment la bonne performance du système de traitement de l'eau. Les faibles valeurs de turbidité, TDS et MES en sortie des unités (S.F.C.a, S.F.C.b, O

I) démontrent une excellente efficacité du dessalement.

Malgré une légère augmentation de la conductivité et de la dureté totale à la sortie finale, celles-ci restent conformes aux limites algériennes. L'évolution de l'alcalinité et du LSI souligne l'importance d'un suivi régulier pour maîtriser les risques de corrosion ou d'entartrage.

La qualité de l'eau produite est validée. Un contrôle continu est toutefois indispensable pour maintenir cette performance et garantir la conformité réglementaire.

Conclusion générale :

À travers cette étude, nous avons pu mettre en évidence l'importance stratégique du dessalement de l'eau de mer dans un pays comme l'Algérie, confronté à un stress hydrique permanent, notamment dans les régions côtières.

Les travaux réalisés au sein de la station de dessalement de Corso (wilaya de Boumerdès) nous ont permis de mieux comprendre les différentes étapes du traitement de l'eau de mer, depuis la phase de captage jusqu'au post-traitement, en passant par l'utilisation de la technologie de l'osmose inverse.

Le suivi des analyses physico-chimiques effectuées de manière routinière au laboratoire interne a révélé une conformité générale aux normes de potabilité définies dans le Journal Officiel algérien. Cette étude nous a également permis d'observer la rigueur avec laquelle les techniciens surveillent chaque paramètre afin de garantir une qualité constante de l'eau produite.

Ce stage nous a offert une opportunité précieuse de confronter les connaissances théoriques acquises durant notre formation académique à la réalité du terrain. Il a également mis en lumière les principaux défis auxquels sont confrontées les stations de dessalement, tels que la gestion des rejets (eaux saumâtres, cartouches filtrantes usagées), l'impact environnemental et les incidents techniques potentiels.

Référence bibliographique :

[1] Kettab, A. & Bessenasse, M. (s.d.). *Dessalement d'eau de mer : option incontournable pour l'Algérie* [Communication scientifique ou rapport de recherche]. Laboratoire LRS-EAU, École Nationale Polytechnique, Alger.

[2] BEN DADI, M., « تحلية مياه البحر في الجزائر. رؤية استراتيجية لتحقيق الاكتفاء المائي », Elayem News, 12 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur : https://elayem.news/161430.html (consulté le 27 mai 2025).

[3] SEDDIKI, N., Analyse du procédé de dessalement de l'eau de mer et de la qualité physico-chimique de l'eau dessalinisée de la station de dessalement de Tigzirt. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Mémoire de Master, Faculté de l'eau et de l'environnement, 2023, p. 19.

[4] AMOURA,C.,Toumi, R., Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse. Université Badji Mokhtar – Annaba, Mémoire de Master, Génie des procédés de l'environnement, 2020, p. 4

[5] MOLINERO, J-C.,La composition de l'eau de mer : une histoire à réécrire. [En ligne]. Disponible sur : https://www.ird.fr/la-composition-de-leau-de-mer-une-histoire-reecrire (consulté le 19 mars 2025).

[6] RENAUDIN, V.,Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. CultureSciences-Chimie, ENS Paris. [En ligne]. Publié le 18 novembre 2003. Disponible sur : https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-physique/thermodynamique-chimique/le-dessalement-de-l-eau-de-mer-et-des-eaux (consulté le 13 avril 2025).

[7] BELMAHI, I.,Dessalement de l'eau de mer : la solution pour sauver l'Algérie de la crise de l'eau. [En ligne]. Disponible sur : https://rosaluxna.org (consulté le 20 mars 2025).

[8] MISSAOUI, M., BENDAOUD, A., Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse. Université Belhadj Bouchaib – Aïn Témouchent, Mémoire de Master, Génie des matériaux, 2024,page 6

[9] RENAUDIN, V., Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. CultureSciences-Chimie, ENS Paris. [En ligne]. Disponible sur : https://culturesciences.chimie.ens.fr/thematiques/chimie-physique/thermodynamique-chimique/le-dessalement-de-l-eau-de-mer-et-des-eaux (consulté le 10 avril 2025)

[10] PLAN D'ACTION POUR LA MÉDITERRANÉE (8e session ; 2001 ; Athènes). Évaluation des impacts sur l'environnement et lignes directrices proposées pour la gestion de la saumure. Athènes : Éditions Scientific, 2001, 92 pages

[11] GHAZI, M., Modélisation, analyse thermo-économique et optimisation du procédé de dessalement d'eau de mer par évaporation à effet multiple combiné avec les technologies d'énergie renouvelables. Ecole Mohammadia d'Ingénieurs – Rabat, Maroc, Thèse de Doctorat, Génie des procédés industriels, 2020, 2026 pages

[12] YOUSEF, M,S., et HASSAN, H., Solar desalination with energy storage , in Energy Storage for Multigeneration Desalination, Power, Cooling and Heating Applications, 2023, pp. 221–249

[13] BANDELIER, P., Le dessalement d'eau de mer et des eaux saumâtres. Encyclopédie de l'énergie. [En ligne]. Disponible sur : https://www.encyclopedie-energie.org/le-dessalement-deau-de-mer-et-des-eaux-saumatres/ (consulté le 10 mars 2025)

[14] PERREAU, B., Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres : les techniques d'hier et d'aujourd'hui. Contexte économique et perspectives. Montpellier : ENGREF – Centre de Montpellier, 1998, 25 pages

[15] SAAVEDRA, A.,VALDÉS, H., MAHN, A.,ACOSTA, O., Comparative analysis of conventional and emerging technologies for seawater desalination: Northern Chile as a case study , Developments in Innovative Membrane Desalination Processes, vol. 11, no. 3, 2021, article 180. https://doi.org/10.3390/membranes11030180

[16] CHERAITIA, A., Membranes et procédés membranaires. Université 08 Mai 1945 – Guelma, Mémoire de Master, Chimie industrielle, 2015, 69 pages.

[17] LACROIX, C., Procédé thermo-hydraulique solaire pour le dessalement par osmose inverse. Université de Perpignan Via Domitia – France, Thèse de Doctorat, Sciences de l'ingénieur, 2020, 203 pages

[18] ROAGUA. Quels sont les avantages et les inconvénients des membranes d'ultrafiltration, de nanofiltration et d'osmose inverse pour le traitement de l'eau ?. [En ligne]. Disponible sur : https://www.roagua.com/fr/news/what-are-the-advantages-and-disadvantages-of-ultrafiltration-nanofiltration-and-reverse-osmosis-membranes-for-water-treatment/ (consulté le23mars2025).

[19] CHENAOUI, B., Impact du dessalement de l'eau de mer sur l'environnement : cas de la station de Mainis, Wilaya de Chlef. Université de Chlef, Rapport académique, 8 pages

[20] LECOMTE, V., Le dessalement de l'eau de mer : quels impacts sur l'environnement. Ecotoxicologie.fr, octobre 2014. [En ligne]. Disponible sur : https://ecotoxicologie.fr/impacts-dessalement-eau-mer (consulté le 13 juin 2025).

[21] MANSOUR, M., Dessalement au Maghreb : plus de 40 % des besoins de ce pays comblés. La Nouvelle Tribune, 4 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur :

https://lanouvelletribune.info/2025/03/dessalement-au-maghreb-plus-de-40-des-besoins-de-ce-pays-combles/ (consulté le 13 juin 2025).

[22] La Nouvelle Tribune. Dessalement au Maghreb : plus de 40 % des besoins de ce pays comblés. La Nouvelle Tribune, 4 mars 2025. [En ligne]. Disponible sur : https://lanouvelletribune.info/2025/03/dessalement-au-maghreb-plus-de-40-des-besoins-de-ce-pays-combles/ (consulté le 13 juin 2025)

[23] LIM, Y., NADZRI, N., XUE, Q., LI, C., WANG, R., Investigating the impact of TFC membrane structure and compaction on performance in hypersaline brine desalination via high-pressure reverse osmosis , Desalination Volume 607, 15 July 2025, 118793, 2025.

[24] Mostefaoui, L**.** *Dessalement d'eau de mer par osmose inverse, fonctionnement et effets des paramètres sur le rendement* ,Mémoire de Master, Centre Universitaire BELHADJ Bouchaib d'Ain-Temouchent, Département de Génie de l'eau et de l'environnement

[25] HYDROBIOS. Quelles sont les différences entre l'osmose et l'osmose inverse ? FranceEnvironnement. [En ligne]. Disponible sur : https://www.franceenvironnement.com/question/quelles-sont-les-differences-entre-losmose-et-losmose-inverse-ij-2021-01-27 (consulté le 24 avril 2025).

[26] LG Chem. Principles of Osmosis and Reverse Osmosis. [En ligne]. Disponible sur : https://www.lgchem.com/product-detail/ro-membrane (consulté le 26 avril 2025).

[27] MAUREL, A.,Techniques séparatives à membranes – Considérations théoriques, Pression osmotique. 2024.

[28] DICK, R., ABOULKEIR, S., DIXMIER, F. Traitement par osmose inverse de vins de consommation courante en vue d'augmenter leur teneur en alcool , Le Lait, vol. 64, no. 633–634, 1984, pp. 163–180. (Page citée : p. 165).

[29] BERLAND, J-M., JUERY, C., Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau. Document technique, n° 14, 2002, 71 pages.

[30] YASMINE, H. Boumerdès : la station de dessalement de Corso entre en phase de production totale , Maghreb Info, 25 septembre 2023. [En ligne]. Disponible sur : https://www.maghrebinfo.dz/2023/09/25/boumerdes-la-station-de-dessalement-de-corso-entre-en-phase-de-production-totale/ (consulté le 27 février 2025).

[31] Google Maps. Localisation de la station de dessalement de Corso, Boumerdès. Image satellite. [Consulté le : 27 février 2025]. https://www.google.com/maps

[32] Algerian Energy Company (AEC). Site officiel de l'entreprise. [En ligne]. Disponible sur : https://aec.dz/ (consulté le 13 avril 2025).

[33] Metito. About Metito Utilities. Site officiel de Metito. [En ligne]. Disponible sur :

https://www.metito.com/about-metito-utilities/ (consulté le 13 avril 2025).

[34] GCB – Groupe Cosider. Présentation de la société. Site officiel de GCB. [En ligne]. Disponible sur : https://www.gcb.dz/la-societe/presentation/ (consulté le 13 avril 2025).

[35] Algerian Energy Company, Metito, Génie Civil et Bâtiment. Description du processus de dessalement. Rapport technique, 2022.

[36] SARL Alger Chimie. Fiche technique – SACH ANTISCALANT S30. Z.I Oued Smar, Alger : Alger Chimie, s.d. [Consulté le : 13 juin 2025].

[37] Energy Recovery Inc.Site officiel de la société Energy Recovery. [En ligne]. Disponible sur : https://energyrecovery.com/ (consulté le 13 avril 2025).

[38] République Algérienne Démocratique et Populaire. Décret exécutif n° 11-125 du 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine, Journal Officiel de la République Algérienne, n° 18, 23 mars 2011, pp. 6–9. [En ligne]. Disponible sur : https://www.joradp.dz/ (consulté le 13 juin 2025).