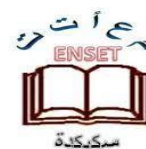




République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement
Technologique-Skikda



Département de Technologie

Filière : Génie des procédés.

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
professeur de l'enseignement secondaire technique

Thème :

**Etude du procédé de dessalement de l'eau de mer et de la qualité
physico-chimique de l'eau dessalée par la station du complexe
pétrochimique Polymed CP2/K de la Wilaya de Skikda-TENEURS :
CATIONS, ANIONS**

Présenté par : Bousskine Djihane Hammouche Fareh Messahel Imane

Jury de Soutenance :

Nom et prénom	Grade	Université	Rôle
Kraim Khayreddine	MCA	Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique-Skikda	Président
Boukerche Ikram	MCA	Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique-Skikda	Encadrant
Bariout Hicham	Injénieur	Sonatrach CP2/K	Co-Encadreur
Mamine Hadjer	MCB	Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technologique-Skikda	Examineur

Année Universitaire : 2023-2024

REMERCIEMENTS

En préambule de ce mémoire, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Allah Tout-Puissant, qui a éclairé notre chemin et nous a insufflé la force et la persévérance nécessaires pour mener à bien nos études.

*Nos sincères remerciements s'adressent à notre directrice de travail, Mme Dr. **BOUKERCHE Ikram**, pour son encadrement et ses conseils avisés qui ont été des éléments déterminants dans la réalisation de ce travail.*

*Nous tenons également à exprimer notre plus haute gratitude et notre profonde reconnaissance à M. **RAHMOUNI Saleh** « chef du département de technologie » pour son soutien indéfectible, ses encouragements constants et les facilités qu'il nous a accordées tout au long de ces cinq années d'études.*

*Nos vifs remerciements vont également à M. **BARJOUT Hicham** « chef du service des utilités » et à M. **OURGLI Housseem** « Ingénieur exploitant » pour leur collaboration constructive, leur expertise technique et leur disponibilité constante et de nous avoir accordé leur temps précieux*

Nous remercions également tous les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail

*-Dr. **KRAIM khayer eddine***

*-Dr **MAMINE hadjer***

Nous dédions ce travail à notre famille et à nos amis qui ont été notre soutien et notre force tout au long de notre parcours universitaire. Leur présence, leurs encouragements et leur amour nous ont permis de persévérer et de concrétiser nos objectifs.

Avec nos sincères remerciements et notre profonde gratitude.

Dédicace

Je dédie un mot de fin d'études à l'âme de mon père Comme on a dit, chaque fille admire son père. Mon père, tu es la personne formidable dont je ne regrette jamais d'avoir jamais été fier.

À ma chère maman

Source de tendresse et d'amour, symbole de générosité et de sacrifice, Je dédie le fruit de mes efforts et de mes années d'études, cette recherche modeste, comme un symbole de gratitude et d'appréciation pour tout le soutien inlassable que tu m'as apporté. Je prie Dieu de te donner santé et bien-être, avec tout mon amour, mon estime et ma fidélité.

À mes chers Meriem et Abdelmouiz

Merci d'être toujours à mes cotes, et de partager mes joies et mes peines.

À mon compagnon de vie

Je dédie cette recherche en signe de ma sincère gratitude pour tout ce que tu m'as apporté tout au long de mes études. Merci beaucoup pour ta confiance en ma réussite et pour m'avoir poussé vers le meilleur.

À l'âme de Mon grand-père

Vos paroles et vos sages conseils ont été une bénédiction pour moi à chaque étape. Mes prières sont pour que vous soyez au paradis.

À ma chérie Imane

Je suis très chanceuse de t'avoir dans ma vie. Merci d'être toujours à mes côtés. Je t'aime beaucoup

À ma famille Je vous dédie cette humble réalisation en guise d'expression de mes sincères remerciements et de mon amour pour vous.

À mes chers amis, Djihane, Aya, Nada, Manel, Hanane.

Merci pour les beaux moments que nous avons passés ensemble.

Dédicace

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers,

A MON TRÈS CHER PAPA

Le symbole de ma droiture, de sa générosité, et sa tendresse. Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consenti pour mon éducation.

A MA CHÈRE MÈRE

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.

A MES FRÈRES

Ilyas mon petit frère, mes frères Sofiane, Karim et mes nièces, Assil et Marwa.

A TOUTES MES AMIES

Je tiens à remercier mes amis et collègues qui ont toujours été là pour moi, dans les bons comme dans les mauvais moments :, CHAIMA, LEILA, YASMINE, MSS, RAYANE , ZAHIA, MANAL, ZAHRA, Wafa, MANAL FARAH, IMANE, DJAWAHER, IKRAM .

A tous ceux qui m'ont encouragé et m'ont aidé à achever mon mémoire.

DJIHANE

Dédicace

"À mes héros, Maman et Papa "

C'est avec un immense bonheur et une profonde reconnaissance que je vous dédie ce mémoire, fruit de tant d'années d'études et de persévérance

Je vous remercie du fond du cœur pour tout ce que vous avez fait pour moi. Vous êtes mes piliers, ma source d'inspiration et ma plus grande fierté. Ce succès est autant le vôtre que le mien.

À mes chers frères, Islam, Djelloul et Younes

C'est avec une immense fierté et une profonde admiration que je vous dédie ce mémoire de fin d'études. Votre soutien indéfectible, vos encouragements constants et votre foi inébranlable en mes capacités ont été la force motrice qui m'a permis de persévérer dans les moments difficiles et d'atteindre cet objectif.

À IM-KH, mon pilier, mon confident, ma source de réconfort. Merci d'être toujours là pour moi, dans les bons comme dans les mauvais moments. Tu es un véritable ange gardien."

"À ma sœur Farah, Ce mémoire fruit de tant d'efforts et de persévérance, ne saurait exister sans ton soutien indéfectible et ta présence lumineuse dans ma vie.

À ma famille, havre de paix et source d'inspiration, je dédie ce mémoire comme un symbole de mon attachement indéfectible.

À mes amis, Manel, Aya, Nada, Djihane, Hanane .

Merci pour les beaux moments que nous avons passés ensemble.

Résumé

Le monde fait face à une crise de l'eau, qui jette une ombre sur divers secteurs, y compris l'industrie, l'agriculture et la consommation humaine. L'Algérie est l'un des pays les plus vulnérables à cette crise, ce qui l'a poussée à chercher des solutions alternatives pour répondre à ses besoins en eau douce.

Le dessalement de l'eau de mer est apparu comme une solution prometteuse pour faire face au manque d'eau, car il permet d'assurer un approvisionnement durable en eau douce. L'Algérie est l'un des pionniers du dessalement dans la région, possédant 13 stations de dessalement avec une capacité de production totale estimée à 2260 millions de mètres cubes par jour. Cependant, le processus de dessalement de l'eau n'est pas sans risques environnementaux qui doivent être pris en compte. Les stations de dessalement produisent de grandes quantités de déchets polluants, tels que des produits chimiques et des sels, qui peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement marin. Cette recherche vise à étudier le processus de dessalement de l'eau de mer dans la station de polymed CP2/K, qui utilise la technologie TCD dans la wilaya de Skikda en Algérie.

Mots clés : Dessalement, CP2K, Eau de mer, TCD.

ABSTRACT

The world is facing a water crisis, which casts a shadow over various sectors, including industry, agriculture, and human consumption. Algeria is one of the countries most vulnerable to this crisis, which has driven it to seek alternative solutions to meet its needs for fresh water. Seawater desalination has emerged as a promising solution to address the water shortage, as it allows for a sustainable supply of fresh water. Algeria is one of the pioneers of desalination in the region, possessing 13 desalination plants with a total production capacity estimated at 2260 million cubic meters per day. However, the desalination process is not without environmental risks that must be taken into account. Desalination plants produce large quantities of polluting waste, such as chemicals and salts, which can negatively impact the marine environment. This research aims to study the seawater desalination process at the polymed CP2/K station, which operates using TCD technology in the Skikda province of Algeria.

Key words: Desalination, CP2K, Sea water, TCD.

الملخص

واجه العالم أزمة مائية، تُلقى بظلالها على مختلف القطاعات، بما في ذلك الصناعة والزراعة والاستهلاك البشري. تُعدّ الجزائر من الدول الأكثر عرضة لهذه الأزمة، ممّا دفعها إلى البحث عن حلولٍ بديلةٍ لسدّ احتياجاتها من المياه العذبة. برزت تحلية مياه البحر كحلٍ واعدٍ لمواجهة نقص المياه، حيث تُتيح ضمان إمداداتٍ مستدامةٍ من المياه العذبة. وتُعدّ الجزائر من رواد تحلية المياه في المنطقة، حيث تمتلك 13 محطةً لتحلية المياه بطاقة إنتاجية إجمالية تُقدّر بـ 2260 مليون متر مكعب في اليوم. ومع ذلك، لا تخلو عملية تحلية المياه من مخاطر بيئيةٍ يجب أخذها بعين الاعتبار. تُنتج محطات تحلية المياه كمياتٍ كبيرةٍ من المخلفات الملوثة، مثل المواد الكيميائية والأملاح، ممّا يُمكن أن يُؤثر سلبيًا على البيئة البحرية. يهدف هذا البحث إلى دراسة عملية تحلية مياه البحر في محطة بوليمد CP2/K، التي تعمل بتقنية TCD في ولاية سكيكدة بالجزائر.

الكلمات المفتاحية: تحلية المياه، مركب المواد البلاستيكية، مياه البحر، تقنية التقطير بالضاغط الحراري.

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur l'eau de mer

Figure I.1	Molécule d'eau, constituée de deux atomes d'hydrogènes et d'un atome d'oxygène.	P03
Figure I.2	L'hydromètre flottant et L'hydromètre à aiguille	P12

Chapitre II : Généralité sur le dessalement de l'eau

Figure II.1	La disponibilité en eau douce par état en 2007 en m ³ par habitant par an.	P20
Figure II.2	Le dessalement à travers la méditerranée.	P20
Figure II.3	Capacités de dessalement dans le monde.	P21
Figure II.4	Schéma général d'une installation de dessalement.	P22
Figure II.5	Distillation à simple effet	P26
Figure II.6	Distillation à effet multiple	P27
Figure II.7	Distillation avec compresseur de vapeur	P28
Figure II.8	Principe de dessalement par électrodialyse	P31
Figure II.9	Processus ED simplifié	P32
Figure II.10	Procédé d'osmose et d'osmose inverse	P33
Figure II.11	Distillateur solaire.	P36

Chapitre III : Présentation de l'unité et le principe de fonctionnement

Figure III.1	Situation du complexe POLYMED dans la zone industrielle de SKIKDA.	P44
Figure III.2	Organisation de POLYMED	P45
Figure III.3	Une photographie d'ioniseur prise de la station de dessalement TCD 6-8000.	P50
Figure III.4	Une photographie du plateau d'arrosage prise de la station de dessalement TCD 6-8000.	P52
Figure III.5	Une photographie du thermo-compresseur prise de la station de dessalement TCD 6-8000.	P53
Figure III.6	Une photographie des tubes U prise de la station de dessalement TCD 6-8000	P55

Chapitre IV : Matériels et méthodes

Figure IV.1	Une échelle de conductivité et de Ph	P58
Figure IV.2	L'appareil de spectrophotométrie	P61
Figure IV.3	Boîte LCK et le mode opératoire	P62

Chapitre V : Les résultats et discussion

Figure V.1	La variation du pH de l'eau distillée en fonction du temps (jours)	P66
Figure V.2	La variation du pH de l'eau déminéralisée en fonction du temps (jours)	P67
Figure V.3	La variation de conductivité de l'eau déminéralisée en fonction du temps (jours)	P69
Figure V.4	La variation de conductivité de l'eau distillée en fonction du temps (jours)	P70
Figure V.5	La variation de potentiel d'hydrogène de l'eau distillée en fonction de temps (jours) pendant 4 mois	P71
Figure V.6	La variation de potentiel d'hydrogène de l'eau déminéralisée en fonction de temps (jours) pendant 4 mois	P72
Figure V.7	La variation de conductivité de l'eau distillée en fonction de temps (jours) pendant 4 mois	P73
Figure V.8	La variation de conductivité de l'eau déminéralisée en fonction de temps (jours) pendant 4 mois	P74
Figure V.9	La variation de la production en fonction du temps (h)	P76
Figure V.10	La variation du rendement en fonction du temps (h)	P77

Listes des tableaux

Chapitre 1 : Généralité sur l'eau de mer

Tableau I.1	Répartition en volume et en pourcentage des différentes sources d'eau salée et d'eau douce présentes sur Terre	P08
Tableau I.2	Composition typique de l'eau de mer avec une salinité de 36 000 ppm.	P09
Tableau I.3	Les 6 éléments les plus abondants dans l'eau de mer	P11
Tableau I.4	Solubilités des sels dans l'eau pure (18°C) en g/l	P14
Tableau I.5	Principaux effets associés aux métaux lourds	P17
Tableau I.6	Principales maladies d'origine hydrique et agents microbiologiques responsables.	P18

Chapitre II : Généralité sur le dessalement de l'eau

Tableau II.01	Les grandes stations de dessalement en Algérie	P24
---------------	--	-----

Chapitre IV : Matériels et méthodes

Tableau IV.1	Code article et plage de mesure de chaque paramètre	P62
--------------	---	-----

Chapitre V : Les résultats et discussion

Tableau V.1	Variation du pH en fonction du temps	P66
Tableau V.2	Variation de la conductivité en fonction du temps (jours)	P68
Tableau V.3	Variation de la conductivité en fonction du temps.	P71
Tableau V.4	Variation de la conductivité en fonction du temps.	P73
Tableau V.5	Les résultats d'analyse de l'eau distillée.	P74
Tableau V.6	Les résultats d'analyse de l'eau déminéralisée	P75
Tableau V.7	Les résultats de la production et le rendement de l'unité entre 2011 et 2024	P76

Liste symbole

CA : Acétate de cellulose

DCO : Demande Chimique en Oxygène

ED : Electrodialyse

EDR : Electrodialyse à inversion de polarité

EDTA : Acide éthylènediaminetétraacétique

FO : Osmose directe

GMV : Groupe de maintien de vide

MES : matières en suspension

MED : Effets multiples

NTU : Unité de Turbidité Néphélométrique

NF : Nano filtration

OMS : Organisation mondiale de la santé

OI : Osmose inverse

PPM : partie par million

UCV : Unités de couleur varie

PH : Potentiel d'hydrogène

PEHD : Polyéthylène Haute Densité

PA : Polyamide

TH : titre hydrotimétrique

TAC : titre alcalimétrique complet

TA : titre alcalimétrique simple

TCD : Thermo- Compression Distiller

TDS : Total de sel dissous

UCV : Unités de couleur varie

VC : Compression de vapeur

SOMMAIRE

Sommaire

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur l'eau de mer

I.1 Introduction	2
I.2 L'eau.....	2
I.3 Importance de l'eau	3
I.3.1 L'eau dans l'organisme humain	3
I.3.2 L'eau dans notre environnement	3
I.4 Répartition de l'eau sur la terre	5
I.5 La situation et les perspectives de la sécurité hydrique en Algérie	6
I.6 Sources d'eau	6
I.6.1 Eau de surface	6
I.6.2 Eaux de souterrains	7
I.6.3 Eau de mer.....	8
I.7 Composition de l'eau de mer.....	9
I.8 Paramètres de potabilité de l'eau de mer.....	9
I.8.1 Paramètres organoleptiques.....	10
I.8.1.1 La Couleur.....	10
I.8.1.2 Goûts et odeur	10
I.8.1.3 Turbidité	11
I.8.1.4 La salinité	11
I.8.1.5 La densité	11
I.8.1.6 La température.....	12
I.8.1.7 Potentiel d'hydrogène.....	12
I.8.1.8 Matières en suspensions	13
I.8.1.9 Conductivité électrique.....	13
I.8.1.10 Dureté total	14
I.8.1.11. Solubilité	14
I.8.1.12. L'alcalinité.....	15
I.8.1.13 Cation et anion.....	15

I.8.1.14 Nitrate et nitrite	15
I.8.1.15 Pollution des eaux par les métaux lourds	16
I.8.2 Paramètres microbiologique.....	17
I.9 Conclusion.....	18

Chapitre II : Généralités sur le dessalement de l'eau

II.1 Introduction	19
II.2 Situation de dessalement dans le monde	19
II.3 Définition de dessalement de l'eau de mer	21
II.4 Historique de dessalement.....	22
II.4.1 Historique de dessalement en Algérie.....	23
II.5 Les étapes de dessalement de l'eau de mer.....	25
II.5.1 Captation d'eau de mer	25
II.5.2 Prétraitement	25
II.5.3 Les différents procédés de dessalement	25
II.5.3.1 Procédés de distillation	26
II.5.3.1.1 Distillation à simple effet.....	26
II.5.3.1.2 Distillation à multiples effets	27
II.5.3.1.3. Distillation par TCD (Thermo- Compression Distiller).....	27
II.5.3.2 Procèdes membranaires.....	29
II.5.3.2.1 Electrodialyse (ED) et inversion d'electrodialyse (EDR)	29
II.5.3.2.2 Osmose inverse	32
II.5.3.3 Autres procèdes de dessalement	35
II.5.3.3.1 Echange ionique	35
II.5.3.3.2 Congélation	36
II.5.3.3.3 Distillation solaire	36
II.5.4 Post traitement ou reminéralisassions	37
II.5.4.1 Ajustement du ph	37
II.5.4.2 Chloration.....	37
II.6 L'impact de dessalement sur l'environnement	38
II.6.1 Rejets atmosphériques	38
II.6.2 Rejets chimiques	38
II.6.3 Rejets de saumures.....	38
II.7 Lieu de rejet de la saumure	39

II.8 Problèmes techniques rencontrés en dessalement.....	39
II.8.1 La corrosion.....	39
II .8.2 L'entartrage (Scaling)	39
II.8.3 Le colmatage	41
II.9 Les avantages et les inconvénients de dessalement	42
II.10 Le coût du dessalement	42
II.11 Conclusion	43

Chapitre III : Présentation de l'unité et le principe de fonctionnement

III. Introduction.....	44
III.1. Présentation de POLYMED (CP2/k).....	44
III.1.1. Implantation de POLYMED	44
III.1.2. Organisation de POLYMED :.....	45
III.1.3 Description de l'usine :	45
III.1.4. Découpage du complexe.....	46
III.1.5 Les installations de l'usine.....	47
III.1.6 Utilisation de PEHD	47
III.1.7 Description de laboratoire.....	47
III.1.8. Présentation de l'utilité	48
III.2. Description du procédé de dessalement.....	50
III.2.1 Evaporateur et condenseurs	50
III.2.3 Système de mise sous vide	53
III.3. Le principe de fonctionnement	54
III.4 Conclusion	55

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV.1 Introduction	56
IV.2 Les analyses de qualité de l'eau produite	57
IV.2.1 Détermination du potentiel d'hydrogène (pH) et la conductivité.....	57
IV.2.2 Détermination La dureté totale	58
IV.2.3. Détermination Titre alcalimétrique	60
IV.3 Déterminer les concentrations de certains autres composés à l'aide d'un spectrophotomètre.....	62
IV.4 Conclusion.....	66

Chapitre V :Résultat et discussion

V. Introduction.....	65
V.1 Suivi des analyses physico-chimiques	65
V.1.1 Suivi du potentiel d'hydrogéné.....	65
V.1.2 Suivi de la conductivité.....	68
V .1.3 Suivi de la potentiel hydrogène (moyen de 4 mois)	70
V .1.4 Suivi de la conductivité (moyen de 4 mois)	72
V.1.3. Les autres paramètres.....	74
V.1.4 Suivi de la production et le rendement de l'unité	75
V .2 Conclusion	77
Conclusion générale.....	79
Reference bibliographique.....	

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

L'eau douce est essentielle à notre vie quotidienne, mais sa disponibilité mondiale diminue en raison de la croissance démographique et du changement climatique. Tous les secteurs, y compris l'industrie, consomment de grandes quantités d'eau douce. L'industrie utilise cette eau pour des processus tels que le refroidissement, la dissolution, la séparation des constituants, l'élimination des résidus et comme matière première. Par exemple, produire un kilogramme de sucre nécessite 100 litres d'eau, tandis qu'un kilogramme de papier en demande 250 litres. Avec une production croissante, l'industrie utilise des volumes d'eau de plus en plus importants. Pour répondre à la demande en eau douce, le dessalement de l'eau de mer est une solution, bien que l'eau de mer doive d'abord être dessalée avant d'être utilisée. [1]

Il existe plusieurs techniques de dessalement pour obtenir de l'eau douce à partir de l'eau de mer. Ces procédés se divisent en deux grandes catégories : les procédés à membranes et les procédés de distillation. La distillation par thermo-compression, en particulier, est prometteuse grâce à ses avantages : capacité d'installation élevée, fonctionnement à des températures inférieures à 70°C et production d'une eau de haute qualité. [1]

Cependant, l'utilisation de l'eau de mer présente des défis opérationnels tels que l'entartrage, le colmatage des surfaces d'échange et la corrosion, ce qui réduit l'efficacité et la durée de vie des équipements. Pour éviter ces problèmes, des produits chimiques sont injectés et des nettoyages chimiques sont effectués tous les six mois, en suivant les recommandations du fabricant. [1]

Ce mémoire est divisé en deux parties. La première partie bibliographique comprend deux chapitres : le premier chapitre traite des compositions et propriétés physico-chimiques de l'eau de mer ; le deuxième chapitre présente les différents procédés de dessalement et les problèmes des unités de dessalement.

La partie expérimentale, également composée de trois chapitres, commence par une présentation du complexe CP2/k. Le deuxième chapitre décrit les différentes techniques et méthodes d'analyse. Enfin, le dernier chapitre présente les résultats expérimentaux de l'étude. Le travail se termine par une conclusion générale.

CHAPITRE I
GÉNÉRALITES SUR
L'EAU DE MER

Chapitre I : Généralité sur l'eau de mer

I.1 Introduction

L'eau couvre 72 % de la surface mondiale, soit un total estimé à 1 400 millions de km³. Au cours des siècles passés, la disponibilité de l'eau n'a pas porté préjudice aux populations. Mais dans le monde moderne, le développement et le contrôle de l'eau disponible dans la nature ont changé la donne. Système et détruit ses fonctions naturelles. Où en est-il jusqu'à présent ? Évaluons-le ici.

L'eau sur Terre est constituée de 97,5 % d'eau salée trouvée dans l'océan et de 2,5 % d'eau douce trouvée dans les lacs, les rivières, les glaciers, les eaux souterraines, etc. L'eau douce ne peut être utilisée par les humains que dans la limite de 0,7 % des réserves totales d'eau.

On estime que la quantité d'eau perdue en 4,6 milliards d'années équivaut à une hauteur de 3 mètres sur toute la surface de la terre. Cela suggère que la quantité d'eau est relativement constante. Pour en savoir plus sur la nature de cette eau, il faut s'intéresser aux mers intérieures et aux océans, ainsi qu'aux aquifères souterrains, qui représentent 97,2 % du volume d'eau, ainsi, notre planète bleue est avant tout une planète d'eau de mer. L'eau douce représente 2,8% du total. Dans cette faible proportion, la glace et la neige permanente représentent 2,1%, tandis que l'eau douce disponible est de 0,7%. La moitié de ces 0,7% est constituée d'eaux souterraines.

En effet, l'homme a accès à moins de 1% de l'eau totale de la planète, soit environ 0,028 % de l'hydrosphère. Il s'agit des cours d'eau, des réservoirs naturels ou artificiels (baies côtières, lacs, rivières, canaux, barrages, etc.) et des eaux souterraines (aquifères), qui sont peu profondes et accessibles à un coût abordable [1].

I.2 L'eau

L'eau est une substance liquide, transparente, incolore et inodore, qui réfléchit la lumière et peut dissoudre de nombreuses substances. Elle est composée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène, ce qui lui donne sa formule chimique H₂O. L'eau se présente naturellement à l'état solide, liquide et gazeux.

L'eau liquide est essentielle aux organismes vivants pour ses propriétés mécaniques et chimiques. D'un point de vue mécanique, la pression hydrostatique exercée par l'eau permet aux organismes de se soutenir, que ce soit dans l'eau ou sur terre. D'un point de vue chimique, l'eau dissout la plupart des substances solides, ce qui facilite les réactions chimiques et le métabolisme. L'eau est un solvant essentiel, parfois qualifié de « solvant universel ».

La présence permanente d'eau liquide est un facteur important qui permet de définir la zone habitable circumstellaire, où il est possible de découvrir une forme de vie extraterrestre comparable à celle que

nous connaissons [2].

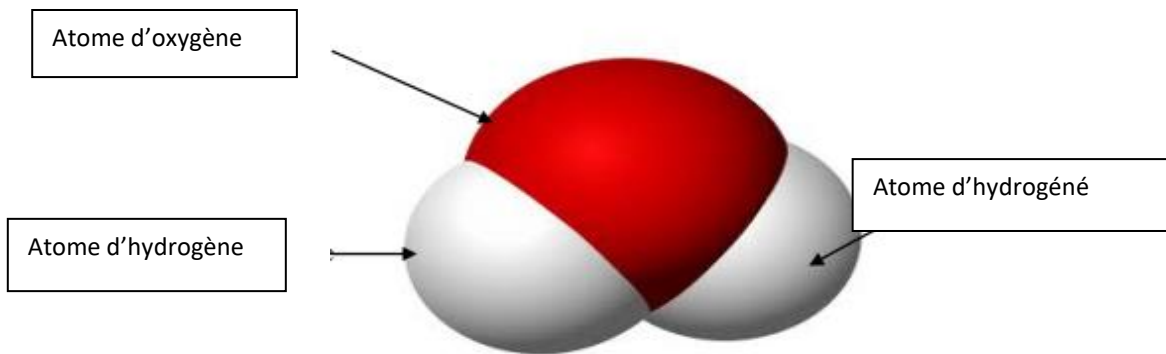


Figure I.1 : Molécule d'eau, constituée de deux atomes d'hydrogènes et d'un atome d'oxygène [3].

I.3 Importance de l'eau

I.3.1 L'eau dans l'organisme humain

L'eau est le principal constituant du corps humain. Elle représente environ 65 % du poids du corps d'un adulte, soit environ 45 litres pour une personne de 70 kilogrammes.

L'organisme élimine constamment de l'eau. Après la digestion, la majeure partie de l'eau traverse les parois de l'intestin pour rejoindre le sang et la lymphe, qui la transportent dans tout l'organisme, notamment vers les reins, la peau et les poumons. L'eau est ensuite éliminée par divers moyens, tels que les urines, la sueur et la respiration, l'homme doit donc consommer de l'eau chaque jour, en buvant et en mangeant. Les aliments contiennent en effet une quantité importante d'eau. Pour maintenir l'organisme en bonne santé, les pertes en eau doivent être compensées par les apports. La soif est un mécanisme par lequel l'organisme signale qu'il est en état de déshydratation [4].

I.3.2 L'eau dans notre environnement

L'eau est une ressource naturelle indispensable à la survie de l'humanité et de toute espèce animale ou végétale sur Terre, ainsi qu'à l'environnement en général. Aucune autre substance liquide ne peut remplacer l'eau. En effet, elle possède plusieurs particularités qui la rendent unique parmi les autres substances minérales.

Dans sa phase liquide, l'eau présente l'avantage d'être un support des formes de vie. Elle est le solvant des composants qui transporte les molécules clés et active les réactions chimiques. L'eau est également une molécule polaire, c'est-à-dire qu'elle possède une terminaison positive (l'hydrogène) et une terminaison négative (l'oxygène). Ses atomes d'hydrogène ont la capacité de former des liaisons

avec d'autres molécules d'eau. Ce réseau de liaisons est à la fois souple et résistant, ce qui lui confère des propriétés uniques. L'eau est également un solvant universel, c'est-à-dire qu'elle peut dissoudre de nombreuses substances, tant acides que basiques.

L'eau est une ressource naturelle indispensable à la vie sur terre. Elle est apparue dans les océans primitifs, il y a plus de 4 milliards d'années, et c'est grâce à elle que la vie a pu se développer. L'eau compose environ 75 % du corps humain et jusqu'à 90 % du poids des végétaux. Elle est essentielle à la survie des cellules, car elle permet la construction des enzymes, des macromolécules d'acides aminés qui déclenchent les réactions chimiques. Sans eau, les cellules ne pourraient pas effectuer leurs réactions métaboliques et la mort serait immédiate

Malheureusement, l'eau douce est une ressource rare. On estime qu'il ne reste au sol qu'environ 40 000 km³ d'eau douce par an, dont

- 50% s'infiltrent dans le sol et les nappes phréatiques.
- 30 % ruissellent et rejoignent les rivières, les lacs et les cours d'eau
- 20 % forment de la neige ou de la glace

Le gaspillage de l'eau est un problème majeur. Malgré toutes les tentatives de sensibilisation à la gestion de l'eau, il est encore trop fréquent. Cela entraîne l'épuisement des ressources en eau douce et la crainte de se retrouver un jour sans aucune goutte d'eau potable. [5]

-Elle peut assurer plusieurs fonctions indispensables pour préserver la vie sur le globe terrestre :

- Faire vivre les êtres humains, les espèces animales et végétales (faune et flore).
- Remplir des réservoirs
- Irrigation
- Héberger et nourrir les animaux aquatiques
- Faire tourner des machines
- Tout laver
- Eteindre le feu
- Transporter les bateaux et les marchandises,
- Nourrir les plantes et pour les loisirs...

Toutefois, plusieurs catastrophes peuvent se produire par l'eau comme le raz de marée, les inondations, cyclone, etc. [5]

I.4 Répartition de l'eau sur la terre

Près de 70 % de la surface de la Terre est recouverte d'eau, dont 97 % est salée et 3 % douce. L'eau se présente sous forme liquide, solide ou gazeuse. Le volume total de l'eau sur Terre est d'environ 1 360 000 000 km³.

-La répartition de l'eau est la suivante :

- 97,2 % dans les océans
- 1,8 % dans les glaciers et les calottes glaciaires.
- 0,9 % dans les eaux souterraines.
- 0,02 % dans les lacs, les mers intérieures et les fleuves.
- 0,001 % dans l'atmosphère [6].

-Voici une répartition plus détaillée :

- Océans : 1 320 000 000 km³
- Glaciers et calottes glaciaires : 25 000 000 km³.
- Eaux souterraines : 13 000 000 km³.
- Eaux douces superficielles : 250 000 km³.
- Vapeur d'eau atmosphérique : 13 000 km³ [6].

La répartition de l'eau sur Terre est donc très inégale. Les océans représentent la grande majorité de l'eau de la planète, tandis que les eaux douces sont beaucoup moins abondantes.

Cette répartition a des conséquences importantes pour la vie sur Terre. Les océans sont essentiels pour la régulation du climat, tandis que les eaux douces sont indispensables à la vie des plantes et des animaux [6].

I.5 La situation et les perspectives de la sécurité hydrique en Algérie

L'Algérie est confrontée à de grands défis dans le domaine de l'eau, car elle souffre d'une rareté des ressources en eau en raison du climat sec et semi-aride qui prévaut dans la plupart des régions du pays. La croissance démographique croissante, l'expansion urbaine et les industries agricoles et industrielles contribuent également à accroître la demande en eau ainsi, les autorités algériennes s'efforcent de lutter contre la sécheresse et la pénurie d'eau, en raison de la baisse des précipitations observée au cours de la dernière décennie, comme dans d'autres pays de la région.

Ainsi, le nombre de stations de dessalement d'eau de mer a été porté à 19 d'ici 2024. Dans le cadre du premier programme, 11 stations ont été construites sur le littoral, avec une capacité de production de 2,11 millions de mètres cubes par jour. Le gouvernement a également construit trois autres stations dans le cadre du plan d'urgence, avec une capacité de 70 000 mètres cubes par jour, parallèlement à la construction de cinq stations supplémentaires dans le cadre du programme complémentaire, ce qui fournira 1,5 million de mètres cubes par jours dans cinq wilayas d'ici 2024.

La stratégie nationale de l'eau 2021-2030 vise à répondre aux besoins des Algériens en eau potable par le dessalement d'eau de mer, à hauteur de 60 %.

Actuellement, 17 % des besoins sont couverts par l'eau dessalée, selon les chiffres officiels. Ce taux augmentera progressivement pour atteindre 22 % en 2022, 42 % en 2024 et 60 % en 2030.

Les wilayas du sud bénéficieront également d'un programme de dessalement des eaux souterraines, ce qui garantira l'approvisionnement en eau des populations du désert, selon les engagements du gouvernement [7].

Selon les prévisions de nombreux experts et organisations spécialisées dans les ressources en eau, de nombreux pays et régions du monde seront confrontés à une crise aiguë de l'eau, dont l'Algérie. Selon un rapport de la Banque mondiale, l'Algérie est classée 17e en Afrique parmi les pays qui souffriront de la pauvreté hydrique d'ici 2025 (400 m³/habitant/an) [8].

I.6 Sources d'eau

Les sources d'eau naturelles se subdivisent en trois groupes :

I.6.1 Eau de surface

Elles représentent une faible fraction de l'hydrosphère, soit seulement 0,013 %. Elles se trouvent dans les cours d'eau (ruisseaux, rivières, fleuves) et les lacs. Les eaux de surface sont vulnérables à la pollution car elles reçoivent directement les eaux de ruissellement, c'est-à-dire les

eaux de pluie qui ruissellent sur le sol. Ces eaux de ruissellement peuvent transporter des polluants provenant de l'agriculture, de l'industrie ou des activités humaines [9].

a) Rivières et fleuves

En haute montagne, les cours d'eau naissent de la fonte des glaciers. La glace qui fond donne naissance à des ruisseaux ou à des torrents qui coulent sous les glaciers et émergent à leur pied. C'est ce qu'on appelle le régime glaciaire. Les autres cours d'eau proviennent du ruissellement des pluies excédentaires et/ou de l'émergence de sources, qui sont des points d'émergence des eaux souterraines. Ce type de régime est appelé régime pluvial.

Tous les cours d'eau descendent le long des pentes, se rejoignent pour former des rivières de plus en plus importantes qui finissent par se jeter dans un océan ou une mer intérieure.

Tout au long de leur parcours, les cours d'eau sont également alimentés par les eaux de ruissellement et parfois par les eaux souterraines [9].

b) lacs

Les lacs sont des étendues d'eau douce qui se forment lorsque des eaux de ruissellement ou des cours d'eau rencontrent un obstacle et s'accumulent dans une dépression. La taille des lacs peut varier considérablement, de quelques hectares à des milliers de kilomètres carrés. Les lacs les plus grands sont souvent appelés des mers, comme la mer Caspienne, qui couvre une superficie de 371 000 kilomètres carrés. Les lacs sont alimentés par des eaux de ruissellement, des cours d'eau ou des eaux souterraines. Les eaux de ruissellement sont les eaux de pluie qui s'écoulent sur le sol. Les cours d'eau sont des étendues d'eau qui s'écoulent d'une source vers un océan, une mer ou un autre cours d'eau. Les eaux souterraines sont les eaux qui s'infiltrent dans le sol et s'accumulent sous la surface. Les lacs jouent un rôle important dans l'environnement. Ils fournissent un habitat à de nombreuses espèces animales et végétales. Ils sont également une source d'eau potable et d'irrigation [9].

I.6.2 Eaux de souterrains

Elles sont des eaux qui se trouvent sous la surface de la Terre, dans le sol et la roche. Elles proviennent de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. Les eaux de pluie s'infiltrent par gravité dans les pores, les microfissures et les fissures des roches du sous-sol.

Elles s'accumulent dans les couches de roches poreuses et perméables, formant ainsi un réservoir d'eau souterrain appelé nappe. La roche qui contient les eaux souterraines est appelée aquifère. Il existe différents types d'aquifères, selon la nature des roches qui les constituent.

Les eaux souterraines se déplacent dans le sous-sol sous l'effet de la gravité. Elles peuvent parcourir des distances considérables, parfois sur des dizaines ou des centaines de kilomètres.

Les eaux souterraines constituent une ressource importante en eau douce. Elles fournissent environ le tiers du débit total des cours d'eau de la planète. Les aquifères représentent un réservoir d'eaux souterraines d'environ 8 millions de km³, soit 0,6 % de l'hydrosphère [9].

I.6.3 Eau de mer

L'eau de mer est l'eau salée des mers et des océans de la Terre. Elle est appelée "salée" car elle contient des substances dissoutes, les sels, qui sont constitués d'ions. Les principaux ions dissous dans l'eau de mer sont les ions chlorures, les ions sodium, les ions sulfates et les ions magnésium. La concentration en sels dissous dans l'eau de mer est d'environ 35 grammes par kilogramme d'eau. Cela signifie qu'un litre d'eau de mer contient environ 35 grammes de sels dissous. L'eau de mer est distincte de l'eau douce, qui contient moins de 1 gramme de sels dissous par kilogramme d'eau. La masse volumique de l'eau de mer est d'environ 1,025 gramme par millilitre. Cela signifie qu'un litre d'eau de mer a une masse d'environ 1,025 kilogramme. La masse volumique de l'eau de mer est supérieure à celle de l'eau douce car les sels dissous dans l'eau de mer augmentent sa masse [10]. Le tableau I.2 représente la répartition en volume et en pourcentage des différentes sources d'eau salée et d'eau douce présentes sur terre.

Tableau I.1 : Répartition en volume et en pourcentage des différentes sources d'eau salée et d'eau douce présentes sur Terre [11]

	Volume (10 ³ Km ³)	Pourcentage de l'eau total (%)	Pourcentage de l'eau douce (%)
Léau total	1.386 millions	100	–
Eau douce total	35 000	2.53	100
Océans mondiaux	1.340 millions	96.5	–
Eau salée souterraine	13 000	1	–
Eau douce souterraine	10 500	0.76	30
Glaciers antarctiques	21 600	1.56	61.7
Glaciers Groenland	2 340	0.17	6.7
Îles arctiques	84	0.006	0.24
Glaciers montagneux	40.6	0.003	0.12
Pergélisol et glace souterraine	300	0.022	0.86
Lacs salins	85.4	0.006	–
Lacs d'eau douce	91	0.007	0.26
Humidité du sol	16.5	0.0012	0.047
Tourbières	11.5	0.0008	0.03
Rivières (flux moyen)	2.12	0.0002	0.006
Dans la matière biologique	1.12	0.0001	0.0003
Dans l'atmosphère (moyenne)	12.9	0.0001	0.04

I.7 Composition de l'eau de mer

L'eau de mer est une ressource précieuse, mais elle est également très salée. La salinité moyenne de l'eau de mer est de 35 grammes de sel par kilogramme d'eau. Cela signifie que l'eau de mer contient environ 96,5 % d'eau et 3,5 % de sel [12].

L'eau de mer est une solution de NaCl, le chlorure de sodium, qui est le sel le plus abondant sur Terre. Le sodium (Na^+) et le chlore (Cl^-) représentent en effet plus de 86 % de la teneur en sel en masse de l'eau de mer [12].

Les autres cations présents dans l'eau de mer sont le magnésium (Mg^{2+}), le calcium (Ca^{2+}), le potassium (K^+) et le strontium (Sr^{2+}). L'ordre de leur abondance décroissante est le suivant :

- Mg^{2+} : 3,7 %
- Ca^{2+} : 1,1 %
- K^+ : 0,4 %
- Sr^{2+} : 0,02 %

L'anion (Cl^-) est approximativement égal à la somme des cations. Les autres anions présents dans l'eau de mer sont le sulfate (SO_4^{2-}), l'hydrogène carbonate (HCO_3^-), le bromure (Br^-) et le fluorure (F^-). Leur abondance est beaucoup plus faible que celle des cations et des anions principaux [12].

Tableau I.2 : Composition typique de l'eau de mer avec une salinité de 36 000 ppm [13].

Compound	Composition	Mass Percent	ppm
Chloride	Cl^-	55.03	19810.8
Sodium	Na^+	30.61	11019.6
Sulfate	$(\text{SO}_4)^{-2}$	7.68	2764.8
Magnesium	Mg^{+2}	3.69	1328.4
Calcium	Ca^{++}	1.16	417.6
Potassium	K^+	1.16	417.6
Carbonic Acid	$(\text{CO}_3)^{-2}$	0.41	147.6
Bromine	Br^-	0.19	68.4
Boric Acid	$(\text{H}_3 \text{BO}_3)^-$	0.07	25.2
Strontium	Sr^{+2}	0.04	14.4
Total		100	36000

I.8 Paramètres de potabilité de l'eau de mer

L'évaluation de la qualité des eaux de surface est une procédure complexe qui nécessite la mesure de nombreux paramètres, notamment physiques, chimiques et biologiques. Elle prend également en compte la présence ou l'absence d'organismes aquatiques et de micro-organismes. Dans

ce contexte, les normes de qualité des eaux de surface établissent les concentrations maximales admissibles (CMA) de substances dans l'eau. Ces concentrations sont définies par les autorités publiques afin de protéger la santé humaine et l'environnement. [14]

I.8.1 Paramètres organoleptiques

Les paramètres organoleptiques de l'eau sont utilisées pour évaluer sa qualité. Les différents paramètres organoleptiques se traduisent comme suit :

I.8.1.1 La Couleur

La couleur réelle de l'eau est incolore, mais l'eau peut apparaître de différentes couleurs en raison de la présence de substances en suspension.

Pour l'eau potable, La degré de couleur maximale acceptable est de 15 UCV [15].

La couleur de l'eau potable peut être due à différentes sources, notamment :

- Des impuretés minérales, telles que le fer, le manganèse ou le cuivre. Ces impuretés peuvent provenir du sol, des roches ou des matériaux de construction.
- Des matières organiques acides, Telles que les tanins ou les humines [15]

I.8.1.2 Goûts et odeur

L'eau potable est une denrée alimentaire essentielle, et son gout et son odeur sont des facteurs importants de sa qualité. Un eau potable doit avoir un gout neutre et une odeur imperceptible. Il n'existe aucun appareil capable de mesurer le gout ou l'odeur de l'eau de manière objective.

Les quatre saveurs fondamentales sont : la saveur salée, la saveur sucrée, la saveur aigre et la saveur amère.

- La saveur salée est due à la présence de sodium.
- La saveur sucrée est due à la présence des glucides.
- La saveur aigre est due à la présence d'acides.
- La saveur amère est due à les composés organiques complexes.

L'odeur de l'eau est due à la présence de composés volatils, c'est -à-dire des composés vaporisent facilement. Ces composés peuvent être des minéraux, des gaz ou d'autres substances. [16]

I.8.1.3 Turbidité

La turbidité d'une eau est une mesure de la quantité de particules en suspension dans l'eau. Ces particules peuvent être d'origine naturelle, comme les argiles, les limons, les grains de silice, ou d'origine anthropique, comme les particules de pollution.

La turbidité est mesurée en unité de NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

- Une eau claire a une turbidité inférieure 5 NTU.
- Une eau légèrement trouble a une turbidité comprise entre 5 et 30NTU.
- Une eau très trouble a une turbidité supérieure 50 NTU. [17]

I.8.1.4 La salinité

L'eau de mer, en plus de l'eau (H₂O, Contient des substances dissoutes sous forme d'ions ou de sels).la salinité de l'eau de mer est la fraction en masse que représentent les sels dans l'eau de mer. Elle est en moyenne de 35%, soit 35g de sels par kg d'eau de mer [18].

Tableau I.3 : Les 6 éléments les plus abondants dans l'eau de mer [18].

Éléments	Forme sous laquelle ils sont présents dans l'eau de mer	Concentration dans l'eau de mer (en mg par kg d'eau de mer)
Cl (chlore)	Cl ⁻	19
Na (sodium)	Na ⁺	10.5
Mg (magnésium)	Mg ⁺²	1.3
S (souffre)	SO ₄ ⁻²	0.9
Ca (calcium)	Ca ⁺²	0.4
K (potassium)	K ⁺	0.38

I.8.1.5 La densité

La densité de l'eau de mer est en moyenne de 1,035 à 1,036 à 4°C, elle est plus élevée que la densité de l'eau distillée, qui est de 1 à 4°C .la différence de densité entre l'eau de mer et l'eau distillée est due à la présence de sels dissous dans l'eau de mer. Ces sels augmentent la masse volumique de l'eau de mer.

La densité de l'eau de mer varie également en fonction de la température et de la pression, Elle est diminuée avec l'augmentation de la température et augmente avec l'augmentation de la pression. [19]

La densité est mesurée par le densimètre ou hydromètre à flotteur. Il en existe deux types :

-L'hydromètre à aiguille

Possède l'avantage d'être bon marché et facile à utiliser, mais a la mauvaise réputation d'être peu précis, en raison des frottements des paliers de l'aiguille notamment en raison des dépôts de sel pouvant y être présents. Il comporte souvent une échelle de densité (Specific Gravity) et en parties par million à une température donnée [19].

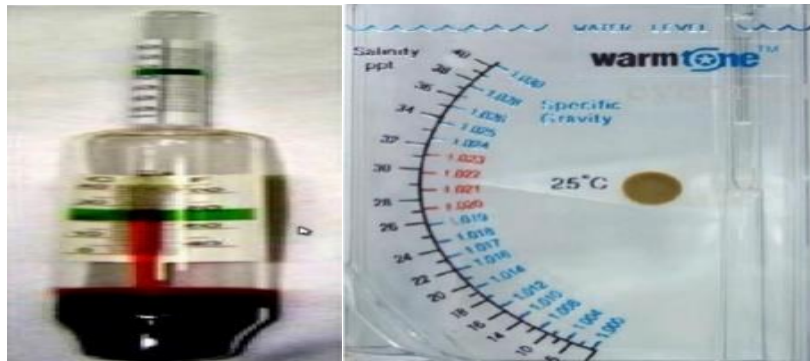


Figure I.2 : L'hydromètre flottant et L'hydromètre à aiguille

-L'hydromètre flottant

Il se compose d'un cylindre creux, lesté et gradué, qui s'enfonce plus ou moins dans le liquide à mesurer selon sa densité. Il comporte parfois également un thermomètre, comme sur l'image ci-dessous. La densité du liquide dans lequel il est immergé est lue directement sur la graduation présente à la surface libre, valable uniquement à la température généralement indiquée sur l'appareil. Il faut lire l'échelle au niveau de la surface de l'eau, et pas au niveau du ménisque qui peut monter ou descendre sur le tube en verre [19].

I.8.1.6 La température

La température de l'eau est un facteur qui agit sur la densité, la viscosité, la solubilité des gaz dans l'eau, la dissociation des sels dissous, ainsi que sur les réactions chimiques et biochimiques, le développement et la croissance des organismes vivant dans l'eau, et particulièrement des microorganismes [20].

I.8.1.7 Potentiel d'hydrogène

La mer est un milieu alcalin, c'est-à-dire qu'elle a un pH supérieur à 7. Le pH de l'eau de mer est généralement compris entre 8,2 et 8,4. Cela signifie que l'eau de mer est légèrement basique. Le

pH de l'eau de mer est lié à l'activité des organismes vivants, à la température et à la pression

-En effet, la production d'oxygène par les organismes photosynthétiques, tels que les algues et les plantes, consomme du CO₂. Ce phénomène contribue à augmenter le pH de l'eau.

-À l'inverse, l'oxydation de la matière organique, qui est une source de CO₂, contribue à diminuer le pH de l'eau

- La température augmente, la vitesse des réactions qui produisent de l'acide carbonique (H₂CO₃) augmente. Cet acide réagit avec l'eau pour former des ions hydrogène (H⁺), ce qui diminue le pH.

- La pression, elle augmente la concentration en ions hydrogène dans l'eau. En effet, la pression augmente le taux de diffusion des ions hydrogène vers l'eau [19].

I.8.1.8 Matières en suspensions

Les matières en suspension (MES) sont des particules solides, minérales ou organiques, en suspension dans l'eau. Elles peuvent avoir une origine naturelle ou anthropique

-Les sources naturelles de MES comprennent :

- L'érosion des sols par l'eau de pluie, le vent ou le ruissellement
- La sédimentation des particules en suspension dans l'eau
- La décomposition de la matière organique

-Les sources anthropiques de MES comprennent :

- Les rejets industriels, notamment ceux des industries extractives, des industries métallurgiques et des industries agroalimentaires
- Les rejets urbains, notamment ceux des stations d'épuration des eaux usées
- Les rejets agricoles, notamment ceux des engrais et des pesticides [21].

Les teneurs élevées en matières en suspension peuvent être considérées comme une forme de pollution.

I.8.1.9 Conductivité électrique

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques (Platine) de 1cm² de surface et séparée l'une de l'autre de 1cm. L'unité

de la conductivité est le Siemens par mètre (S/m). La conductivité est donc un outil précieux qui peut être utilisé pour évaluer la qualité de l'eau et déterminer son origine [20].

I.8.1.10 Dureté total

La dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques, excepté celles des métaux alcalins (Na^+ , K^+) et (H^+). Elle est souvent due aux ions (Ca^{2+}) et (Mg^{2+}). La présence de ces deux cations dans l'eau tend souvent à réduire la toxicité des métaux. La dureté se mesure en mg de CaCO_3 par litre Dans l'eau, sont déterminés :

- La dureté totale ou titre hydrotimétrique TH qui est la somme des concentrations calcique et magnésienne
- La dureté magnésienne qui correspond à la teneur globale en sels de magnésium
- La dureté carbonatée correspond à la teneur en hydrogénocarbonate et carbonate de calcium et de magnésium [22].

I.8.1.11. Solubilité

La solubilité d'un composé ionique ou moléculaire est une propriété physique qui caractérise la capacité de ce composé à se dissoudre dans un liquide, appelé solvant. Elle est exprimée en moles de soluté par litre de solution saturée. [23].

- Les sels de Sodium Cl , SO_4 , NO_3 , et F sont très bien solubles.
- Les sels de Calcium et Strontium SO_4 , CO_3 , et du F ont une solubilité très limitée.
- Les carbonates ont aussi une solubilité très limitée pour les Ca , Mg , K , Sr .
- Les sels ayant une solubilité basse peuvent causer l'entartrage dans les stations d'osmose inverse provoquée par la précipitation [23].

Tableau I.4 : Solubilités des sels dans l'eau pure (18°C) en g/l. [24].

Elément	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Ba^{2+}	Sr^{2+}
Cl^-	360	730	560	330	370	510
SO_4^{2-}	170	2	350	0,002	0,002	0,011
NO_3^-	840	1220	740	90	90	70
CO_3^-	190	0,013	1	0,02	0,02	0,011
F^-	45	0,013	0,076	1,6	1,6	0,1

I.8.1.12. L'alcalinité

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence de bases et de sels d'acides faibles. Elle est mesurée par le titre alcalimétrique.

Dans les eaux naturelles, l'alcalinité est principalement due à la présence de Carbonates, bicarbonates et hydroxydes. D'autres sels d'acides faibles peuvent également être présents dans l'eau et interférer dans la mesure de l'alcalinité. Ces sels comprennent les acides humiques, les phosphates, les citrates et les tartrates.

Deux titres qui sont le titre alcalimétrique simple (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC). L'unité utilisée est le degré français ($1^\circ\text{f} = 10 \text{ mg. L}^{-1}$ de $\text{CaCO}_3 = 0,2 \text{ milli Equivalent.L}^{-1}$ [21].

I.8.1.13 Cation et anion

Les eaux douces, qu'elles soient d'origine souterraine ou superficielle sont plus ou moins minéralisées par des sels naturels. Il est souvent très important de connaître précisément cette minéralisation en plus des indications données par les paramètres globaux de type « titre » et « potentiel ». Par ailleurs, certains des cations et anions minéraux naturels présents dans les eaux sont considérés comme indésirables ou toxiques selon l'usage auquel l'eau douce est destinée (domestique, agricole, industriel, santé, tourisme, refroidissement...) [21].

- **Le Calcium (Ca^{2+})** : L'ion calcium est le composé principal de la dureté de l'eau, La concentration d'ion calcium dans l'eau varie en fonction de la source de l'eau, il se trouve en général à une concentration de 5-500mg/l exprimé en CaCO_3 [25].
- **Le Magnésium (Mg^{2+})** : La dureté magnésienne de l'eau représente ordinairement le tiers de la dureté totale. Cela signifie que si la dureté totale d'une eau est de 100 mg/L, la dureté magnésienne sera de 33 mg/L. Les deux tiers restants, soit 67 mg/L, correspondent à la dureté calcique. sa valeur est de 10 à 50 mg/l (environ 40-200 mg /l en CaCO_3) [25].
- **Les Bicarbonates (HCO_3^-)** : L'ion bicarbonate est un anion, ce qui signifie qu'il a une charge négative. Il est On le trouve souvent à une concentration de 5-500mg/L exprimée en CaCO_3 [25].
- **Le Chlore (Cl^-)** : Puisque tous les sels du chlore sont très solubles dans l'eau, le chlore est fréquent dans les réserves d'eau douce à un taux de 10 à 100 mg /l [25].

I.8.1.14 Nitrate et nitrite

La présence de nitrates et nitrite dans l'eau d'alimentation peut avoir plusieurs origines. Les principales origines sont les suivantes :

- **Origine liée aux activités humaines** : Les nitrates peuvent être rejetés dans l'eau par les activités humaines, telles que :
 - **Les rejets industriels** : les industries utilisent des engrais azotés pour la production agricole.
 - **Les rejets agricoles** : les agriculteurs utilisent des engrais azotés pour améliorer la productivité des cultures.
 - **Les rejets urbains** : les eaux usées urbaines contiennent des nitrates provenant des eaux usées domestiques et des eaux usées industrielles.
- **Origine naturelle** : Les nitrates peuvent également avoir une origine naturelle. Ils résultent des transformations de l'azote dans les eaux et les sols (cycle de l'azote). Les nitrates (NO_3^-) et les nitrites (NO_2^-) sont des ions présents de façon naturelle dans l'environnement. Ils sont le résultat d'une nitrification de l'ion ammonium (NH_4^+), présent dans l'eau et le sol, qui est oxydé en nitrites par les bactéries du genre 'Nitrosomonas', puis en nitrates par les bactéries du genre 'Nitrobacter'. Les nitrates sont très solubles dans l'eau [20].

I.8.1.15 Pollution des eaux par les métaux lourds

La pollution des eaux se fait par des métaux lourds Ils sont des éléments chimiques qui ont une masse atomique élevée qui peuvent provoquer des intoxications chez l'homme par la consommation de l'eau contaminée en dépassant les limites fixées par la réglementation et l'OMS. Ces métaux lourds sont en particulier : Le cadmium, le fer, le plomb, l'arsenic, le nickel, et le bore. [26]. Les principaux effets associés aux éléments ci-dessus sont présentés au tableau.

Tableau I.5 : Principaux effets associés aux métaux lourds [26].

Élément	Effets
Arsenic (As)	Toxique, possible cancérigène
Cadmium (Cd)	Hypertension, dommages sur le foie, Affections respiratoires, troubles rénaux
Chrome (Cr)	Cancérigène sous forme de Cr (VI), troubles dermatologiques, anémie
Cuivre (Cu)	Peu toxique envers les animaux, toxique envers les plantes et les algues à des niveaux modérés
Mercure (Hg)	Toxicité chronique et aiguë, Troubles du système nerveux (mémoire, fonctions sensorielles de coordination)
Nickel (Ni)	Maladies respiratoires, asthme, malformations congénitales, cancérigène
Plomb (Pb)	Toxique, troubles du système nerveux et cardiovasculaire, fatigue, cancérigène, affection du foie et des reins
Sélénium (Se)	Essentiel à faibles doses, toxique à doses élevées
Zinc (Zn)	Toxique pour les végétaux à de fortes teneurs

I.8.2 Paramètres microbiologique

Les paramètres microbiologiques sont des indicateurs importants de la qualité microbiologiques de l'eau. Ils sont utilisés pour évaluer le risque microbiologiques d'origine hydrique et pour assurer la sécurité de l'eau potable.

Le risque microbiologique d'origine hydrique, ou risque infectieux correspond à la présence dans l'eau de microorganismes pathogènes, ou potentiellement pathogènes, et ce en quantité au seuil d'infection fixé par L'OMS.

Les microorganismes pathogènes sont des microorganismes peuvent causer des maladies chez l'homme. Ils peuvent être des bactéries, des virus, des protozoaires ou des champignons. La mise on œuvre de procédés élémentaires désinfection, tels que la chloration de l'eau, permet de réduire la présence de microorganismes pathogènes dans l'eau.

Exemples de maladies transmises par l'eau :

- La diarrhée
- La choléra
- La dysenterie
- La fièvre typhoïde
- La poliomyélite [27].

Tableau I.6: Principales maladies d'origine hydrique et agents microbiologiques responsables. [28].

Origine	Maladies	Agents pathogènes
Parasitaire	Dysenterie amibienne	Gastro-entérites
	Gastro-entérites	Giardia lamblia Cryptosporidium parvum
Bactérienne	Fievrestyphoïde et paratyphoïde	Salmonella typhi Salmonella paratyphiB
	Dysenterie bacillaire	Shigella
	Cholera	Vibrio cholerae
	Gastro-entérites	Escherichia coli Enterotoxinogène Campylobactérocolitica Yersinia enterocolitica
Virale	Hépatites A et E	Virus hépatite A et E
	Poliomyélite	Virus poliomyélitique
	Gastro-entérites	Rota virus Entérovirus Calicivirus Adénovirus...

I.9 Conclusion

En Algérie, le recours au dessalement de l'eau de mer est une solution de plus en plus utilisée pour répondre à la demande croissante en eau potable. Le pays dispose d'un littoral long de 1200 Km, ce qui offre un potentiel important pour le dessalement.

En 2023, l'Algérie dispose d'une capacité de dessalement d'environ 1,5 million de m³ par jour d'ici 2030.

Le dessalement est une solution essentielle pour garantir l'accès à l'eau potable aux populations des villes côtières algériennes.

Bien entendu, le dessalement présente également quelques inconvénients. Le principal inconvénient est le coût de l'énergie nécessaire au processus de dessalement. Le coût de l'énergie peut être réduit par l'utilisation de sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie solaire ou l'énergie éolienne.

Un autre inconvénient du dessalement est l'impact environnemental. Le dessalement peut entraîner une augmentation de la salinité de l'eau côtière et une pollution de l'environnement. Ces impacts peuvent être réduits par la mise en place de mesures de protection de l'environnement.

CHAPITRE II

Chapitre II : Généralités sur le dessalement de l'eau

II.1 Introduction

Le dessalement, également appelé dessalage, est un procédé qui permet de séparer l'eau et les sels d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau saumâtre d'origine continentale.

L'évaporation ou la distillation était la technologie de base des premières installations de dessalement à grande échelle, qui sont apparues dans les années 1950 et 1960, principalement au Moyen-Orient. Ces régions, pauvres en eau mais riches en combustibles fossiles, convertissaient leurs ressources énergétiques en ce dont elles avaient le plus besoin : de l'eau.

Cependant, les technologies qui utilisent la chaleur nécessitent de grandes quantités d'énergie [29].

II.2 Situation de dessalement dans le monde

Le dessalement de l'eau est en pleine croissance dans le monde. La demande en eau potable, tant quantitativement que qualitativement, est de plus en plus forte, parallèlement aux risques de pollution (vecteurs de maladies, toxines ou matières en suspension ou agents pathogènes) qui persistent à chaque étape du cycle de l'eau. La disponibilité géographique de l'eau douce est inégalement répartie dans le monde (Figure 01).

Face à cette réalité, le dessalement de l'eau de mer est devenu une solution incontournable pour pallier ce déséquilibre. La capacité installée de dessalement augmente en moyenne de plus de 10 % par an. Environ 17 000 unités de production d'eau potable, soit 58 millions de m³/jour d'eau produite, la production d'eau dessalée devrait dépasser 120 millions de m³/jour en 2019. La technologie de l'osmose inverse, qui constituait 20% des unités de production au début des années 1980, est devenue si importante aujourd'hui. Rappelons que la capacité mondiale de production en eau potable est de l'ordre de 500 millions de m³/j (Figure 02).

La Chine a annoncé qu'elle produirait 1 million de m³ par jour d'eau de mer traitée en 2010 et jusqu'à 3 millions de m³ par jour en 2020. 60 % des besoins en eau douce des pays du Golfe Persique sont satisfaits par le dessalement de l'eau de mer. En Méditerranée, la production artificielle d'eau douce par dessalement d'eau de mer ou d'eau saumâtre souterraine a commencé dans des situations d'isolement insulaire (Malte, Baléares, Dalmatie, Chypre, Cyclades...), littorales (Libye) et désertiques (Algérie), et se développe rapidement dans toute la région. L'Algérie et l'Espagne ont clairement opté pour cette option pour résoudre leur problème de pénurie. À ce jour, la Méditerranée

représente environ un quart du dessalement mondial. Vers 2030, la région pourrait atteindre le niveau actuel du dessalement mondial (soit environ 30 à 40 millions de m³ par jour) [30].

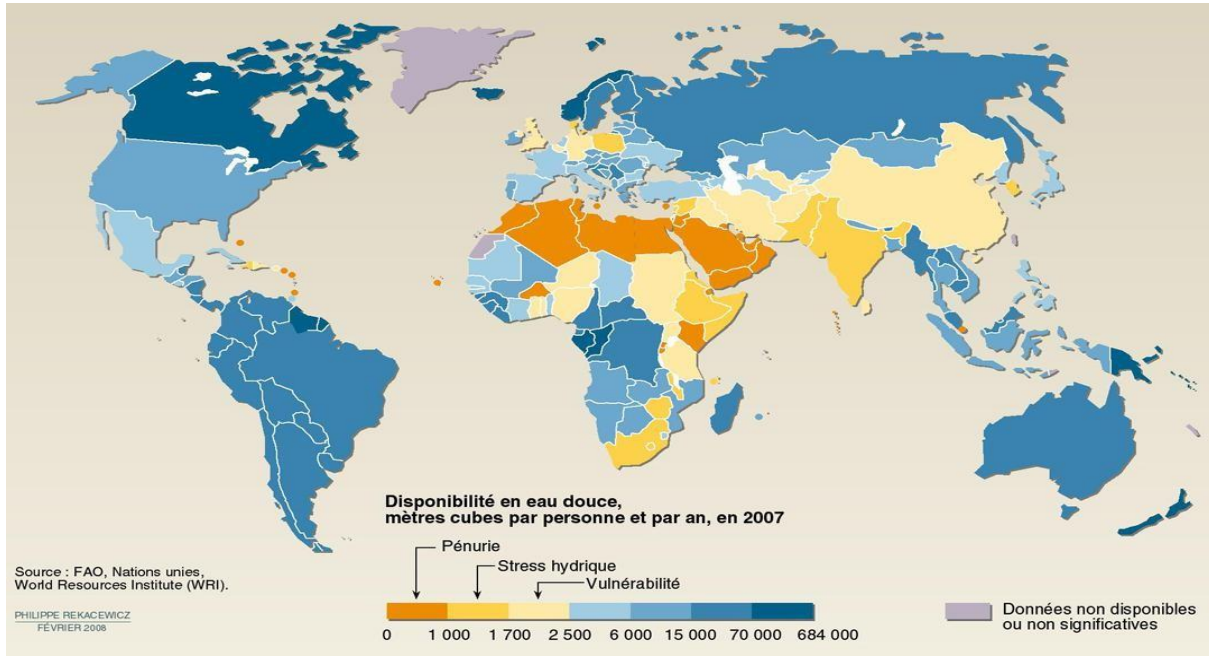


Figure II.1: la disponibilité en eau douce par état en 2007 en m³ par habitant par an [31].

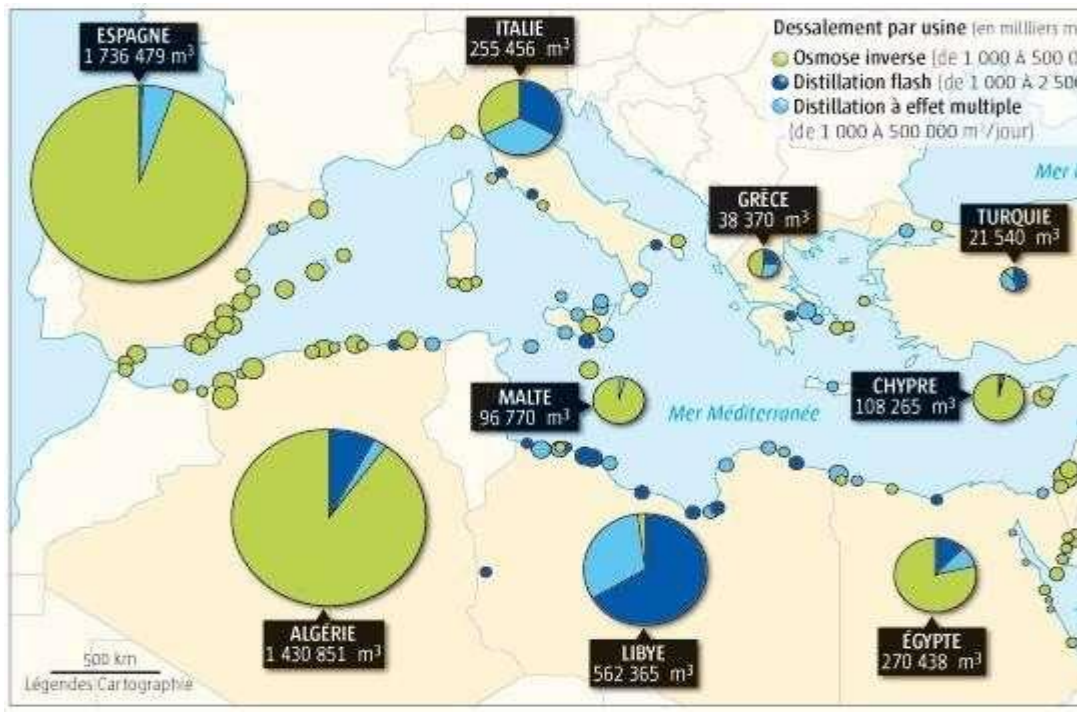


Figure II.2: Le dessalement à travers la méditerranée [32].

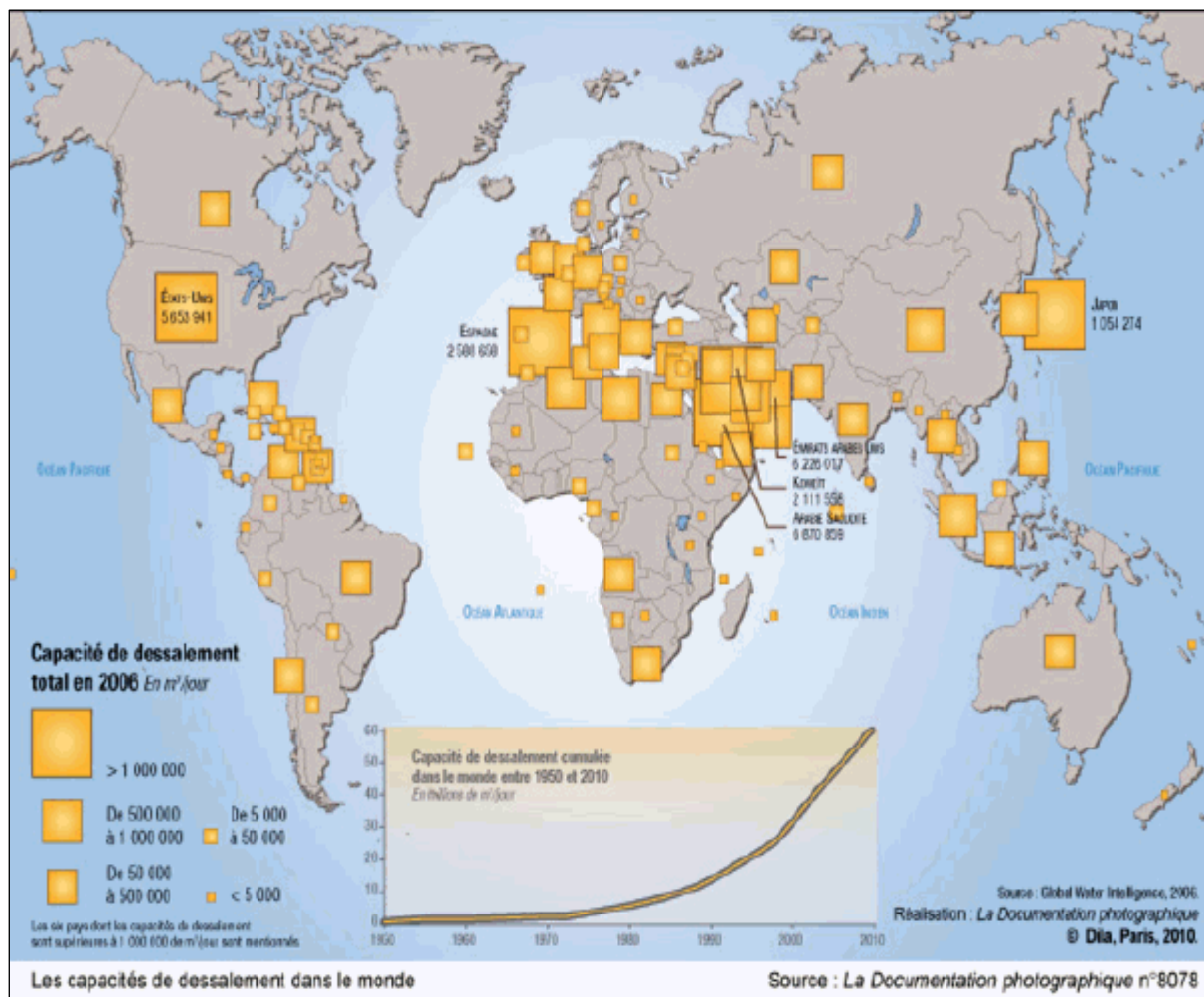


Figure II.3 : Capacités de dessalement dans le monde [33].

Les figures 02 et 03 au -dessous représentent la capacité du dessalement dans le bassin de la méditerranée et dans le monde entier.

II.3 Définition de dessalement de l'eau de mer

Le dessalement est un processus qui permet de séparer l'eau des sels contenus dans une eau brute, qu'elle soit de l'eau de mer ou une eau saumâtre d'origine continentale [34]. Cette technique consiste à supprimer le chlorure de sodium (NaCl) de l'eau de mer. Pour faire face aux pénuries d'eau, des systèmes sont mis en place pour produire de l'eau douce et potable à partir d'eau de mer. Parmi les techniques les plus utilisées, on trouve l'osmose inverse (traitement préalable de l'eau de mer par filtration et désinfection) et la distillation (purification par évaporation de l'eau de mer) [35].

II.3.1 Schéma général d'une installation de dessalement

On peut diviser une installation de dessalement en 4 postes principaux :

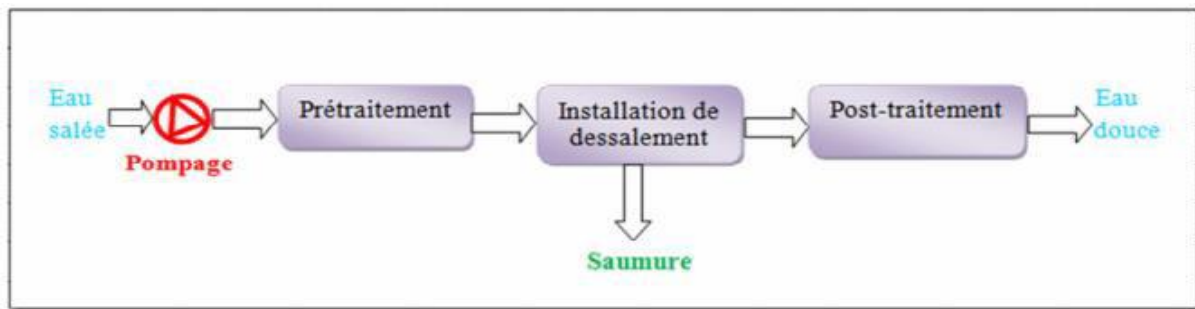


Figure II.4 : Schéma général d'une installation de dessalement [36].

II.4 Historique de dessalement

L'idée d'extraire de l'eau potable de l'eau de mer n'est pas nouvelle. La nature le fait depuis toujours, par le cycle naturel de l'eau. Sous l'effet du soleil, les océans s'évaporent, la vapeur d'eau forme des nuages qui se transforment en pluie ou neige dès qu'elles rencontrent des régions plus froides. L'eau des précipitations est pure car le sel contenu dans l'eau de mer n'est pas volatil, seule l'eau s'évapore.

Les marins de l'Antiquité, confrontés à l'approvisionnement en eau à bord des bateaux, avaient déjà imité la nature en faisant bouillir de l'eau de mer pour en extraire de l'eau non salée par condensation de la vapeur produite. Aristote (384-322 av. J.-C.) écrit dans ses "Météorologiques" : "J'ai prouvé expérimentalement que l'eau salée qui s'évapore s'adoucit et que la vapeur condensée ne réforme pas de l'eau de mer." Pline l'Ancien (23-79), Alexandre d'Aphrodise (150-215) et saint Basile (329-379) semblent avoir été les premiers à décrire des procédés pour rendre l'eau de mer potable [37].

Il a fallu attendre le XVIIIe siècle pour que l'on évoque des procédés permettant d'augmenter la production, d'améliorer la pureté de l'eau ou d'économiser l'énergie. C'est seulement au début du XXe siècle qu'apparaissent les premiers procédés industriels de distillation, c'est-à-dire de concentration des solutions et de production d'eau douce par vaporisation puis condensation.

En 1959, un procédé appelé osmose inverse est mis au point à l'Université de Californie [38]. Dans le prolongement de la méthode plus ancienne de séparation des sels contenus dans les mélasses (Dubrunfaut, 1853[39]) et des colloïdes (Graham 1854, à l'origine du terme osmose [40]). Il s'agit d'un procédé membranaire qui permet d'extraire de l'eau douce de l'eau salée à travers une membrane semi-perméable, en appliquant une pression. Les premières membranes commerciales datent de 1970.

Au cours de la Seconde Guerre mondiale, l'idée de dessaler l'eau de mer pour répondre aux besoins en eau potable des populations a pris de l'ampleur. Aux États-Unis, le "Saline Water Act" est adopté en 1952 pour fournir un soutien fédéral au développement de la technologie du dessalement. Le Département de l'intérieur, par l'intermédiaire de l'Office of Saline Water (OSW), finance pendant les années 1950 et 1960 la construction d'usines de démonstration.

Le dessalement est une science relativement nouvelle qui s'est largement développée au cours de la seconde moitié du XXe siècle et qui continue de subir des améliorations technologiques. Il est intéressant de noter que l'une des premières usines de démonstration de dessalement d'eau de mer à être construite aux États-Unis était à Freeport, au Texas, en 1961. Dow, en coopération avec le Département américain de l'Intérieur, a construit une usine de distillation verticale à tube long (LTV) d'un coût de 1,2 million de dollars, qui produisait de l'eau pour la ville de Freeport et pour les opérations de Dow. L'usine a été officiellement ouverte le 21 juin 1961 par le président John F. Kennedy. En appuyant sur un bouton de la Maison Blanche. Le vice-président Lyndon Johnson a assisté à l'événement inaugural à Freeport [41].

Lors de son discours pour dédier l'usine de dessalement, le président Kennedy a déclaré : "Aucun programme de ressources en eau n'est plus important que nos efforts pour convertir l'eau des ressources naturelles les plus grandes et les moins chères du monde - nos océans - en eau potable. Une telle percée mettrait fin à d'âpres luttes entre voisins, États et nations. "Ces déclarations sont toujours vraies aujourd'hui, plus de 40 ans plus tard. Le dessalement est une technologie essentielle pour faire face aux défis de la pénurie d'eau douce dans le monde [41].

II.4.1 Historique de dessalement en Algérie

L'expérience algérienne du dessalement de l'eau est étroitement liée au développement de l'industrie pétrolière et sidérurgique. Le recours au dessalement pour l'alimentation exclusive de la population en eau potable est quasi inexistant.

Cependant, une seule expérience a été tentée dans une situation où aucune autre solution n'existait. Il s'agit de l'unité de déminéralisation d'Ouled Djellal, dans la wilaya de Biskra (sud-est de l'Algérie).

Dans l'industrie, la déminéralisation et le dessalement sont utilisés pour fournir de l'eau pour les chaudières, le refroidissement et le traitement. En 1964, trois petits blocs de 8 m³/h chacun ont été installés au complexe de gaz liquéfié d'Arzew (ville côtière à l'ouest du pays). Le procédé utilisé est le procédé à tubes submergés fonctionnant à basse pression. En 1969, une autre installation a vu le jour à Arzew avec une capacité de production de 4560 m³/j. Le procédé utilisé est le procédé MSF

Depuis lors, de nombreuses installations de dessalement et de déminéralisation ont été mises en place parallèlement aux nouveaux complexes. D'autres installations ont été mises en exploitation pour répondre aux besoins en eau de haute pureté nécessaires aux activités des complexes de production d'électricité (Cap Djinet à l'est d'Alger) et de liquéfaction (Arzew et Skikda). De plus, quelques installations sont destinées, principalement dans le sud, à fournir de l'eau de qualité pour la consommation humaine dans les bases pétrolières [42].

Tableau II.01 : Les grandes stations de dessalement en Algérie [43].

STATION DE DESSALEMENT		SITUATION DU PROJET		Avancement au 01 Juin 2024
Kahrama (Arzew)	88880m3/Jet320MW	Mise en service	Le 12 novembre 2005	En exploitation
Hamma (Alger)	200000m3/j	Mise en service	Le 02 février 2008	En exploitation
Skikda (Zone Industrielle)	100 000m3/J	Mise en service	Le 04 mars 2009	En exploitation
Béni Saf (Ain Temouchent)	200 000 m3/j	Mise en service	Le 15 novembre 2009	En exploitation
Souk Tlata (Tlemcen)	200 000 m3/J	Mise en service	Le 13 avril 2011	En exploitation
Fouka (Tipaza)	120 000 m3/J	Mise en service	Le 30 juillet 2011	En exploitation
Mostaganem	200 000 m3/J	Mise en service	Le 28 septembre 2011	En exploitation
Honaine (Tlemcen)	200000m3/J	Mise en service	Le 03 juillet 2012	En exploitation
Cap Djinet (Boumerdes)	100 000 m3/J	Mise en service	Le 28 septembre 2011	En exploitation
Mactaa (Oran)	500000m3/J	Mise en service	Le 27 juin 2013	En exploitation
Tenes (Chlef)	200 000 m3/J	Mise en service	août 2014	En exploitation
Oued Sebt (Tipaza)	100 000 m3/jour	Mise en service		En exploitation
Cap Blanc (Oran)	300.000 m3/j	En construction		
Koudiet Eddraouche (ELTarf)	300.000 m3/j			
Tighremt Bejaia	300.000 m3/j			
Cap Djinet (Boumerdes)	300.000 m3/j			
Fouka 2 (Tipaza)	300 000 m3/jour			

II.5 Les étapes de dessalement de l'eau de mer

- Le processus de dessalement d'eau de mer se fait en quatre étapes :
 - La captation de l'eau de mer.
 - Le prétraitement .
 - Les différents procédés de dessalement .
 - Le post-traitement ou minéralisation [36].

II.5.1 Captation d'eau de mer

Peut s'effectuer soit par prise directe, soit par puits côtiers. Ce dernier système permet d'obtenir une eau non turbide, ce qui soulage les prétraitements [36].

Dans le cas où l'eau provient de la mer via une prise d'eau à ciel ouvert, le système comprendra les têtes de prises d'eau, les conduites d'acheminement des têtes de prises d'eau vers les puits de prises d'eau, la station de pompage dans le puits et les conduites à terre, du puits à l'installation de prétraitement. Les têtes de prises d'eau doivent être correctement situées afin d'éviter l'aspiration de matériaux flottants ou de sédiments, pour garantir une alimentation suffisante en eau salée [44].

II.5.2 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 [45].

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 [36].

II.5.3 Les différents procédés de dessalement

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 [46].

II.5.3.1 Procédés de distillation

La distillation est la technique de dessalement de l'eau de mer la plus ancienne. Elle s'appuie sur les propriétés d'évaporation-condensation de l'eau : le chauffage de la solution à purifier permet la vaporisation de l'eau et sa récupération par condensation. Elle conduit à la production d'une eau pure et d'une solution concentrée, le concentra. Ce procédé thermique est un grand consommateur d'énergie [47].

La distillation consiste à faire évaporer l'eau de mer, soit en utilisant la chaleur des rayons solaires, soit en la chauffant dans une chaudière [48].

Il s'agit dans tous les cas de distillation sous vide qui permet de travailler à des températures inférieures à 120 °C [49].

II.5.3.1.1 Distillation à simple effet

Ce procédé est mis en œuvre depuis longtemps sur les navires, où les moteurs diesel émettent une quantité significative de chaleur récupérable [50].

Son principe est simple : il reproduit le cycle naturel de l'eau. Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer (Figure II.5). La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par de l'eau de mer froide. Un groupe électropompe soutire l'eau condensée, un deuxième, l'eau de mer concentrée [51].

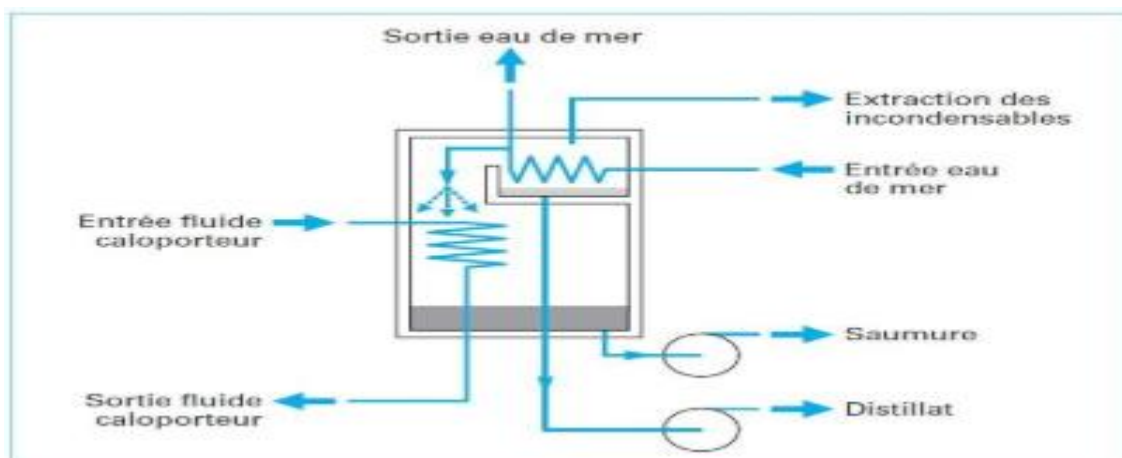


Figure II.5 : Distillation à simple effet [52].

II.5.3.1.2 Distillation à multiples effets

Une installation de distillation à effet multiple est constituée par la juxtaposition de n cellules fonctionnant selon le principe de l'effet simple (Figure I.6). Le fluide de réchauffage porte à l'ébullition l'eau de mer admise dans la première cellule (entre 70 et 80°C), qui est aussi la cellule où règne la température la plus haute. La vapeur émise par l'ébullition de l'eau de mer est transférée dans la cellule voisine, où on maintient une pression légèrement inférieure. La température d'ébullition diminuant avec la pression, on vaporise l'eau de mer présente dans la deuxième cellule. C'est le deuxième effet. On peut évidemment répéter l'opération plusieurs fois, la limite basse étant donnée par la température de l'eau de mer froide [53].

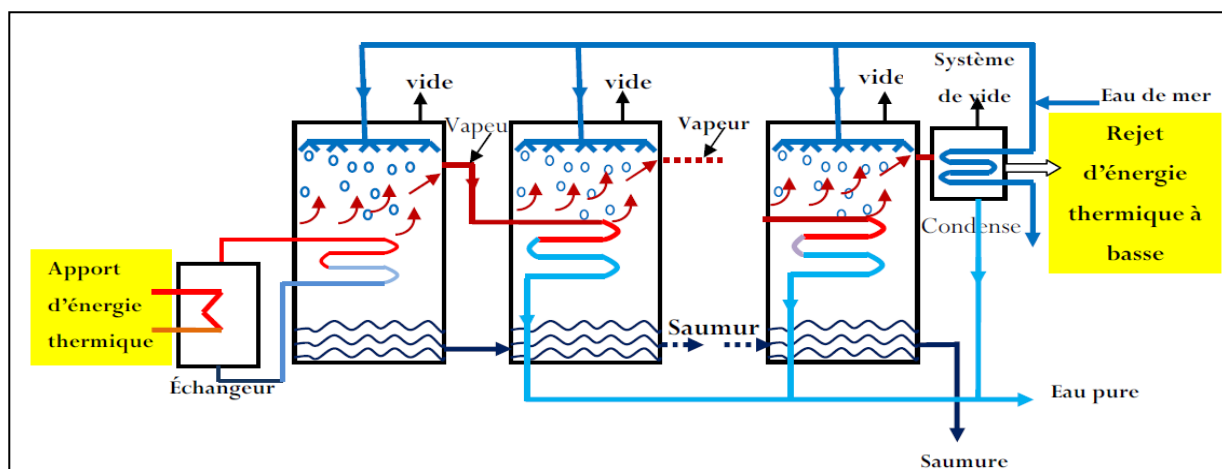


Figure II.6 : Distillation à effet multiple [54] .

II.5.3.1.3. Distillation par TCD (Thermo- Compression Distiller)

Les unités de dessalement de type TCD (Thermo- Compression Distiller) dessalent l'eau de mer par un procédé d'évaporation et de condensation sous vide. Dans ces changements de phase, tous les sels restent dans la saumure et la vapeur condensée est pratiquement exempte de sels (la teneur résiduelle en sel est plus de 10000 fois inférieure à celle de l'eau d'alimentation).

Ces unités de dessalement se composent de cellules d'évaporation maintenues à des températures décroissantes. La vapeur, introduite dans la première cellule se condense dans un faisceau tubulaire arrosé extérieurement par l'eau de mer. La chaleur latente de condensation permet à une partie de l'eau de mer de s'évaporer à une pression et à une température inférieure. La vapeur produite va ensuite dans la seconde cellule, où elle se condense, permettant ainsi d'évaporer une nouvelle partie de l'eau de mer à une pression et une température encore inférieures. Le même procédé de condensation /évaporation se poursuit de cellule en cellule. La vapeur produite dans la dernière cellule est condensée dans un condenseur refroidi avec de l'eau de mer. La vapeur condensée dans chaque cellule va à la cellule suivante par l'intermédiaire de tubes en U. Cette eau est finalement extraite par la

pompe eau distillée. De façon similaire, la partie d'eau de mer qui n'a pas été évaporée (la saumure) va de cellule en cellule par l'intermédiaire de tubes en U pour être finalement extraite de la dernière cellule par la pompe saumure.

De façon à améliorer l'efficacité thermique de la distillation multi-étagée, les unités de dessalement de type TCD utilisent un système de pompe à chaleur en recyclant de la vapeur produite à basse. Ce système de pompe à chaleur utilise un compresseur de vapeur statique (sans pièces mobiles) appelé thermo-compresseur. Le thermo-compresseur utilisant de la vapeur motrice provenant d'une source disponible ou d'une chaudière, aspire de la vapeur basse pression et la décomprime par mélange avec la vapeur motrice à un niveau suffisant pour alimenter la première cellule. La cellule d'où la vapeur est aspirée est choisie de façon à optimiser les performances [55].

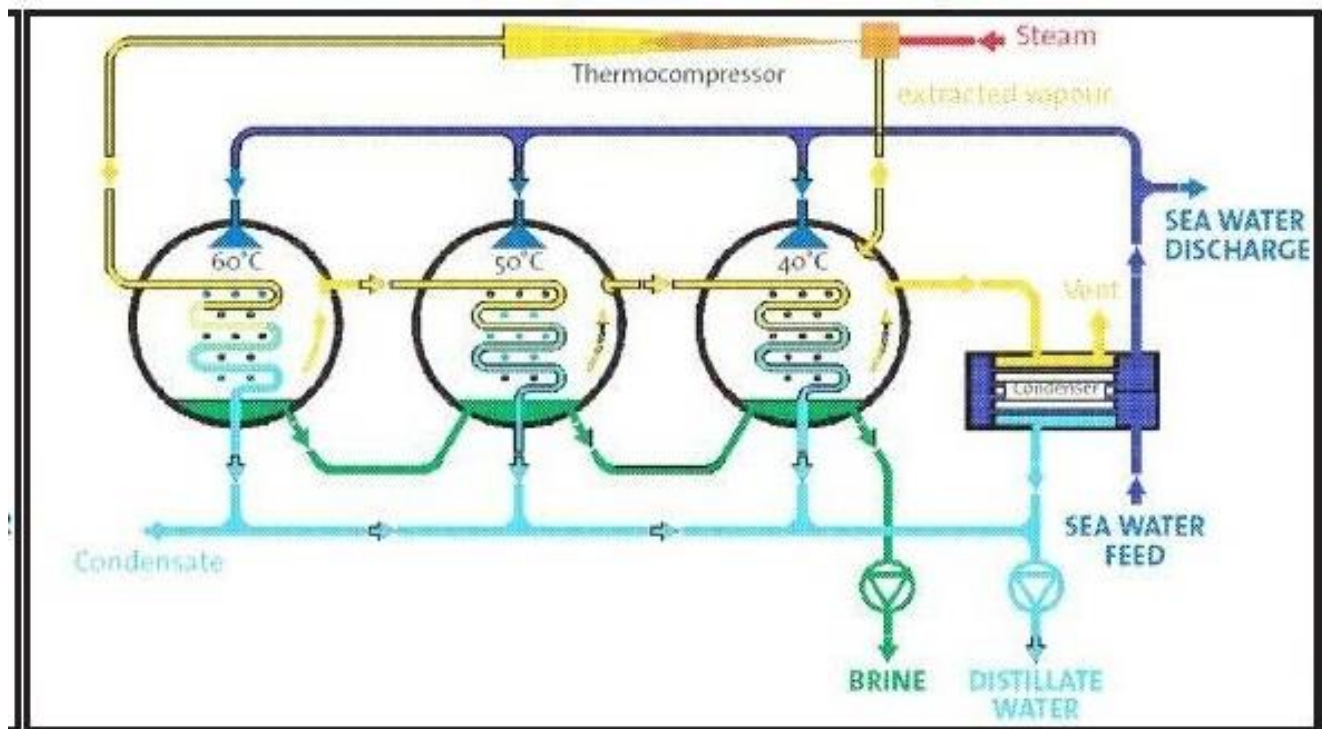


Figure II.7 : Distillation par TCD (Thermo- Compression Distiller) [51] .

Les avantages et les inconvénients de la distillation

-Les avantages

- Indépendance à la variation de la qualité d'eau brute
- Utilisation pour des grandes capacités de production d'eau
- Exploitation relativement aisée

- Une eau produite présentant un TDS faible requis particulièrement pour les besoins industriels [46].

- Les inconvénients

- Un taux de conversion bas (inférieur à 35%).
- Une consommation spécifique d'énergie relativement élevée.
- Une non flexibilité par rapport à la variation de la demande en eau.
- Un coût d'investissement élevé [46].

II.5.3.2 Procèdes membranaires

Les technologies de dessalement membranaire sont des procédés qui utilisent des membranes semi-perméables pour séparer l'eau de mer en eau potable et en saumure. Ces membranes permettent le passage de l'eau, mais empêchent le passage des sels dissous.

Les trois forces motrices fondamentales peuvent être utilisées dans les systèmes de dessalement membranaire :

- La pression : L'osmose inverse (OI) et la nanofiltration (NF) sont des procédés basés sur la pression. Dans l'OI, l'eau de mer est pressurisée à des pressions élevées (jusqu'à 80bars) pour forcer l'eau à traverser la membrane. Dans la NF, la pression est moindre (jusqu'à 40 bars) et permet le passage de certains sels dissous. [56]. [57]
- Le potentiel électrique : L'électrodialyse (ED) et l'électrodialyse à inversion de polarité (EDR) sont des procédés basés sur le potentiel électrique. Dans l'ED, les ions sont séparés par un champ électrique.
- Le gradient de concentration : L'osmose directe (FO) est un procédé basé sur le gradient de concentration. [57]

Les technologies de dessalement membranaire sont utilisées pour produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer ou d'autres eaux saumâtres.

L'OI est la technologie la plus répandue, car elle permet d'obtenir une eau potable de haute qualité. La NF est également utilisée, mais elle permet d'obtenir une eau potable de moindre qualité. L'ED et l'EDR sont peut utilisées pour le dessalement de l'eau de mer, car elles sont plus coûteuses que l'OI. Une nouvelle technique de dessalinisation à double passage a été développée. Elle a été testée par le département de eaux de Long Beach en Californie. La FO est une technologie émergente qui n'a pas encore été commercialisée à grande échelle [57].

II.5.3.2.1 Electrodialyse (ED) et inversion d'électrodialyse (EDR)

Les procédés d'électrodialyse (ED) et d'électrodialyse réversible (EDR) utilisent des membranes sélectives aux ions et un potentiel électrique comme force motrice pour séparer les espèces chargées de l'eau. Les systèmes à pression (RO et NF) font passer l'eau de manière sélective à travers une membrane et retiennent les sels dissous dans le concentré. Au contraire, l'ED et l'EDR utilisent un potentiel électrique pour attirer les ions dissous à travers un ensemble de membranes (cations d'un côté, anions de l'autre), tandis que l'eau désionisée passe entre les membranes et est finalement récupérée [57].

➤ Principe de fonctionnement

L'ED et l'EDR utilisent un potentiel électrique pour forcer les ions à traverser des membranes. Les membranes sont sélectives, ce qui signifie qu'elles ne laissent passer que certains types d'ions.

Dans l'ED, les membranes sont disposées en alternance, avec des membranes cationiques d'un côté et des membranes anioniques de l'autre. Les cations sont attirés vers la cathode, tandis que les anions sont attirés vers l'anode. Le résultat est la formation d'eau dessalée entre les membranes.

L'EDR est une modification de l'ED qui inverse périodiquement la polarité du potentiel électrique. Cela permet de réduire les dépôts de tartre et de saleté sur les membranes, ce qui permet d'augmenter le taux de récupération.

L'ED et l'EDR sont utilisés pour le dessalement de l'eau saumâtre et de l'eau de mer. Cependant, ils sont généralement moins efficaces que l'osmose inverse pour le dessalement de l'eau de mer.

L'ED et l'EDR présentent certaines limites :

- Ils ne sont pas efficaces pour le dessalement de l'eau de mer à haute salinité.
- Ils ne sont pas capables d'éliminer les bactéries, les virus et les autres contaminants biologiques [57]

Les membranes utilisées en électrodialyse sont constituées d'un réseau de polymères portant des charges électriques fixes, qui attirent et retiennent les ions de charge opposé.

-Les membranes échangeuses d'ions sont classées en deux catégories :

- Les membranes échangeuses de cations sont perméables uniquement aux cations. Elles sont constituées d'un polymère portant des groupes sulfoniques (SO_3^-) chargées négativement. Les cations sont attirés par ces charges négatives et peuvent les traverser la membrane.

➤ Les membranes échangeuses d'anions sont perméables uniquement aux anions. Elles sont constituées d'un polymère portant des groupes ammonium quaternaires (NR_3^+) chargés positivement. Les anions sont attirés par ces charges positives et peuvent les traverser la membrane. [58]

❖ Les avantages

1. Faibles coût d'exploitation et d'investissement.
2. Source d'énergie flexible.
3. Taux élevé de conversion (80%).
4. Faible consommation d'énergie.
5. Faibles exigences sur les équipements.
6. Encombrement faible [59].

❖ Les inconvénients

1. Conseillée seulement pour des eaux à salinité relativement faibles (<3000ppm).
2. Nécessité du prétraitement minutieux de l'eau d'alimentation.
3. Faible capacité de production.
4. Pureté affectée par la qualité de l'eau d'alimentation. [59].

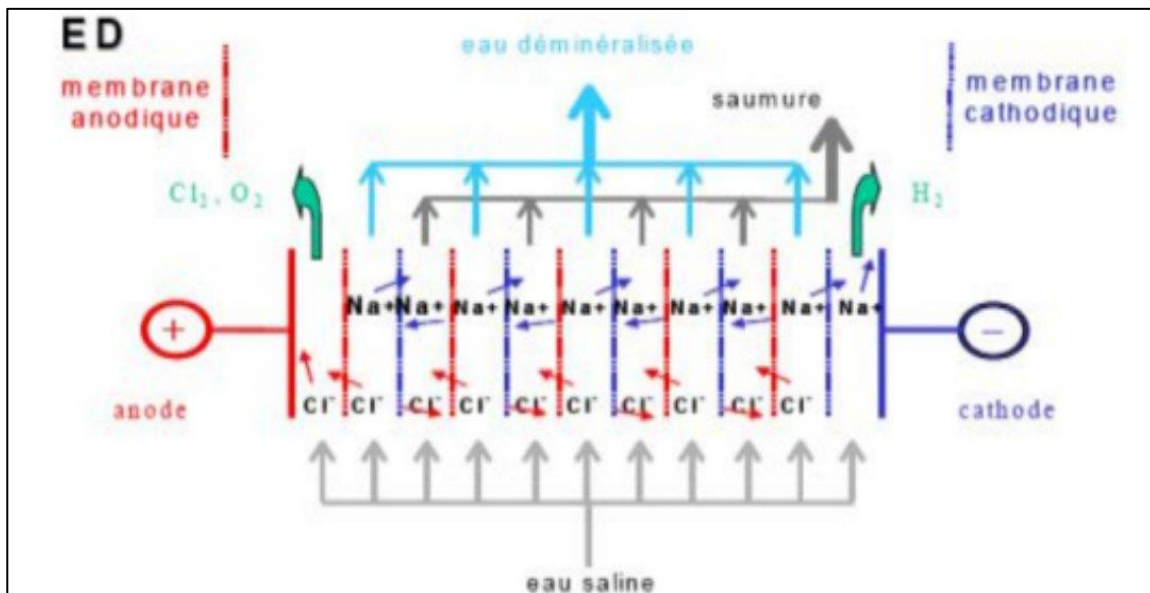


Figure II.8 : Principe de dessalement par électrodialyse [60].

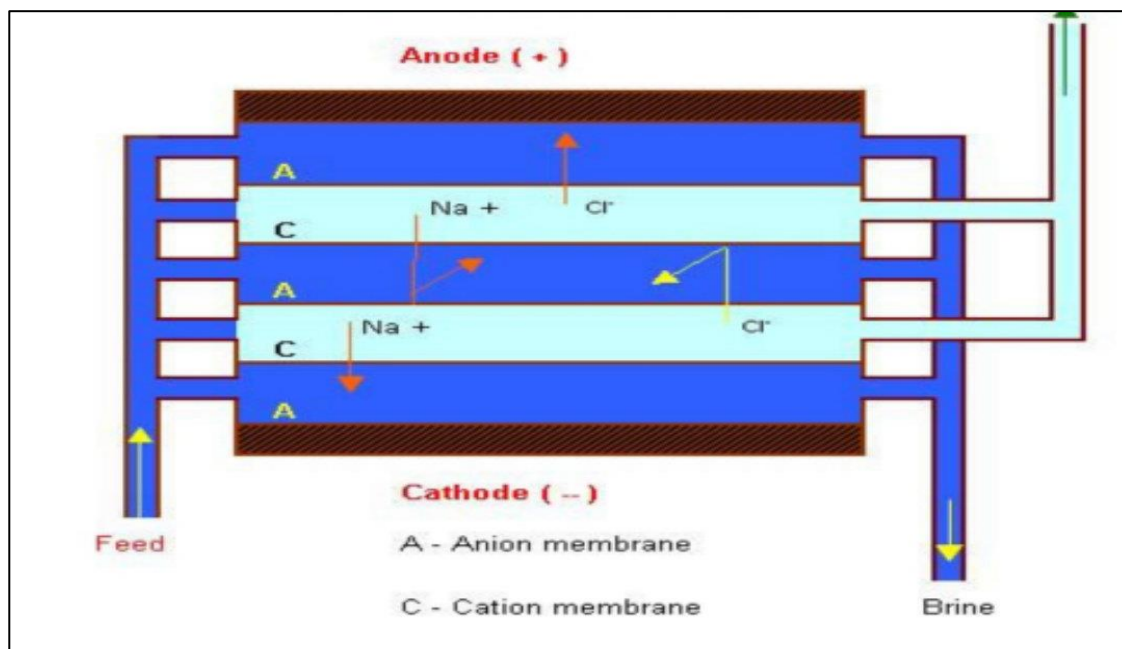


Figure II.9: Processus ED simplifié [61].

II.5.3.2.2 Osmose inverse

L'osmose inverse est un procédé qui utilise l'osmose, mais dans le sens inverse. Figure II.10 illustre les phénomènes d'osmose et d'osmose inverse. Dans cette configuration, le sens du flux de solvant (généralement l'eau) est déterminé par son potentiel chimique, qui dépend de la pression, de la température et de la concentration en solides dissous.

De l'eau pure en contact avec les deux faces d'une membrane semi-perméable idéale à pression et température égales ne présente aucun flux net à travers la membrane car le potentiel chimique est identique de part et d'autre.

L'ajout d'un sel soluble sur un côté réduit le potentiel chimique de la solution. Un flux osmotique se produit alors de l'eau pure vers la solution salée jusqu'à ce que l'équilibre du potentiel chimique soit restauré.

Cet équilibre est atteint lorsque la différence de pression hydrostatique résultant des changements de volume de part et d'autre est égale à la pression osmotique, une propriété de la solution indépendante de la membrane. L'application d'une pression externe sur le côté de la solution salée, égale à la pression osmotique, provoque également un équilibre.

Une pression supplémentaire augmente le potentiel chimique de l'eau dans la solution salée et provoque un flux de solvant vers le côté eau pure, car son potentiel chimique est désormais plus faible.

L'osmose et l'osmose inverse sont des phénomènes régis par le potentiel chimique, qui déterminent le flux de l'eau en fonction des concentrations et des pressions de part et d'autre d'une membrane semi-perméable [13].

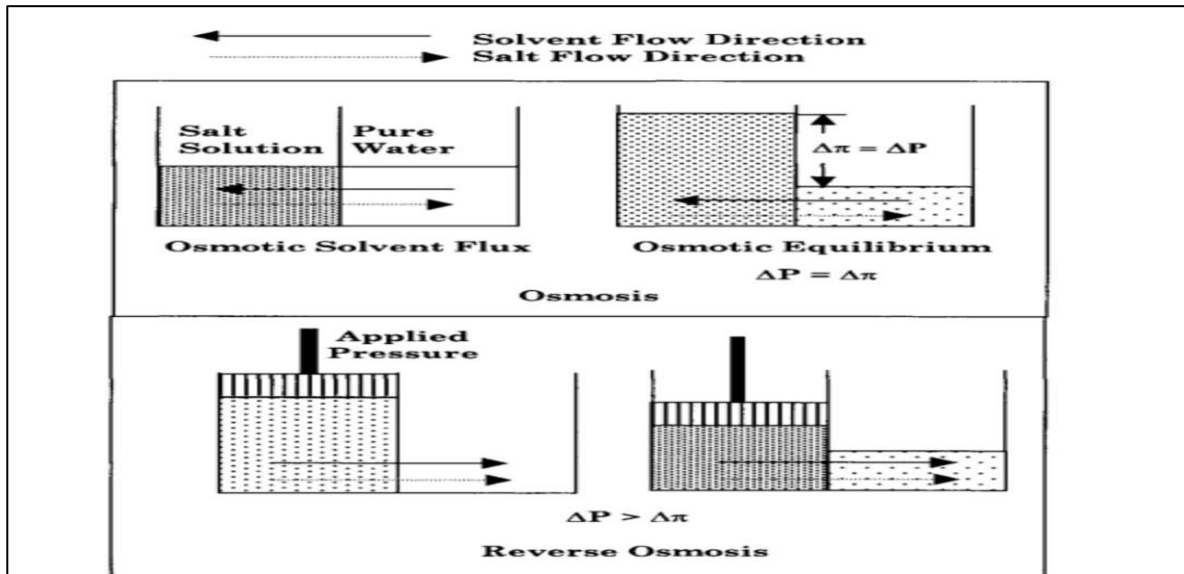


Figure II.10 : Procédé d'osmose et d'osmose inverse [13].

➤ Pression osmotique et pression de fonctionnement

➤ Pression osmotique (π) : La pression osmotique d'une solution (π) peut être déterminée expérimentalement en mesurant la concentration des sels dissous dans la solution.

- La pression osmotique est obtenue de l'équation suivante :

$$\Pi = RT \sum_i X_i$$

- Où :

- π : pression osmotique (kPa)
- T : température (K)
- R : constante universelle des gaz, 8,314 kPa m³/ kg. mol.K
- X_i : concentration de toutes les composantes dans une solution (kg. mol /m³)
- La valeur de n peut être approchée en supposant que 1000 ppm de matières solides totales dissoutes (TDS) équivaut à 75,84 kPa de pression osmotique.
- La pression osmotique et la pression de fonctionnement sont deux variables importantes dans le processus d'osmose inverse. La pression osmotique est déterminée par la concentration des sels dissous et la température, tandis que la pression de fonctionnement est ajustée pour surmonter les différentes résistances que l'eau doit surmonter pour traverser la membrane.[13].

- Les membranes d'osmose inverse ont les caractéristiques suivantes :
 - Une perméabilité à l'eau élevée : Cela permet à l'eau de passer rapidement et efficacement à travers la membrane.
 - Une perméabilité semi-perméable élevée aux impuretés : Cela empêche les impuretés de passer à travers la membrane.
 - Une stabilité chimique et électrique : Cela permet aux membranes de résister aux effets des produits chimiques et des variations de température.
 - Une durée de vie de 3 à 5 ans : Les membranes d'osmose inverse doivent être remplacées régulièrement, mais elles peuvent durer plusieurs années.
 - Deux types principaux : Les membranes d'osmose inverse commerciales sont principalement de deux types : l'acétate de cellulose (CA) et le polyamide (PA).
 - Le choix de la membrane : Le choix de la membrane d'osmose inverse dépend des besoins spécifiques de l'application.[13].

- **Les inconvénients**
 1. Basse qualité d'eau (250-500 ppm).
 2. Coût élevé : Les équipements et les matériaux nécessaires au traitement de l'eau non potable peuvent être très coûteux.
 3. Entretien complexe : Certaines des techniques utilisées pour traiter l'eau non potable requièrent un entretien complexe pour garantir leur fonctionnement efficace.
 4. Temps de construction long : La construction d'une usine de traitement de l'eau non potable peut prendre beaucoup de temps [59]

- **Les avantages**
 1. Convient pour l'eau de mer et saumâtre : Cette technique peut être utilisée pour traiter l'eau de mer et l'eau saumâtre.
 2. Flexibilité dans la quantité et la qualité de l'eau : Cette technique peut être utilisée pour traiter une variété de quantités et de qualités d'eau.

3. Faible consommation de l'énergie par rapport à MED et VC : Cette technique consomme moins d'énergie que les techniques MED et VC.
4. Flexibilité pour l'emplacement du site : Cette technique peut être installée dans une variété d'emplacements.
5. Flexibilité dans le démarrage et l'arrêt de l'opération de dessalement : Cette technique est facile à démarrer et à arrêter.
6. Technique simple : Cette technique est facile à opérer [59].

II.5.3.3 Autres procédés de dessalement

II.5.3.3.1 Echange ionique

L'échange d'ions est une technologie de traitement de l'eau par adsorption sur un matériau solide appelé « échangeur ionique » pour échanger des ions indésirables dans l'eau contre des ions plus souhaitables. Les résines d'échange d'ions sont fabriquées à partir de matériaux synthétiques ou naturels utilisés pour l'élimination ciblée de la dureté, des nitrates, du bore, des matières organiques naturelles, des perchlorates, des chromates, de l'uranium et de divers autres métaux.

La déminéralisation de l'eau par cette procédure est obtenue en faisant circuler de l'eau dans des réservoirs contenant des résines cationiques et ou anioniques. La résine cationique est celle qui se charge d'échanger chaque cation (ions chargés positivement) par un cation d'hydrogène (H^+). La résine anionique, elle échange chaque anion (ions chargés négativement) par un anion hydroxylés (OH^-) et s'unissent finalement pour former des molécules de l'eau [62].

➤ Les avantages

- Élimine les ions dissous.
- Solution rentable de purification de l'eau.

➤ Les inconvénients

- N'élimine pas efficacement les bactéries, composés organiques et particules.
- Les résines à usage simple nécessitent une eau prétraitée de bonne qualité pour donner des résultats efficaces et économiques [62].

II.5.3.3.2 Congélation

Congélation est une technologie de dessalement de l'eau de mer. Les cristaux de glace qui se forment sont exempts de sel, car le sel reste dissous dans la saumure cette méthode passe par trois étapes :

1. Congélation partielle de l'eau de mer.
2. Séparation des cristaux de glace pure avec la saumure.
3. Fusion des cristaux de glace.

L'eau de mer est refroidie à environ (-2) degrés Celsius pour former des cristaux de glace sans sel. Des cristaux sont ensuite séparés de l'eau liquide et dissous pour obtenir de l'eau douce [63].

II.5.3.3.3 Distillation solaire

Le distillateur solaire est un système simple et efficace pour produire de l'eau potable à partir d'eau salée, saumâtre ou souillée. Il fonctionne en utilisant l'énergie solaire pour chauffer l'eau et la faire évaporer. La vapeur d'eau se condense ensuite sur une surface froide, et se collecte dans un réservoir.

Il s'agit d'un bassin avec couverture en verre transparent contenant de l'eau salée souvent en forme de V à l'envers. Le bassin est tapissé d'un matériau foncé pour maximiser l'absorption des rayons solaires. Cette installation crée un effet de serre dans lequel le verre permet aux rayons solaires de passer mais où les radiations infrarouges émises par le distillateur sont presque entièrement bloquées par le verre piégeant ainsi la chaleur dans le distillateur.

La vapeur d'eau se condense également sur les côtés du bassin. Le débit moyen d'un bon distillateur solaire est de (3-4) l/m² /j.

Les distillateurs solaires sont une solution simple et efficace pour produire de l'eau potable dans les régions où l'eau douce est rare ou contaminée. Ils sont également utilisés dans les navires et les maisons isolées [62].

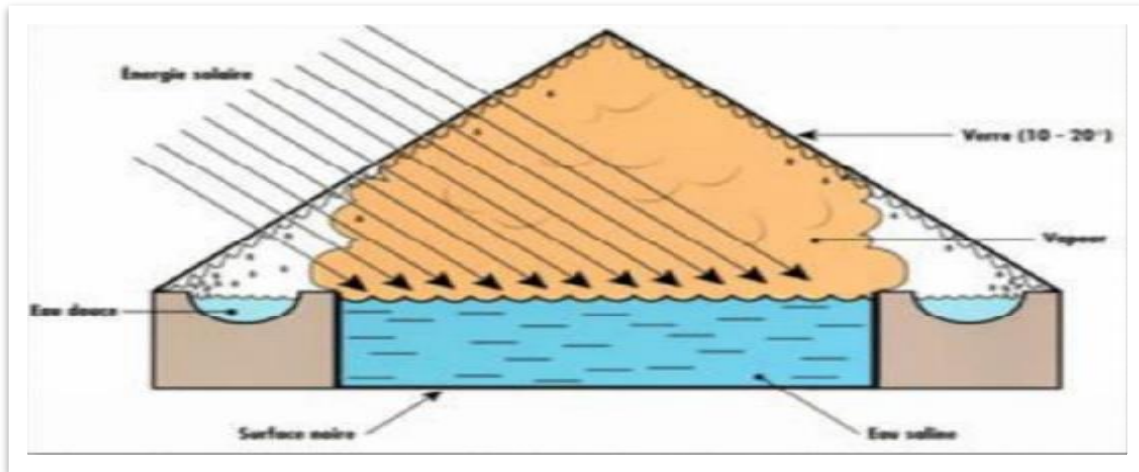


Figure II.11 : Distillateur solaire.

➤ Les avantages

- Utilise l'énergie solaire
- Simple et facile d'utilisation [62].

➤ Les inconvénients

- Nécessite de grands espaces.
- Peu pratique pour de grandes capacités [62].

II.5.4 Post traitement ou reminéralisations

En général, l'étape de poste traitement comporte deux phases principales : l'ajustement de pH et la chloration.

II.5.4.1 Ajustement du ph

L'eau produite par un procédé de dessalement est généralement acide, avec un pH compris entre 5,5 et 6,5. Cette acidité est due à la présence de chlorures, de sulfates et d'autres ions dissous dans l'eau de mer

Pour corriger le pH de l'eau de dessalement, on ajoute une solution alcaline, telle que l'hydroxyde de sodium (NaOH) ou l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Ces produits chimiques réagissent avec les ions acides présents dans l'eau pour augmenter son Ph [64].

II.5.4.2 Chloration

La chloration est la méthode de désinfection de l'eau la plus utilisée dans le monde. Elle est efficace pour détruire une large gamme de micro-organismes pathogènes, notamment les bactéries,

les virus et les parasites. La chloration de l'eau est généralement réalisée en ajoutant une solution d'hypochlorite de sodium, également connue sous le nom d'eau de Javel [65].

II .6 L'impact de dessalement sur l'environnement

Les impacts environnementaux du dessalement peuvent être divisés en deux catégories principales : les impacts liés à la phase de construction et les impacts liés à la phase d'exploitation. Les impacts commencent avec la transformation de l'occupation du sol, puis continuent avec des conséquences visuelles et des nuisances sonores pour s'étendre à des émissions dans l'atmosphère et des rejets dans l'eau ainsi qu'à des dommages potentiels pour le milieu récepteur.

Les activités de construction et d'exploitation peuvent se traduire par une série d'impacts sur les zones littorales, affectant notamment la qualité de l'air, la qualité de l'eau, la flore et la faune marines, la perturbation d'écosystèmes importants [66].

-Cet impact est multiple et se manifeste par :

II.6.1 Rejets atmosphériques

Les usines de dessalement sont essentiellement alimentées par des énergies fossiles, telles que le gaz naturel, le pétrole ou le charbon. La combustion de ces combustibles fossiles libère des polluants atmosphériques dans l'environnement, tels que : gaz carbonique, oxydes de soufre et d'azote, particules solides [67].

II .6.2 Rejets chimiques

Les usines de dessalement utilisent une variété de produits chimiques pour le prétraitement de l'eau d'alimentation ainsi que pour le post-traitement de l'eau produits. la plupart des produits sont utilisés avant tout comme agents biocides, antitartre, antisalissure et antimousse, et ils finissent par modifier la composition de la saumure concentrée [66].

II .6.3 Rejets de saumures

Le dessalement consiste à séparer l'eau de mer de ses sels. Le procédé le plus courant est l'osmose inverse, qui utilise une membrane semi-perméable pour séparer les molécules d'eau des molécules de sel.

L'eau dessalée est ensuite rejetée, tandis que la saumure, qui contient les sels restants, est rejetée. La concentration des sels dans la saumure est plus élevée que dans l'eau de mer d'origine, car la même quantité de sels est présente dans un volume plus petit.

La concentration des sels dans la saumure rejetée varie en fonction du type de procédé utilisé. Dans

le cas de l'osmose inverse, la concentration peut atteindre deux fois celle de l'eau de mer. Dans le cas de la distillation, la concentration peut être encore plus élevée, jusqu'à 70 g/L. Ces saumures sont rejetées en mer ou injectées dans le sol [67].

Les saumures rejetées dans la mer : peuvent avoir un impact négatif sur l'environnement. Elles peuvent augmenter la salinité de l'eau, ce qui peut nuire à la faune et la flore marine. Elles peuvent également contribuer à la formation de dépôts de sel sur le fond marin.

Les saumures rejetées dans le sol : peuvent également avoir un impact négatif sur l'environnement. Elles peuvent contaminer les eaux souterraines et les sols, ce qui peut nuire aux plantes et aux animaux.

Pour limiter l'effet de cet impact, la solution adoptée aujourd'hui est la mise en place de systèmes de diffuseurs permettant de maîtriser la dilution de la saumure avec l'eau de mer et limiter dans l'espace la zone impactée [67].

II.7 Lieu de rejet de la saumure

Le rejet de la saumure, avec une concentration en sel plus élevée que l'eau brute, est généralement recommandé en mer. Cependant, s'il n'est pas possible, il peut être déversé dans des puits ou des bassins d'évaporation à l'intérieur des terres.

Effectivement, lors du rejet dans la mer, il est crucial de choisir des sites d'évacuation à une distance adéquate de la prise d'eau de mer. L'orientation doit être telle que la forte salinité de la saumure ne soit pas absorbée par la prise d'eau. Considérer "excès de salinité" est également essentiel, avec une dilution de la salinité excessive à 12-15 mètres du point de rejet, une vitesse de rejet de 6,0 m/s, et des concentrations spécifiques de saumure et d'eau de mer. Les courants marins au lieu de rejet doivent aussi être pris en compte [68].

II.8 Problèmes techniques rencontrés en dessalement

Les 3 principaux problèmes que l'on rencontre dans le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres sont :

II.8.1 La corrosion

La corrosion des matériaux par l'eau de mer est un problème majeur dans de nombreuses applications industrielles, telles que le dessalement de l'eau, la construction navale, l'exploitation pétrolière et gazière, etc. Elle peut entraîner des coûts importants, liés à la maintenance et au

remplacement des équipements corrodés. Elle dépend d'un certain nombre de facteurs, comme :

- La teneur élevée en chlorures, la teneur en oxygène dissous, la présence de H_2S .
- La présence de particules solides, de bactéries, d'organismes marins (algues).
- La conductivité [69].

-Les principales conséquences de la corrosion sont :

- Rupture des conduites.
- Augmentation de la rugosité.
- Fuites d'eau.
- Pollution de l'eau produite par des agents extérieurs [70].

II .8.2 L'entartrage (Scaling)

L'entartrage est un problème lié à la formation de dépôts de sels minéraux, principalement du carbonate de calcium ($CaCO_3$), de l'hydroxyde de magnésium ($Mg(OH)_2$) et du sulfate de calcium. Deux conditions principales sont nécessaires pour la formation de dépôts de tartre sur une surface d'échange.

- Une condition thermodynamique : il faut que la limite de solubilité soit dépassée, c'est-à-dire qu'il y ait sursaturation.
 - Une condition cinétique : il faut que la vitesse de déposition soit suffisamment rapide
- L'entartrage est étroitement lié à la solubilité des sels minéraux dans l'eau, et cette solubilité est fortement influencée par la température et la composition de l'eau [69].

II.8.2.1 Différents moyens de lutte contre l'entartrage

La formation de tartre est un problème majeur dans les systèmes de dessalement de l'eau. Elle peut entraîner une diminution du débit, une augmentation de la consommation d'énergie et une érosion des pièces.

Il existe trois méthodes principales pour prévenir la formation de tartre dans les systèmes de dessalement de l'eau :

- **Contrôle des causes** : Cette méthode consiste à éliminer les ions qui contribuent à la formation de tartre. Cela peut être fait par filtration, échange d'ions ou osmose inverse. Cela peut être fait en utilisant l'une des méthodes suivantes :
 - a) **Filtration** : Des filtres spéciaux sont utilisés pour éliminer les ions de l'eau.

- b) **Échange d'ions** : Des granulés spéciaux sont utilisés pour échanger les ions dans l'eau.
 - c) **Osmose inverse** : Une membrane spéciale est utilisée pour empêcher le passage des ions.
- **Contrôle des effets** : Cette méthode consiste à retarder le processus de germination, à favoriser la germination uniforme ou à diriger les dépôts vers des types cristallins instables.
- **Utilisation d'inhibiteurs de tartre** : Les inhibiteurs de tartre interagissent avec les ions qui contribuent à la formation de tartre pour les empêcher de se déposer.
- Il existe de nombreux types d'inhibiteurs de tartre, dont :
- **Phosphates** : Les phosphates réagissent avec le calcium pour former des composés insolubles, ce qui réduit la formation de tartre.
 - **Polymères** : Les polymères se fixent à la surface interne des tuyaux, ce qui empêche les cristaux de s'y coller.
 - **Aminoacides** : Les acides aminés réagissent avec les ions qui contribuent à la formation de tartre, ce qui réduit leur concentration dans l'eau.
 - Le choix de la méthode appropriée pour prévenir la formation de tartre dépend de plusieurs facteurs, notamment le type de système de dessalement de l'eau, la nature de l'eau brute et les facteurs économiques [71].

II.8.3 Le colmatage

Le colmatage est l'accumulation de matière sur la surface ou à l'intérieur d'une membrane, ce qui entraîne une diminution du débit de liquide ou de gaz à travers la membrane. Le colmatage peut être causé par une variété de facteurs, notamment des particules, des colloïdes, des macromolécules ou des sels. Le colmatage des membranes peut être réduit par un prétraitement approprié, tel que la coagulation, la floculation et la filtration [72].

II.8.3.1 Biofouling

Le biofouling est le dépôt et la croissance d'organismes vivants sur une surface artificielle en contact avec l'eau. Ces organismes peuvent être des bactéries, des microalgues, des champignons, ou encore des petits animaux [73].

II.9.3.2 Les différents moyens de lutte contre le colmatage

Il existe deux méthodes pour éviter un colmatage :

- **Méthode 1 :** Les biofilms sont des couches de micro-organismes qui se développent sur les surfaces humides. Ils peuvent être constitués de bactéries, de champignons, d'algues et d'autres organismes. Pour prévenir la formation de biofilms, on peut ajouter une couche de matériau absorbant au fond du bassin.
- **Méthode 2 :** Les particules en suspension sont des particules fines qui se trouvent dans l'eau. Elles peuvent être constituées de sable, de limon, de matière organique ou d'autres matériaux. Pour retenir les particules en suspension, on peut ajouter une couche de matériau filtrant au fond du bassin. Ce matériau filtrant empêchera les particules en suspension d'atteindre le fond du bassin [74].

II.9 Les avantages et les inconvénients de dessalement

➤ Les inconvénients

- Le dessalement de l'eau de mer est une opération qui consomme beaucoup d'énergie, ce qui contribue à la pollution et au changement climatique.
- Elle produit également des eaux salées concentrées, qui peuvent augmenter la salinité des océans et avoir un impact négatif sur les écosystèmes marins.
- De plus, le dessalement de l'eau de mer peut entraîner des émissions de métaux lourds, qui peuvent être dangereux pour la santé humaine et l'environnement.
- Il n'existe pas de réglementation spécifique sur la qualité de l'eau produite par le dessalement de l'eau de mer pour la consommation humaine. Il est donc important de tester l'eau pour garantir sa sécurité [75].

➤ Les avantages

- Il peut être utilisé en cas d'urgence pour fournir de l'eau potable aux populations dont les réserves d'eau ont été contaminées par l'eau salée, comme lors de tsunamis ou de marées noires.
- L'irrigation à base d'eau dessalée permet de réduire la salinisation des sols, ce qui est un problème environnemental important dans les régions côtières [56].

II.10 Le coût du dessalement

Avec le développement des techniques de dessalement de l'eau, les coûts de production de

l'eau dessalée deviennent de plus en plus faibles. La technologie de l'osmose inverse est la plus utilisée car elle est rentable et relativement rentable. Le coût de construction d'une station de dessalement d'une capacité de 20 000 mètres cubes par jour est d'environ 30 millions de dollars américains pour une station côtière et d'environ 12 millions de dollars américains pour une station de dessalement d'eau saumâtre. Ces coûts dépendent de plusieurs facteurs, notamment la taille de la station, la technologie utilisée et son emplacement. Les coûts d'exploitation des stations de dessalement d'eau sont principalement liés à l'énergie. Cela entraîne une augmentation du coût d'exploitation ainsi que du coût de la dégradation environnementale due aux émissions de dioxyde de carbone. Le coût de l'énergie d'une station de dessalement d'eau est calculé en fonction de la source d'énergie utilisée. Le coût de l'énergie varie d'environ 0,7 dollar américain par kilowattheure pour l'énergie nucléaire à environ 3 dollars américains par kilowattheure pour l'énergie fossile.

En général, le coût de production de l'eau dessalée est relativement faible par rapport au coût de production de l'eau à partir d'autres sources, telles que les eaux souterraines, les rivières et les lacs. Cependant, le coût de production varie en fonction de la taille de la station, de la technologie utilisée [76].

II.11 Conclusion

La démarche du dessalement en Algérie est cruciale, surtout avec la littoralisation importante de la population et des activités économiques le long des 1200 km de côte. À l'échelle mondiale, le dessalement représente une ressource clé du XXI^e siècle, étant donné que 97% de l'eau provient de la mer. L'Espagne, par exemple, a développé de nombreuses stations de dessalement de différentes capacités. La croissance rapide du marché mondial du dessalement, multiplié par 4 en dix ans, souligne son importance croissante.

Il est intéressant de constater comment le dessalement a transformé des régions comme Almeria, les propulsant parmi les premiers producteurs européens de richesses. En effet, avec la croissance démographique et économique en Algérie, le dessalement pourrait être une solution nécessaire pour répondre à la demande croissante en eau, surtout en l'absence de garanties quant à une amélioration de la pluviosité. Les avancées technologiques, notamment la méthode par osmose inverse, contribuent également à rendre le dessalement plus abordable.

Effectivement, le coût du mètre cube d'eau dessalée peut désormais être comparé aux investissements classiques liés aux barrages, aux stations de traitement d'eau et au transfert sur de longues distances. De plus, le dessalement bénéficie d'une ressource inépuisable, contrairement aux barrages qui dépendent du remplissage, pouvant parfois poser des défis. Cette perspective met en avant les avantages économiques et la fiabilité du dessalement en tant que source d'eau [77].

CHAPITRE III

Chapitre III : Présentation de l'unité et le principe de fonctionnement

III. Introduction

Le procédé de dessalement de l'eau de mer permet d'obtenir une eau apte à être utilisée dans l'industrie, à partir d'une source inépuisable d'eau qui est la mer. Dans le CP2/k, le procédé utilisé est le TCD (Thermo - Compression Distiller).

III.1. Présentation de POLYMED (CP2/k)

III.1.1. Implantation de POLYMED

Le complexe PEHD (Polyéthylène Haute Densité) aussi connu sous le nom de Polymed ou CP2/K est implanté à l'intérieure de la zone industrielle de Skikda, d'une superficie de 16,68 hectares dont 10% bâtis. Le projet PEHD se trouve sur la cote à 06 km à l'Est du chef-lieu de la wilaya de Skikda et à une hauteur moyenne d'environ 06 m au-dessus de la mer [78]. (Figure I) La Position géographique limitée comme suit :

- Au Nord : la mer Méditerranée
- Au sud : la route principale de la zone industrielle.
- A l'Est : FIR (La force d'intervention et de réserve).
- A l'Ouest : CP1K (complexe matière plastique).

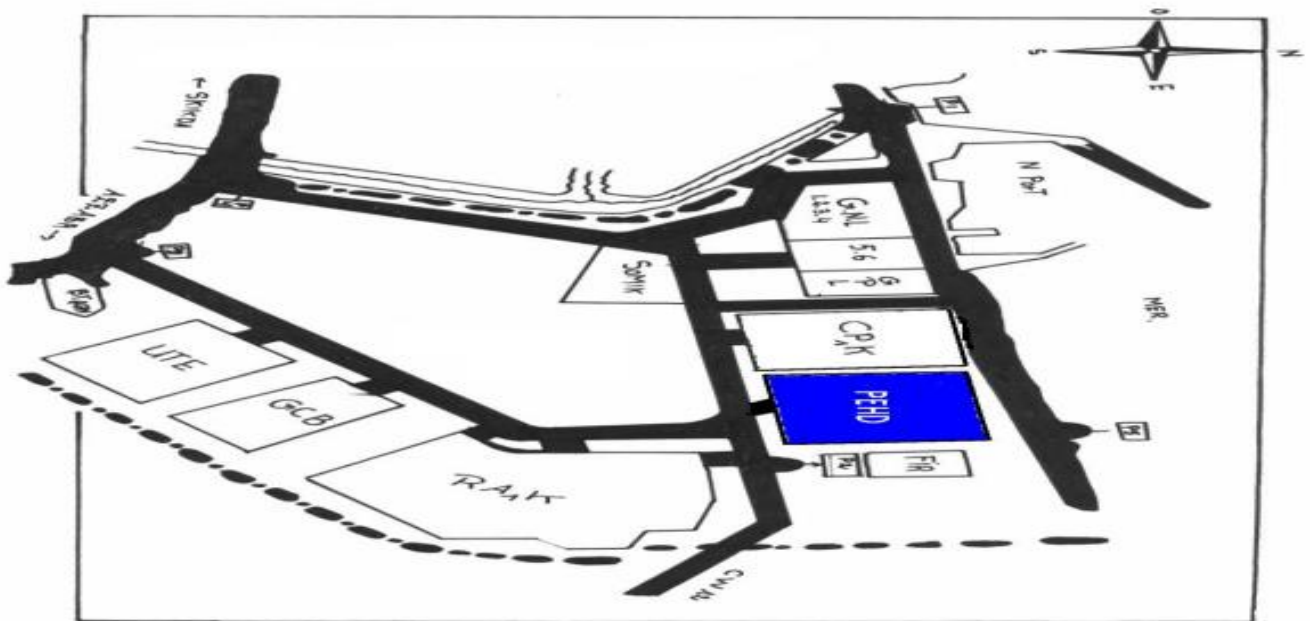


Figure III.1 : Situation du complexe POLYMED dans la zone industrielle de SKIKDA.[78]

III.1.2. Organisation de POLYMED :

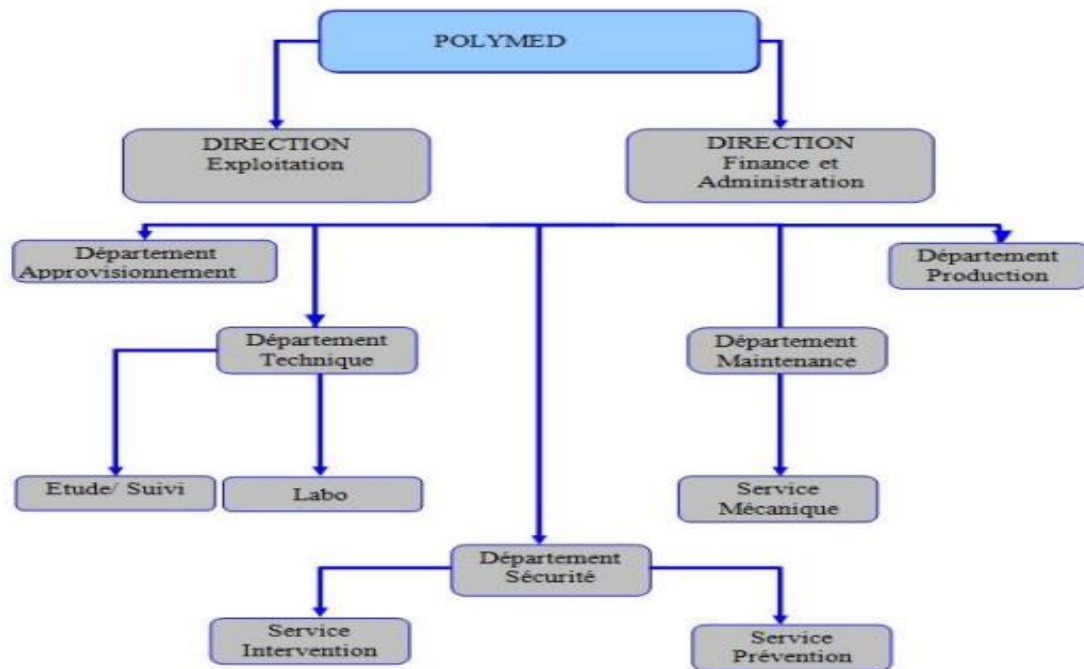


Figure III.2 : Organisation de POLYMED [78].

III.1.3 Description de l'usine :

Le projet PEHD a pour objet la réalisation d'une unité de production du polyéthylène haute densité d'une capacité de 130000 t/an [78].

Les matières premières utilisées sont :

- L'éthylène venant de l'importation.
- Isobutane venant du GL1K située également à proximité.
- L'hydrogène.
- Hexane.
- Catalyseur (le chrome).

Le complexe PEHD (Polyéthylène Haute Densité) est spécifiquement conçu pour la fabrication de polyéthylène à haute densité (PEHD). Son objectif principal est de fournir à l'industrie nationale de transformation plastique en Algérie et d'exporter tout excédent de production.

La clientèle nationale du complexe est composée de diverses entreprises, à la fois publiques et privées. Parmi les entreprises publiques figurent des entités telles que l'ENPC (Entreprise Nationale des Produits de Construction), l'ENCG (Entreprise Nationale de Génie Civil), ainsi que des entreprises privées du secteur de la transformation plastique. [78]

III.1.4. Découpage du complexe

Le complexe est composé de 04 zones importantes [78] qui sont :

III.1.4.1 Zone d'off site

- Les utilités (chaudières, air azote, eau dessalée, eau anti-incendie, eau potable et détente de gaz).
- Torche.
- Stockage isobutane et hexane.
- Traitement des eaux usées.
- Activation catalyseur. [78]

III.1.4.2 Zone humide

- Traiteurs.
- Réacteur.
- Compresseurs.
- Capacités. [78]

III.1.4.3 Zone sèche

- Extrudeuse.
- Soufflantes.
- Silos de stockage produits finis (poudre et granulé).
- Ensachage. [78]

III.1.4.4. Zone bâtiment :

- Bloc ADM et finance.
- Cantine et vestiaires.
- Bloc sécurité infirmerie.
- Magasin pièces de rechange, ateliers et bloc technique.
- Sous stations haute et basse tension.
- Salle de contrôle process et laboratoire. [78]

III.1.5 Les installations de l'usine

III.1.5.1 Installations principales de l'usine

- Unité de préparation et de traitement des matières premières.
- Réacteur où se déroulent la polymérisation et l'obtention du PEHD en poudre.
- Extrudeuse qui transforme la poudre en granulés.
- Stockage intermédiaire (Capacité 3500 Tonnes).
- Unité de conditionnement. [78]

III.1.5.2 Installations auxiliaires

- Production de vapeur, électricité, air etc.....
- Traitement des effluents.
- Stockage matières premières, utilités et additifs (Eau, Hydrogène, Hexene, isobutane).
- Magasin de stockage de produit fini d'une superficie de 18 000 m² soit une capacité de 12000 tonnes.[78]

III.1.6 Utilisation de PEHD

Les différentes utilisations de PEHD :

- AGRICULTURE : Film, Filet de pêche, Pipe d'irrigation et Cageots.
- EMBALLAGE : Alimentaire (bidons d'huile), Cosmétiques et Produits d'entretien.
- INDUSTRIE : Pipe gaz naturel et eaux, Pièces techniques et automobile. [78]

III.1.7 Description de laboratoire

Laboratoire a pour but de donner aux unités de productions toutes les informations nécessaires sur la qualité des matières des produits intermédiaires et des produits fins pour assurer une bonne marche de ces unités et respecter les normes contractuelles avec clients, ainsi que le contrôle de qualité de différentes eaux produit dans l'unité d'utilité (l'eau distillée, déminéralisée, l'eau d'alimentation et l'eau de chaudières) [78]. Il comprend 06 salles :

III.1.7.1 Salle essai plastique

- MI sur poudre et granulé (1 analyse/2h).
- Densité apparente (1/jour poudre et granulés).
- La granulométrie se fait à la demande. [78]

III.1.7.2 Salle d'analyse générale

-Analyse des eaux : pH, conductivité, DCO, MES, Fe... etc. [78]

III.1.7.3 Salle essai physique

-Analyse sur les huiles : viscosité, acidité se fait à la demande. [78]

III.1.7.4 Salle essai mécanique

Dans cette salle se fait :

- L'analyse de la résistance au glissement, à la traction, au choc, la fragilisation.
- La résistance du produit chimique.
- La dureté de la rigidité.
- La transparence.
- L'imperméabilité aux huiles et graisse. [78]

III.1.7.5 Salle essai chromato- spectro :

-Analyse des gazes. [78]

III.1.7.6. Salle de stockage

-Magasin pour le stockage des réactifs. [78]

III.1.8. Présentation de l'utilité

C'est une unité a démarré en septembre 1977, le but de cette unité a alimenté les autres unités par différents types de l'eau (l'eau de mer, l'eau distillé, l'eau déminéralisé) et de vapeur (haute, moyenne et basse pression) [78].

Cette unité comprend 7 sections divisées en deux sous unités :

III.1.8.1 Unité d'eau

a. Prise de l'eau

Cette section est constituée de :

- Tête de prise : la prise d'eau de mer doit permettre d'obtenir à l'entrée de

L'usine de dessalement une eau de la meilleure qualité possible, avec un batardeau pour fermer/ouvrir le canal.

- Canal d'eau de mer : c'est un canal de longueur d'environ 850 m et diamètre 3,5 m, destiné pour le transport d'eau de mer jusqu' à le bassin par gravitation, avec batardeau à l'entrée du bassin pour couper l'eau de mer dans le cas on fait le nettoyage du bassin, dans ce bassin on trouve 4 batardeaux pour couper l'eau à les filtres rotatifs. [78]
- Section de prétraitement : il y a 4 grilles fixées pour ne pas laisser passer les grandes déchets (les saches, bouteilles, ...), après chaque grille fixée il y a des filtres rotationnels pour éliminer les déchets qui passent sur les grilles fixées. Ces derniers sont nettoyés automatiquement avec l'eau de mer en utilisant des pompes à l'énergie électrique, avec deux installations pour injecter les produits chimiques (Cl_2 et $NaOCl$) pour le traitement chimique.
- Station de pompage : il existe 3 pompes qui utilisent l'énergie électrique et une turbine, ces pompes aspirent l'eau du bassin et alimenter le collecteur, et 2 pompes contre l'incendie l'un électrique et l'autre diesel, chaque semaine on démarrer ces pompes 15-20 minutes. [78]

b. Section de dessalement :

L'unité utilise la méthode TCD (Thermo- Compression Distillée) se composent de 6 cellules, et avec production total 333 m³/h de l'eau distillé et stocker dans 4 bacs. [78]

c. Section déminéralisation

On utilise deux ioniseurs à l'aide des résines cationiques et anioniques, chaque ioniseur relié avec système de régénération automatique, on fait la régénération quand on atteint un volume de 19200 m³ ou on a une conductivité supérieure à 0,3 $\mu s/cm$, l'eau déminéralisé est stockée dans deux bacs [78] (Figure IV.2)



Figure III.3: D'ioniseur prise de la station de dessalement TCD 6-8000. [78]

d. Traitement des effluents

Cette installation de traitement des effluents d'égouts est conçue pour traiter tous les effluents du complexe, afin de permettre l'élimination des substances flottantes ou des substances en suspension et des matières dangereuses avant leur rejet vers la mer et évitant ainsi toute éventuelle pollution de cette dernière. [78]

III.1.8.2. Utilité d'énergie

Cette unité comprend :

a. Section chaudière

Avant l'utilisation de l'eau déminéralisée dans les chaudières il faut le traiter, parmi les traitements on a le dégazage, l'injection de N_2H_4 (l'hydrazine) et le phosphate de sodium. Les chaudières sont des équipements statiques destinées à :

- Produire de la vapeur à partir de l'énergie calorifique du combustible (gaz naturel, fuel, ...)
- Modifier les températures des fluides d'une température à une température désirée. [78]

b. Section air/azote

Cette section est conçue pour produire de l'azote et de l'oxygène par un procédé de Liquéfaction, elle produit 9000 m³/h, mais actuellement l'unité est en arrêt. [78]

c. Section d'énergie électrique

Cette section fournit toute l'énergie électrique au complexe pour fonctionner. Elle est constituée de deux lignes provenant de SONALGAZ d'une puissance de 64 KV, chacune est d'un turbo-générateur fonctionnant à la vapeur haute pression qui produit de l'électricité de 18,7 KW relié en parallèle avec le réseau de SONALGAZ. [78]

III.2. Description du procédé de dessalement

III.2.1 Evaporateur et condenseurs

III.2.1.1 Design général

Les unités de dessalement de type TCD utilisent des évaporateurs tubulaires horizontaux arrosés. Afin d'assurer la production d'eau distillée avec un minimum de maintenance, elles sont construites avec des matériaux de haute qualité. L'espace autour des unités de dessalement doit être suffisant pour assurer le bon fonctionnement des machines ainsi que leur maintenance.

L'évaporateur est monté sur un châssis conçu pour supporter toutes les charges en fonctionnement et pendant les tests : ce qui inclut les contraintes de dilatation, le vent et le poids de l'eau pendant le test

hydrostatique.

L'évaporateur dispose d'ouvertures (trous d'homme ou trous de poing), de passerelles et d'échelles ou d'escaliers, pour permettre l'inspection, la maintenance, le remplacement des séparateurs, le nettoyage des plateaux d'arrosage ainsi que le rinçage des autres internes.

Les cellules sont équipées de doigts de gant pour mesurer la température d'évaporation/condensation. Toutes les internes de l'évaporateur (déflecteurs, tuyauteries, piquages...) sont réalisés dans des matériaux résistants à l'eau de mer et à la saumure. L'acier n'est jamais utilisé pour les internes ou les surfaces en contact avec l'eau de mer, la saumure, l'eau distillée ou les gaz incondensables. Les surfaces internes en acier inoxydable sont passivées. L'évaporateur et les échangeurs tubulaires qui y sont rattachés sont conçus pour supporter les conditions maximales de pression ou de vide qui peuvent survenir pendant les tests ou en fonctionnement. Un disque de rupture est monté sur l'unité de des salement pour la protéger contre une pression excessive. Des anneaux de renforts extérieurs en acier sont soudés sur l'évaporateur pour le renforcer. Le calcul et la construction se font suivant le code mentionné dans le document « TCD main codes and standards ». [78]

III.2.1.2 Plateaux d'arrosage

Le système d'arrosage est fait de plateaux perforés qui sont installés au-dessus de Chaque faisceau tubulaire et qui sont conçus pour permettre un arrosage régulier des tubes. Ce système permet un mouillage homogène du faisceau tubulaire et permet d'éviter les zones mal arrosées qui sont sujettes à l'entartrage. De plus, la vitesse de l'eau de mer arrosant les rangées supérieures est bien inférieure à celle qui prévaut avec l'utilisation de buses, ce qui évite les problèmes d'érosion des rangées supérieures. Les plateaux d'arrosage sont démontables (Figure IV.3).

Avec l'utilisation de plateaux de d'arrosage, aucune filtration sophistiquée n'est nécessaire. Pour empêcher le colmatage de trous des plateaux par la matière, l'alimentation d'eau de mer est habituellement filtrée dans un tamis des mailles de 1mm. [78]



Figure III.4: Du plateau d'arrosage prise de la station de dessalement TCD 6-8000. [78]

III.2.1.3 Séparateurs

Entre chaque cellule et à l'amont de l'aspiration vapeur du thermo-compresseur, des séparateurs en métal tissé sont montés de façon à éviter l'entraînement des gouttelettes d'eau de mer qui augmenteraient la salinité de l'eau distillée produite.

Les séparateurs sont montés de façon à limiter les fuites de vapeur et à permettre leur démontage pendant les phases de maintenance. [78]

III.2.1.4 Faisceau tubulaire

Le faisceau tubulaire composant chaque effet est horizontal et fixé aux plaques tubulaires par dudgeon nage. Le pas des tubes est choisi de façon à permettre un bon mouillage des surfaces tubulaires et pour permettre une bonne évacuation de la vapeur. [78]

III.2.1.5. Condenseur

Le condenseur est un échangeur tubulaire horizontal dans lequel la vapeur se condense à l'extérieur et où l'eau de mer circule à l'intérieur.

Le détubage du faisceau est possible. Afin d'éviter toute corrosion galvanique avec l'eau de mer aérée, les boîtes à eau sont équipées d'anode sacrificielle. [78]

III.2.2. Thermo-compresseur

Afin d'améliorer l'efficacité de la distillation multi-étagée, les unités de type TCD sont équipées de thermo-compresseur (Figure IV.4), qui sont des éjecteurs à vapeur, sans pièce mobile. En comparaison d'un simple MED de même surface d'échange et de même production, le TCD à une consommation de vapeur beaucoup plus faible.

Le but du thermo-compresseur est d'aspirer la vapeur d'une cellule à faible température (la cellule2)

et, en la mélangeant avec la vapeur motrice, de la réinjecter au niveau de la première cellule (celle fonctionnant à la température la plus haute). [78]

Le thermo-compresseur est composé de :

- Une ou plusieurs tuyères d'admission de la vapeur motrice (connectées au collecteur d'alimentation).
- Une chambre de mélange.
- Un convergent / divergent.

A la sortie de la tuyère, la vapeur motrice est détendue et se mélange avec la vapeur aspirée, lui communiquant ainsi de l'énergie cinétique. Cette énergie cinétique se transforme en pression dans le convergent / divergent. [78]



Figure III.5: Thermo-compresseur prise de la station de dessalement TCD 6-8000. [78]

III.2.3 Système de mise sous vide

Le procès utilise la distillation sous vide. Pour ce faire il est nécessaire dans un premier temps d'évacuer l'excès d'air présent dans l'unité, et ensuite les incondensables résultant du dégazage de l'eau de mer et des petites fuites diverses.

Le système de mise sous vide se compose de 2 éléments :

- **L'éjecteur de démarrage** utilisé pour préparer le vide dans l'unité.
- **Le groupe de maintien de vide (GMV)** pour compenser en cours de fonctionnement les faibles entrées d'air dues au dégazage de l'eau de mer d'appoint et aux légères fuites inévitables aux joints des équipements. [78]

A l'intérieur de l'évaporateur, le système de ventilation est conçu de façon à éviter les concentrations d'incondensables sur les surfaces tubulaires. Les incondensables de chaque cellule sont transférés jusqu'au condenseur d'où on les extrait par un système de mise sous vide par éjecteurs de vapeur.

Les éjecteurs sont montés en cascade et refoulent sur des condenseurs d'éjecteur. Ils permettent de maintenir le vide dans l'unité. Les condenseurs d'éjecteur sont refroidis avec l'eau de mer qui va arroser la première cellule. En complément, un éjecteur de démarrage (Hogging ejector) est utilisé pour évacuer l'air au démarrage d'a mise sous vide. [78]

III.3. Le principe de fonctionnement

L'évaporateur est alimenté par l'eau de mer à partir de la prise avec débit de 2100 m³/h, passe par deux filtres. Le 1er en service et le 2ème en standby. Il mesure la pression avant et après les filtres. Si $\Delta p > 0,5$ le filtre est poché, on ouvre la vanne du 2ème filtre et ferme la vanne du 1er filtre pour le nettoyage. Après il faut d'injecter les Produits chimiques antitartre et anti-mousse dans le canal de l'eau de mer avant l'entrée l'évaporateur. 292 m³/h utilisé pour refroidir l'eau distillée et le reste passe au condenseur pour chauffer l'eau de mer et refroidi l'eau distillée.

A la sortie du condenseur, une partie envoyer vers le rejet et l'autre partie 980 m³/h pour alimenter les six cellules. La 5ème et la 6ème alimentée par l'eau de mer par gravitation, mais les autres cellules utilisent deux pompes, l'une en service et l'autre en Standby. Les cellules 3, 4, 5 et 6 sont alimenter par débit de 95 m³/h et le 1er et la 2ème cellule sont alimenter par 300 m³/h. L'eau de mer avant d'entrer dans la cellule chauffée dans les préchauffeurs avec les vapeurs non condensable pour éviter le choc thermique.

Au démarrage, on utilise la vapeur moyen pression qui est utilisée par l'éjecteur de démarrage pour créer le vide. L'éjecteur aspire l'air de la cellule et les conduites et le dégager vers l'atmosphère, après l'éjecteur de démarrage d'arrête et démarrée l'éjecteur de mise de vide pour fixer la pression dans les cellules. La vapeur à haut pression entre dans la 1^{er} cellule, et passe dans les tubes, ce dernier est rosé par l'eau de mer. La vapeur condensée et récupérer dans un canal spécial, et une partie de l'eau de mer vaporisé et passe par métal tissé qui fixe les gouttelettes et les matières en suspension, la vapeur qui sorte de la 1er cellule partie entrer dans la 2ème cellule et les vapeurs non condensable va au préchauffeur. A la sortie de la 2ème cellule le thermo-compresseur aspirer l'eau distillée et mélange avec la vapeur dans la chambre de mélange pour diminuer la température (170°C à 74°C). Une partie de la vapeur entre dans la 3ème cellule, et ainsi de suite.

L'eau distillée et la saumure passe à une cellule à une autre par des tube U jusqu' à la 6ème cellule (Figure IV.5). La saumure vers le rejet et l'eau distillée si la conductivité $> 50 \mu\text{s/cm}$ vers le rejet, si la conductivité $< 50 \mu\text{s/cm}$ vers les bacs de stockage, et on ajoute le NaOH si le pH est acide. [78]



Figure III.6: Des tubes U prise de la station de dessalement TCD 6-8000 [78].

III.4 Conclusion

Le complexe CP2/K de Skikda se distingue par son procédé de dessalement d'eau de mer novateur et performant, le Thermo- Compression Distiller (TCD 6-8000). Ce système ingénieux exploite plusieurs technologies de pointe pour garantir une production d'eau douce optimale :

-Distillation Multi-Effets à Basse température :

- 6 cellules distinctes opèrent à des températures décroissantes, maximisant l'efficacité énergétique.
- L'évaporation s'effectue sous vide (inférieur à 70°C), préservant la qualité de l'eau.

-Vapeur Moyenne et Haute Pression :

- L'utilisation combinée de deux types de vapeur optimise l'extraction du sel.

-Traitement Chimique Précis :

- Injection d'antitartre et d'antimousse pour prévenir l'entartrage et les mousses.
- Ajustement du pH avec NaOH pour une eau potable conforme aux normes.

Chapitre IV

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter le matériel et les différentes méthodes d'analyses physico-chimiques utilisées au cours de notre étude, Ces analyses sont programmées pour contrôler la qualité de l'eau d'appoint et l'eau produite pour savoir si les éléments nuisibles comme les sels sont éliminés. Ce qui conduit à la bonne exploitation des chaudières et de TCD, et suit les problèmes qui démunie la production comme l'entartrage.

Pour valider la fiabilité du dessalement d'eau de mer par le procédé thermocompression distillé (TCD) au sein du complexe CP2/k, nous avons réalisé des analyses physico-chimiques de l'eau produite (distillée et déminéralisée). Nous avons également mené une étude sur les dépôts présents dans l'évaporateur et le condenseur afin d'identifier les causes de la baisse de production (rendement) et des perturbations du système de mise en vide.

L'appareil utilisé dans laboratoire de station de Polymed Cp2/k pour effectuer l'analyse nécessaire est spectrophotométrie

IV.2 Les analyses de qualité de l'eau produite

Prenez des échantillons de l'eau distillée à partir des bacs de stockages (D-FB106A, D-FB106B) et de l'eau déminéralisée à partir du bac (W-FB201A, W-FB201B) et faire les analyses suivantes :

IV.2.1 Détermination du potentiel d'hydrogène (pH) et la conductivité

Le pH indique la concentration du milieu en ions Hydrogène (H^+) et Hydroxyde (OH^-). Une eau peut être neutre, acide ou basique selon la proportion des ions (H^+) et (H^-), donc il mesure l'acidité ou l'alcalinité de l'eau.

➤ Matériels et réactifs

- Un Becher.
- Echelle de conductivité et de pH
- Solution d'étalonnage.

➤ Mode opératoire

Une échelle de conductivité et de pH est utilisée, après avoir lavé l'ampoule de l'appareil avec de l'eau distillée, où elle est immergée dans 500 ml d'échantillon et on attend la valeur affichée jusqu'à ce qu'elle se stabilise, puis on vérifie la validité de cette valeur.



Figure IV.1 : Un appareil conductimètre

IV.2.2 Détermination La dureté totale

-Généralité : La dureté - ou titre hydrotimétrique - d'une eau est une grandeur reliée à la somme des concentrations en cations métalliques, à l'exception de ceux des métaux alcalins (Na^+ , K^+).

-Rappels : Dans la plupart des cas, la dureté est surtout due aux ions calcium Ca^{2+} et magnésium Mg^{2+} (ions alcalino-terreux).

IV.2.2.1 Concentration en ions calcium

Le calcium est présent dans les eaux de manière naturelle. Pour déterminer la dureté calcique on utilise l'EDTA comme complexant, auparavant le dosage se fait à un pH élevé (12-13) où le magnésium est précipité sous forme $\text{Mg}(\text{OH})_2$ et n'intervient pas dans la réaction.

➤ **Matériel et Réactif**

- Erlenmeyer.
- PH-mètre.
- Solution de HCl
- Solution NH₃OHCl (10)
- Murexide.
- Solution d'EDTA 0,02 N

➤ **Mode opératoire**

Prélever 10 ml d'eau à analyser dans un Erlenmeyer de 100 ml, et ajouter 2 ml de HCl (1+1) et 2 ml de NH₃OHCl (10%), et quelque goutte de KCN (10%) et 5 ml de KOH 8N. Un titrage par l'EDTA (0.01N) a lieu jusqu'au virage vers le violet au bleu.

- La dureté calcique est calculée par la formule suivante :

$$\text{Ca}^{2+} \text{ (mg/l)} = (\text{VEDTA} \times 0,01 \times f \times 103 \times 40,08) / \text{V échantillon}$$

Où :

- **VEDTA**: Volume de la solution d'EDTA (acide éthylènediaminetétraacétique) utilisé pour le titrage, exprimé en millilitres (mL).

- **0,01**: Facteur de conversion de la concentration de l'EDTA (mol/L) en moles d'EDTA par millilitre de solution (mmol/mL).

- **f**: Facteur de dilution, qui tient compte de l'éventuelle dilution de la solution échantillon avant le titrage.

- **103**: Masse molaire du calcium (Ca) en grammes par mole (g/mol).

- **40,08**: Masse molaire du complexe Ca-EDTA en grammes par mole (g/mol).

- **V échantillon**: Volume de la solution échantillon titrée, exprimé en millilitres (mL).

IV.2.2.2 Concentration en ion magnésium

Le magnésium peut être estimé par la différence entre la dureté de l'eau et le calcium exprimé en CaCO₃ :

$$\text{TH} = \text{D}(\text{Ca}^{+2}) + \text{D}(\text{Mg}^{+2})$$

- La dureté magnésienne est calculée par la formule suivante :

$$D (\text{Mg}^{2+}) = \text{TH} - D (\text{Ca}^{2+})$$

Ou bien on peut utiliser la méthode suivante : Prélever 10 ml d'eau à analyser dans un Erlenmeyer de 100 ml, et ajouter 2 ml de la HCl (1+1) et 2 ml de NH₃OHCl (10%), et quelque goutte de KCN (10%) et 10 ml solution tampon pH=10, quelque goutte (NET). Un titrage par l'EDTA (0.01N) a lieu jusqu'au virage vers le violet au bleu.

- La dureté magnésienne est calculée par la formule suivante :

$$\text{Mg}^{2+} (\text{mg/l}) = [(\text{VEDTA} (\text{Mg}) - \text{VEDTA} (\text{Ca}^{2+})) \times f \times 103 \times 24,305 \times 0,01 / V \text{ écha}]$$

Où :

-**VEDTA (Mg)**: Volume of EDTA (Ethylenediaminetetraacetic acid) solution used for magnesium (Mg²⁺) titration, expressed in milliliters (mL).

-**VEDTA (Ca²⁺)**: Volume of EDTA solution used for calcium (Ca²⁺) titration, expressed in milliliters (mL).

-**f**: Dilution factor, which accounts for any dilution of the sample solution before titration.

-**103**: Molar mass of calcium (Ca) in grams per mole (g/mol).

-**24.305**: Molar mass of the Mg-EDTA complex in grams per mole (g/mol).

- **0.01**: Conversion factor from moles of EDTA to millimoles of EDTA per milliliter of solution (mmol/mL).

-**V échantillon**: Volume of the sample solution titrated, expressed in milliliters (ml).

IV.2.3. Détermination du titre alcalimétrique

IV.2.3.1. Titre alcalimétrique simple (TA)

L'alcalinité d'une eau correspond à la somme des concentrations des ions carbonates (CO₃²⁻) et des ions hydroxydes (OH⁻). La mesure alcalimétrique TA se fait par méthode titrimétrique, cette détermination est basée sur la neutralisation d'un certain volume d'eau à analyser par l'acide chlorhydrique (HCl) dilué en présence de phénophtaléine.

➤ Matériels et Réactifs

- Burette.
- Erlenmeyer.
- Solution d'H₂SO₄ 0.02N.
- Solution de phénophtaléine 0.5

➤ **Mode opératoire**

Dans un Erlenmeyer de 100 ml, prélever 10 ml d'eau à analyser et ajouter 2 à 3 gouttes de phénophtaléine, une couleur rose (présence d' OH^- , CO_3^-). Titrer et agiter avec la solution de H_2SO_4 jusqu'à décoloration complète de la solution, dans le cas contraire le TA est nul. Les résultats sont exprimés par la formule suivante :

$$\text{TA} = (\text{V}_{\text{H}_2\text{SO}_4} \times 1,003 \times (\text{N}/50) \times 103) / \text{V échantillon}$$

Où :

- **$\text{V}_{\text{H}_2\text{SO}_4}$** : Volume d'acide sulfurique (H_2SO_4) utilisé pour le titrage, exprimé en millilitres (ml).

-**1,003**: Facteur de correction de la concentration de l'acide sulfurique, qui prend en compte la densité réelle de l'acide sulfurique utilisé.

- **$\text{N}/50$** : Normalité de l'acide sulfurique, exprimée en équivalents-grammes par litre (eq/L). La normalité est une concentration molaire qui prend en compte le nombre d'ions hydrogène (H^+) libérés par une mole d'acide. Dans ce cas, $\text{N}/50$ correspond à une concentration de 0,02 mol/L d'acide sulfurique.

-**103** : Masse molaire de l'acide acétique (CH_3COOH), exprimée en grammes par mole (g/mol). Cette valeur est utilisée pour convertir la concentration en équivalents-grammes par litre (eq/L) en concentration en grammes d'acide acétique par litre (g/L).

IV.2.3.2 Titre alcalimétrique complet (TAC)

Le TAC mesure la teneur en hydrogénocarbonate, hydroxyde libre et en carbonate contenus dans l'eau. Cette détermination est basée sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par l'acide chlorhydrique (HCl) dilué en présence de méthyle orange.

➤ **Mode opératoire**

Ajouter quelque goutte de méthyle orange dans la solution incolore, une couleur rouge brique. Titrer et agiter avec la solution de H_2SO_4 jusqu'à le virage de jaune.

$$\text{TAC (mg/l)} = (\text{V}'_{\text{H}_2\text{SO}_4} \times 1,003 \times (\text{N}/50) \times 103) / \text{V échantillon}$$

IV.3 Détermination les concentrations de certains autres composés à l'aide d'un spectrophotomètre Vis-UV DR5000)

Le dosage des paramètres chimiques a été effectué à l'aide d'un spectrophotomètre DR 5000, au niveau du laboratoire de la station de dessalement Polymed. Les paramètres mesurés sont :

- Nitrite NO_2^-
- Nitrates NO_3^-
- Chlorure Cl^-
- Potassium K^+
- Fer Fe
- Sulfate SO_4^{2-}
- Bore B

La spectrophotométrie est une technique d'analyse qui utilise la lumière pour étudier les propriétés des substances chimiques. C'est une technique quantitative qui permet de mesurer la concentration d'une substance en solution en se basant sur l'absorption de la lumière à une longueur d'onde spécifique. L'absorbance d'une substance chimique dépend de la nature et de la concentration de cette substance ainsi que de la longueur d'onde à laquelle on l'étudie. Cette méthode utilise un instrument appelé spectrophotomètre.

Le DR 5000 commence la mesure automatiquement et affiche le résultat en mg/l. La mesure s'effectue sans autre manipulation.



Figure IV.2 : l'appareil de spectrophotométrie DR5000

Les tests en cuve LCK permettent de déterminer le dosage des paramètres chimiques de l'eau en suivant le mode opératoire représenté à l'intérieur de la couverture de chaque boîte LCK (Figure IV.3) qui indique la quantité de l'eau à ajouter, la manière d'agitation de la solution dans la cuve et le temps de réaction. La cuve contient la quantité exacte de réactif.

On ajoute simplement l'échantillon d'eau puis on insère la cuve dans le spectrophotomètre et on prend la mesure. On utilisant le loi de beer lambert :

$$A = \varepsilon * C * l$$

Où:

- **A**: Absorbance, une mesure sans dimension de l'atténuation de la lumière.
- **ε** : Coefficient d'extinction molaire, une constante caractéristique de l'espèce absorbante et de la longueur d'onde de la lumière, exprimée en $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$.
- **C**: Concentration de l'espèce absorbante, exprimée en $mol \cdot L^{-1}$.
- **l**: Longueur du trajet optique, exprimée en cm.



Figure IV.3 : Boîte LCK et le mode opératoire

Chaque boîte LCK prend un code article qui représente le paramètre chimique à étudier et une plage de mesure pour savoir si en doit faire une dilution à l'eau de mer ou pas (Tableau IV.1). Les cuves sont à la fois des récipients de transport, des réactions et des mesures.

Tableau IV.1 : Code article et plage de mesure de chaque paramètre

Paramètre	Code article	Plage de mesure(mg/l)
Ammonium	LCK303	2-47
Bore	LCK307	0,05 - 2,50
Chlorure	LCK311	1 - 70 70 – 1000
Fer	LCK320	0,2 - 6,0
Nitrate	LCK339	0,23 - 13,5
Nitrite	LCK342	0,6 - 6,0
Potassium	LCK328	8 – 50
Sulfate	LCK353	150 – 900

IV.3.3 Exemple de Détermination de la concentration des ions chlorures à l'aide de spectrophotomètre Vis-UV DR5000)

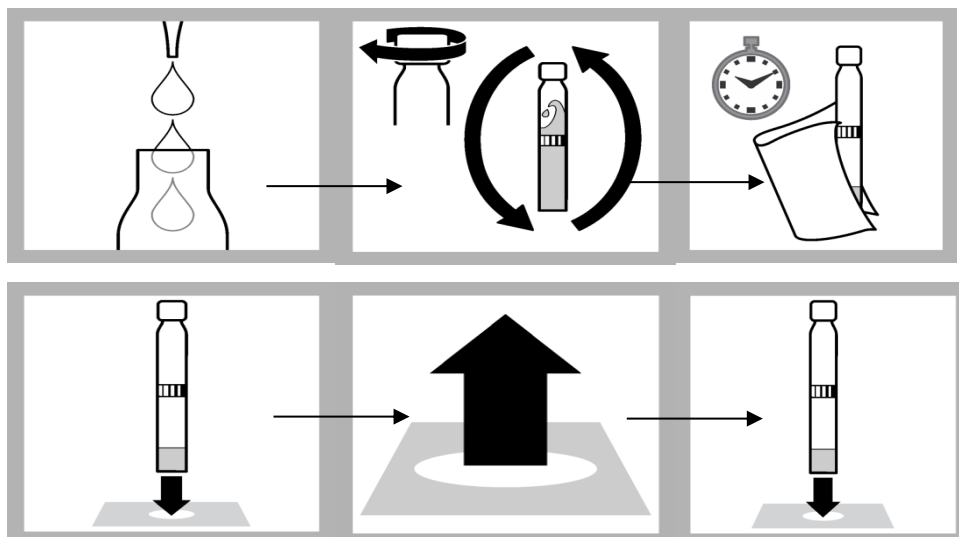
➤ Mode opératoire

1 - Préparation du test

- Stockage de test : Température de stockage : 2–8 °C (35–46 °F)
- pH /Température
 - Le pH de l'échantillon d'eau doit être entre 3–10.
 - La température de l'échantillon d'eau et de réactifs doit être entre 15–25°C (59–77 °F).

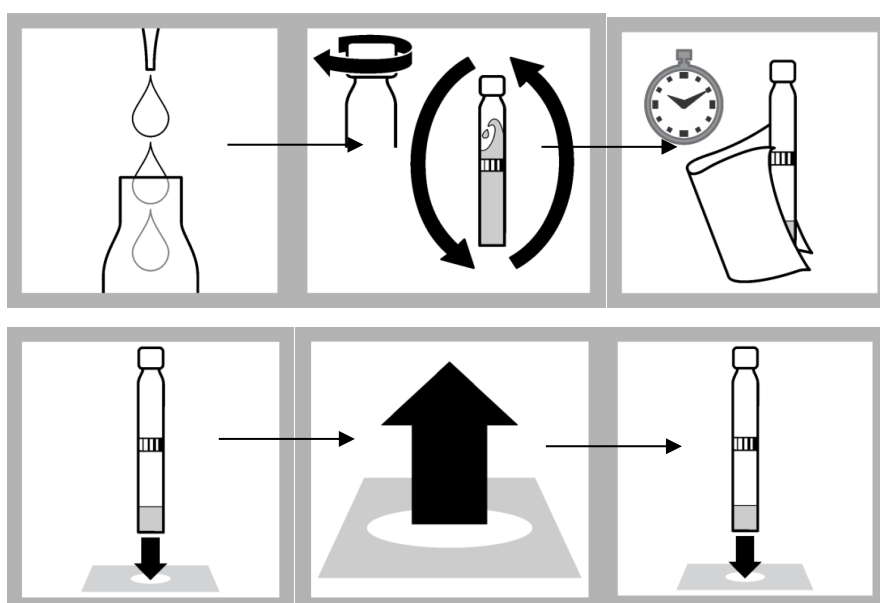
2-Procédure Gamme de mesure I

1. Pipeter soigneusement 1.0 ml d'échantillon en la cuve de l'échantillon.
2. Fermer la cuve et retourner plusieurs fois
3. Après 3 minutes, bien nettoyer l'extérieur de la cuve d'échantillon.
4. Insérer la cuve zéro dans le compartiment pour cuves. DR1900 : Accéder à méthodes LCK/TNT plus. Sélectionner le test, appuyer sur ZÉRO.
5. Retirer la cuve zéro.
6. Insérer la cuve de l'échantillon dans le compartiment pour cuves. DR1900 : Appuyer sur MESURER.



3-Procédure Gamme de mesure II

1. Pipeter soigneusement 0.1 ml d'échantillon en la cuve de l'échantillon.
2. Fermer la cuve et retourner plusieurs fois
3. Après 3 minutes, bien nettoyer l'extérieur de la cuve d'échantillon.
4. Insérer la cuve zéro dans le compartiment pour cuves. DR 1900 : Accéder à méthodes LCK/TNT plus. Sélectionner le test, appuyer sur ZÉRO.
5. Retirer la cuve zéro.
6. Insérer la cuve de l'échantillon dans le compartiment pour cuves. DR1900 : Appuyer sur MESURER.



IV.4 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis de :

- Présenter en détail les modes opératoires (pH,TAC,TA,TH, la conductivité, pour vérifier la qualité de l'eau distillé ainsi que les outils et les techniques employées
- Les différentes étapes utilisées pour déterminer les concentrations des autres composées chimiques par l'appareil spectrophotomètre DR5000 (Cl, Fe, SO_4^{2-} , Nitrate, Nitrite, Potassium, Ammonium)

Les résultats de la collecte de données seront présents dans le prochain chapitre

Chapitre V

Chapitre V : Résultat et discussion

V. Introduction

Le dessalement de l'eau de mer par le procédé thermo compression distiller (TCD) est une technologie prometteuse pour la production de l'eau potable. Afin d'évaluer l'efficacité de cette technologie, une étude a été menée sur un système TCD installé au complexe CP2/k.

L'étude a consisté à analyser les propriétés physico-chimiques de l'eau produite (distillée et minéralisée) ainsi qu'à étudier les dépôts présents dans les évaporateurs et condenseurs. Ces analyses ont permis de comprendre les causes de la baisse de production (rendement) du système.

V.1 Suivi des analyses physico-chimiques

V.1.1 Suivi du potentiel d'hydrogéné

Les analyses d'acidité et de la conductivité de l'eau distillée et déminéralisée, sont présentés dans le Tableau suivant :

Tableau V.1 : Variation du pH en fonction du temps.

Date	pH			
	L'eau distillée		L'eau déminéralisée	
	D-FB106A	D-FB106B	W-FB201A	W-FB201B
04/02/2024	6,24	6,58	6,25	6,25
05/02/2024	6,65	6,83	6,58	6,56
06/02/2024	6,66	6,75	6,28	6,60
07/02/2024	5,68	7,01	5,74	5,87
08/02/2024	7,70	8,05	8,40	7,33
09/02/2024	7,24	8,20	8,31	7,82
10/02/2024	5,47	5,65	6,56	6,60
11/02/2024	6,54	7,40	5,58	5,80
12/02/2024	7,05	7,31	6,76	6,74
13/02/2024	6,38	7,74	6,78	6,92
14/02/2024	6,56	7,28	6,27	6,69
15/02/2024	6,15	6,55	5,50	5,96
16/02/2024	6,57	5,60	5,11	5,03

17/02/2024	6,62	6,88	6,45	6,76
18/02/2024	7,07	7,23	7,96	8,43
19/02/2024	6,26	6,10	6,42	6,04
20/02/2024	6,48	6,70	6,81	6,54
21/02/2024	6,85	7,05	6,72	6,85

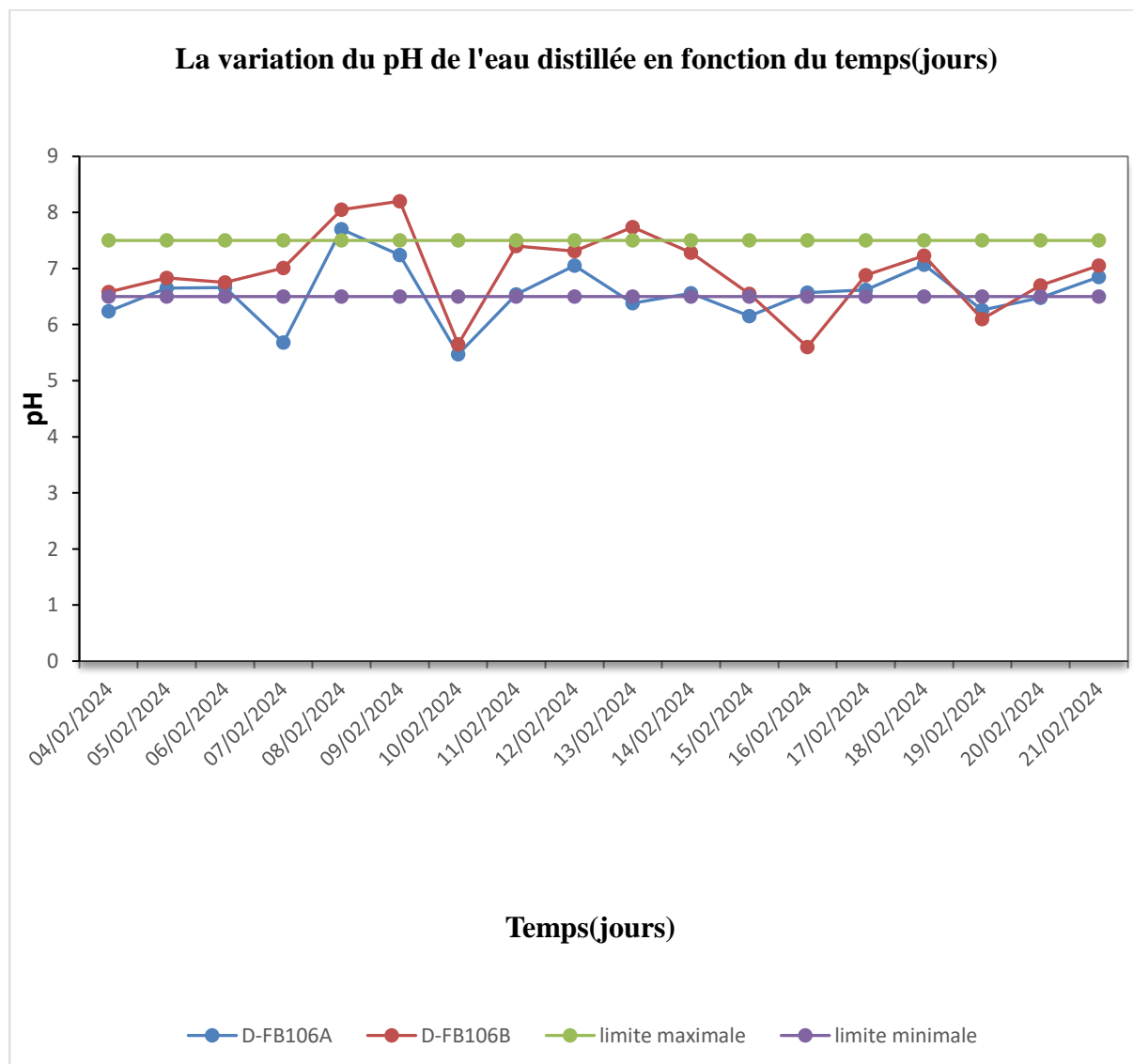


Figure V.1: La variation du pH de l'eau distillée en fonction du temps

Les résultats montrent que le pH de l'eau distillée n'est pas stable (valeur comprise entre 5,47 et 8,2), il dépasse les normes soit avec des valeurs inférieurs ou supérieurs, les normes se trouvent dans l'intervalle [6,5 – 7,5]. L'eau produite par l'unité est de nature acide. Pour la normaliser nous avons ajouté le NaOH.

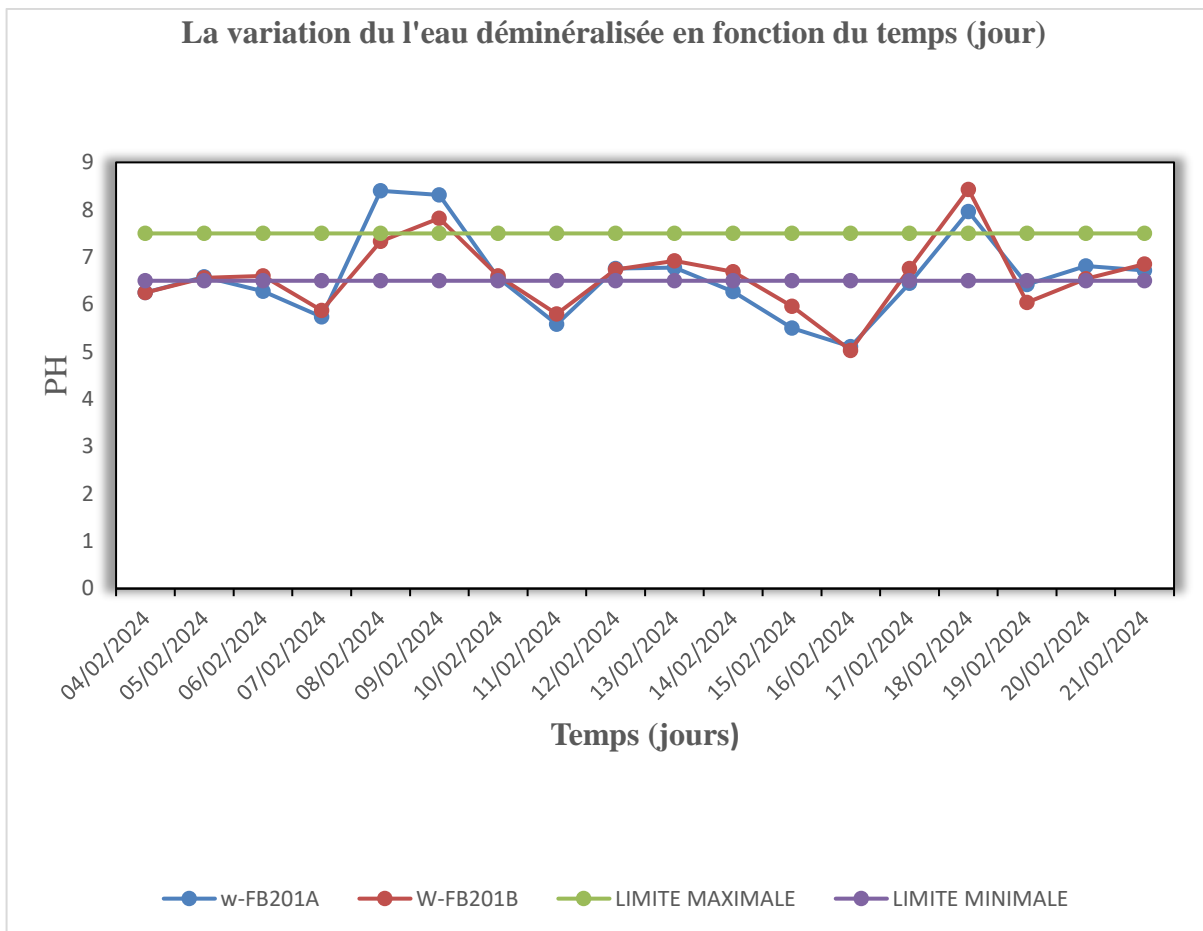


Figure V.2: La variation du pH de l'eau déminéralisée en fonction du temps

Les résultats montrent que le pH de l'eau déminéralisée n'est pas stable (valeur comprise entre 5,03 et 8,43, elles dépassent toujours les normes soit avec des valeurs inférieurs ou supérieurs aux normes.

V.1.2 Suivi de la conductivité

Tableau V.2: Variation de la conductivité en fonction du temps (jours)

Date	Conductivité			
	L'eau distillée		L'eau déminéralisée	
	D-FB106A	D-FB106B	W-FB201A	W-FB201B
04/02/2024	11	12,5	0,6	0,6
05/02/2024	09	16,2	0,6	0,7
06/02/2024	12	11,2	0,7	0,7
07/02/2024	10	31,8	0,7	0,8
08/02/2024	14	29	0,7	1
09/02/2024	12,8	32	0,7	1,1
10/02/2024	1,1	1,1	1,2	1,9
11/02/2024	18	15	0,8	1,2
12/02/2024	24,9	20	0,6	0,8
13/02/2024	23,3	25	0,6	0,6
14/02/2024	20	21	0,6	0,6
15/02/2024	19,6	24,1	0,7	0,7
16/02/2024	19,6	17,7	0,7	1,1
17/02/2024	25	16	0,6	1,1
18/02/2024	17,5	25,4	0,8	1,1
19/02/2024	16,9	20,7	0,7	1,1
20/02/2024	15	19,2	0,9	/
21/02/2024	15,7	18,1	0,8	/

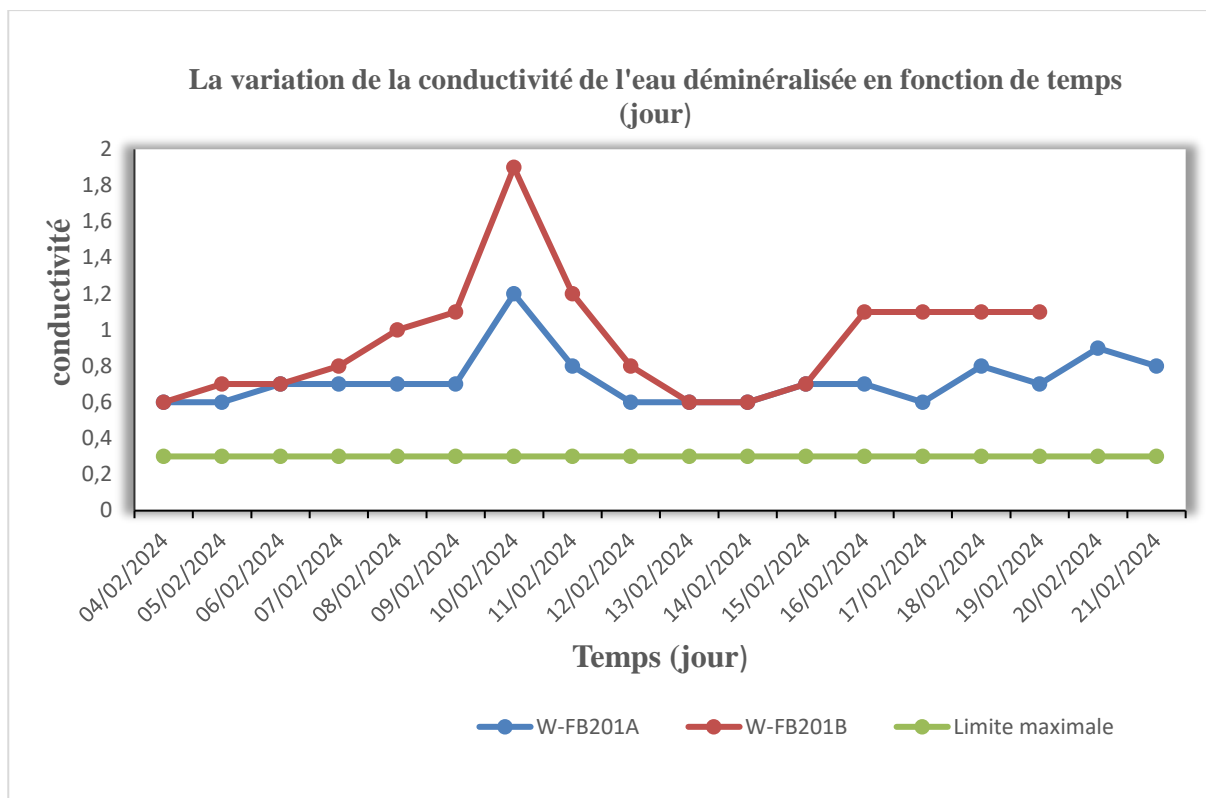


Figure V.3 : Variation de la conductivité de l'eau déminéralisée en fonction du temps (jour).

La variation de la conductivité de l'eau déminéralisée en fonction du temps Les résultats montrent que les valeurs de la conductivité de l'eau déminéralisée dépassent aussi les normes (inférieur à 0,3 $\mu\text{s/cm}$).

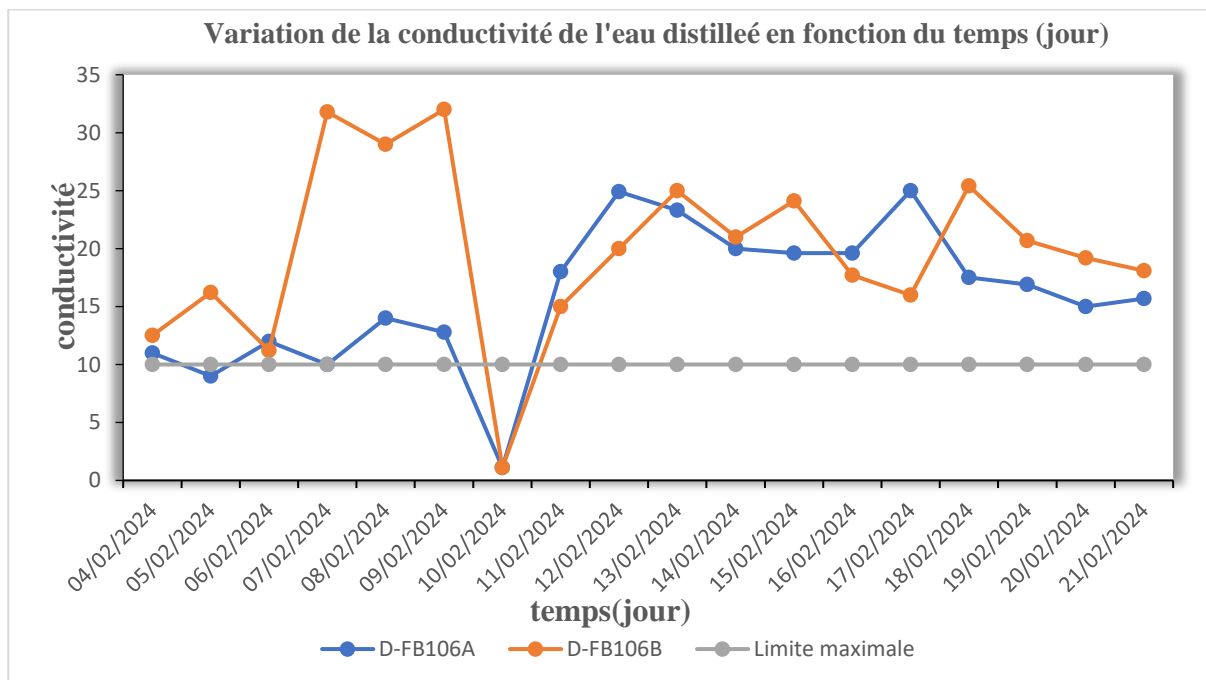


Figure V.4 : Variation de la conductivité de l'eau distillée en fonction du temps (jour).

La variation de la conductivité de l'eau distillée en fonction du temps Les résultats montrent que la conductivité de l'eau distillée dépasse les normes (10 $\mu\text{s}/\text{cm}$), Cela est dû à des raisons physiques liées au retrait du débiteur (Demister), qui est Basé sur le fait qu'un Grand nombre d'obstacles interceptent les gouttelettes entraînées dans un flux de vapeur. Des fuits dans le système peuvent permettre l'eau de mer (salée) de se mélanger a l'eau distillée (produite) augmentant ainsi la conductivité. Mais ces résultats sont acceptables tend que les valeurs sont inferieurs à 50 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

V .1.3 Suivi de la potentiel hydrogène (moyen de 4 mois)

Tableau V.3: Variation de pH en fonction du temps.

Jours	pH		
	L'eau distillée	L'eau Déminéralisée	
	D-FB106A	W-FB201A	W-FB201B
1	7,315	7,28	7,34
2	7,1975	7,295	6,84
3	7,2475	7,335	5,0275
4	7,2975	7,295	6,535
5	7,1325	7,0375	6,2825
6	7,24	7,11	6,52
7	7,08	6,9675	6,57
8	7,095	7,22	7,0675
9	7,035	7,3175	6,8175
10	7,12	7,2275	6,4725
11	7,0375	7,225	6,57
12	6,9475	7,305	6,505
13	7,035	7,01	7,86
14	6,9625	7,4375	7,6075
15	7,4225	7,27	7,46
16	7,785	7,4075	7,96
17	7,7675	7,5275	7,9125
18	7,575	7,375	7,03
19	7,355	7,18	7,04
20	7,4725	7,1825	6,5525
21	7,455	7,21	6,815
22	7,295	7,2825	6,7925
23	7,3675	7,2725	6,95
24	7,1825	6,9975	6,53
25	7,1375	7,145	6,615
26	7,03	7,0325	6,4775
27	7,045	7,0325	6,4475
28	7,075	6,89	6,37
29	6,96	7,105	6,245
30	7,1325	7,07	6,24

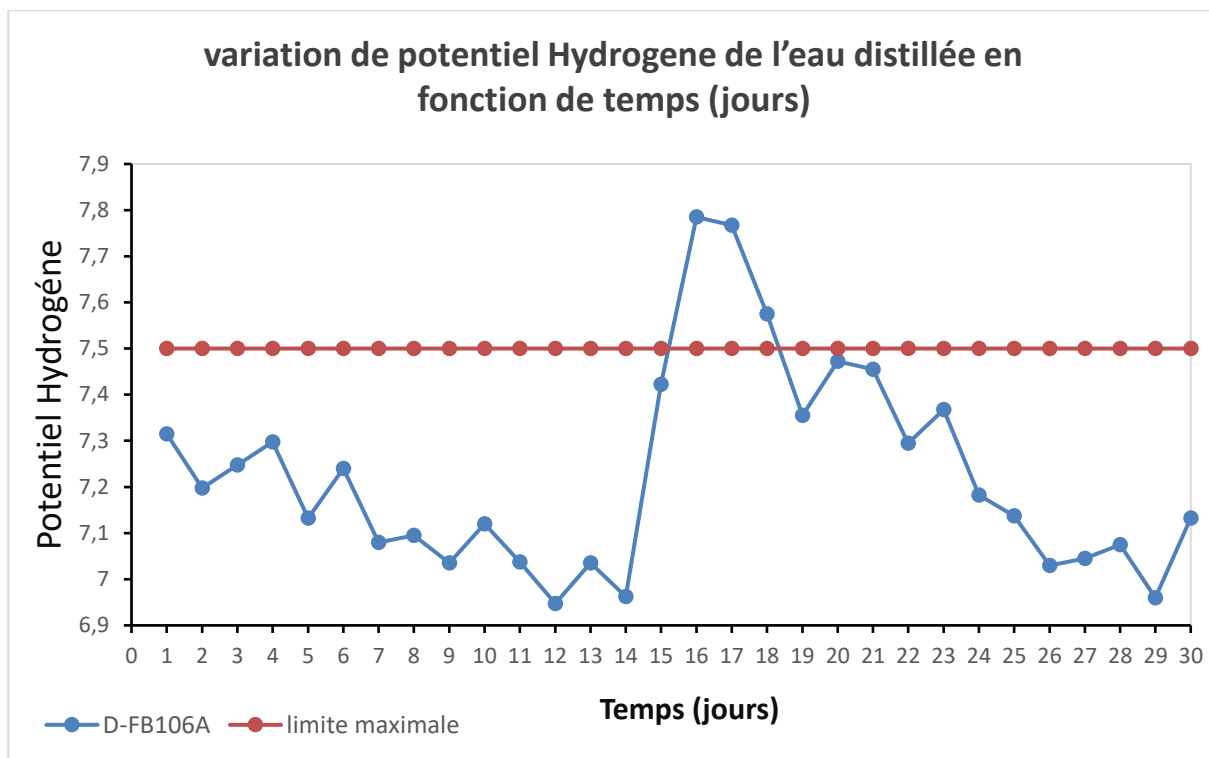


Figure V.5 : La variation de potentiel d'hydrogène de l'eau distillée en fonction de temps (jours).

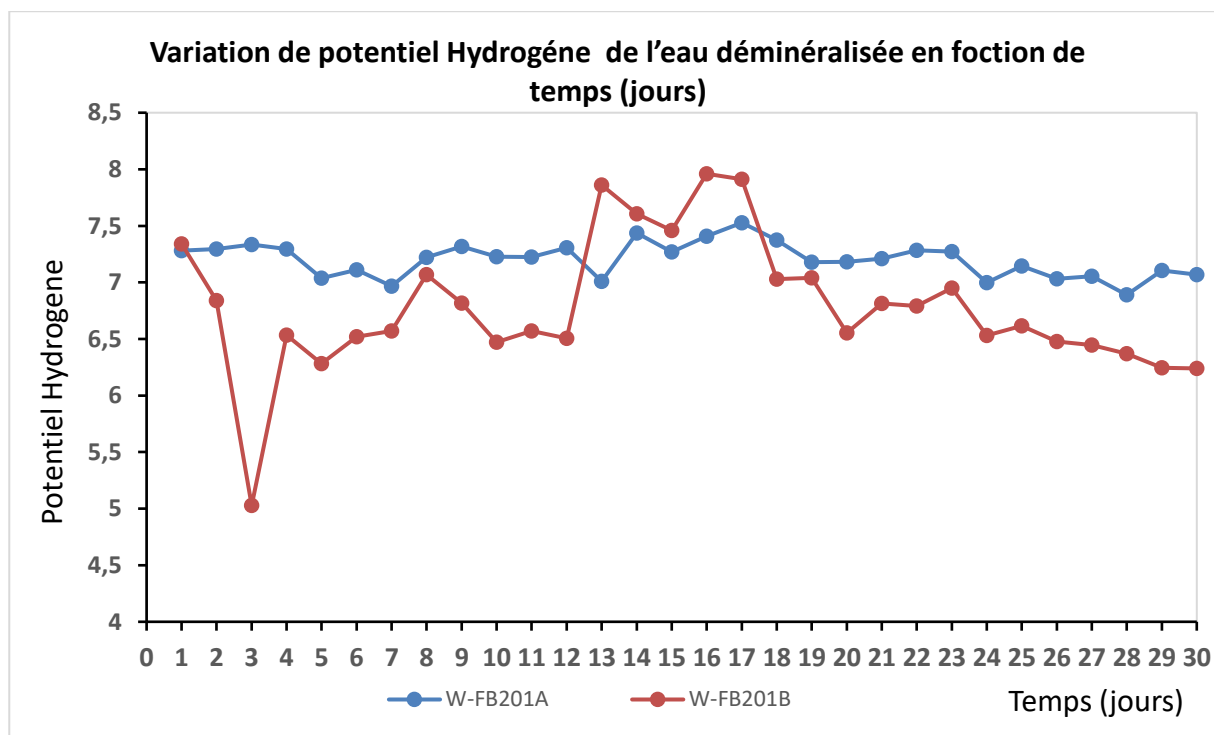


Figure V.6 : La variation de potentiel d'hydrogène de l'eau déminéralisée en fonction de temps (jours).

V.1.4 Suivi de la conductivité (moyen de 4 mois)

Tableau V.4: Variation de la conductivité en fonction du temps.

Jours	Conductivité		
	L'eau distillée	L'eau Déminéralisée	
	D-FB106A	W-FB201A	W-FB201B
1	/	/	/
2	66,17	73,32	20,42
3	/	/	/
4	62,17	103,75	11,07
5	87,73	51,77	9,37
6	75,45	65,27	18,75
7	65,5	64,35	16,52
8	65,52	62,52	14,55
9	50,62	50,62	11,65
10	47,72	47,72	7,52
11	45,25	45,25	4
12	46,75	46,75	3,6
13	55,57	67,45	24,25
14	52,6	68,42	16,6
15	72	76,75	22,45
16	73,27	79,57	18,5
17	52,34	79,87	20,97
18	73,57	76,95	25,95
19	77,95	69,32	26,5
20	70,95	71,95	27,12
21	75,6	77,77	28,1
22	/	/	/
23	62,92	75,05	24,1
24	/	/	/
25	50,75	65,72	20,42
26	54,2	60,22	22,1
27	52,77	56,5	25,25
28	/	/	/
29	66,45	58,27	25,7
30	57,85	59,87	21,02

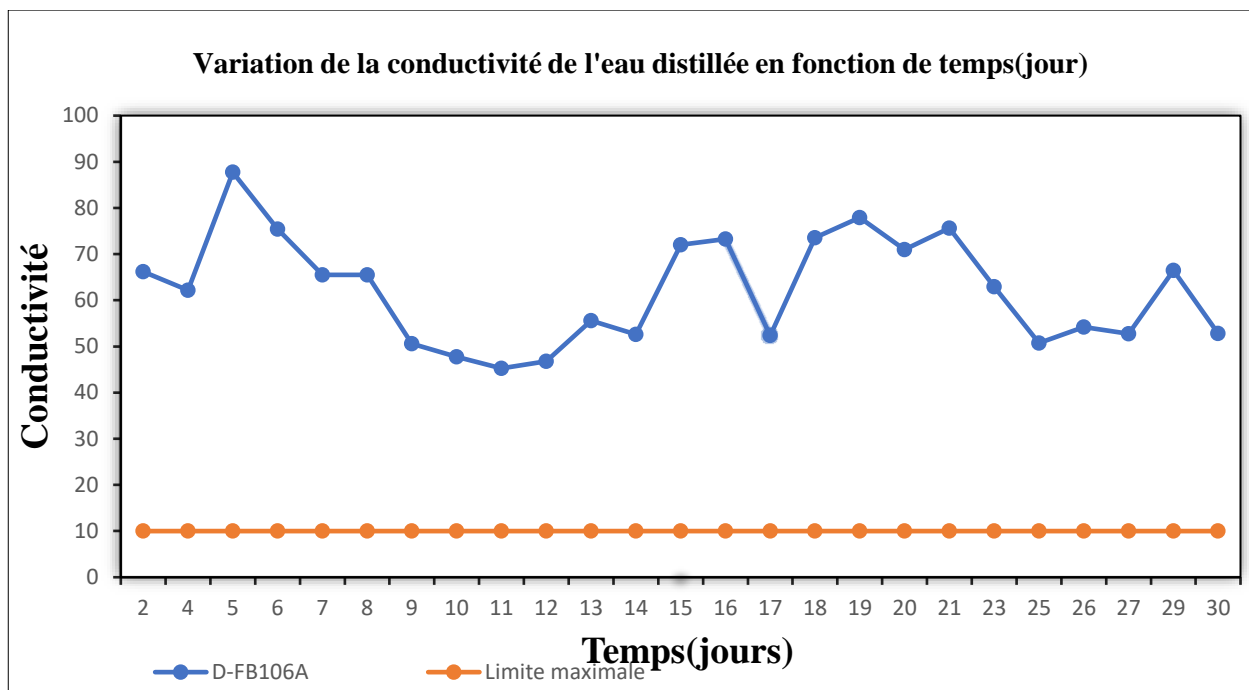


Figure V.7 : Variation de la conductivité de l'eau distillée en fonction de temps(jour).

La variation de la conductivité de l'eau distillée en fonction du temps Les résultats montrent que la conductivité de l'eau distillée dépasse les normes (10 $\mu\text{s/cm}$), mais ces résultats sont acceptables tend que les valeurs sont inférieures à 50 $\mu\text{s/cm}$.

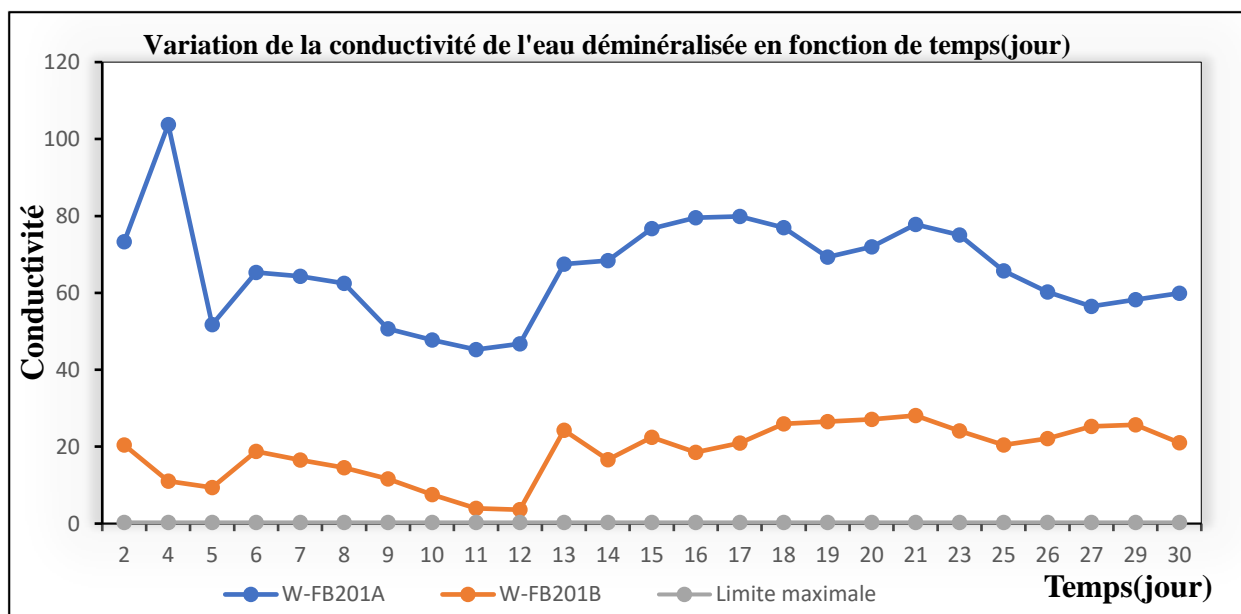


Figure V.8: Variation de la conductivité de l'eau déminéralisée en fonction de temps(jour).

La variation de la conductivité de l'eau déminéralisée en fonction du temps Les résultats montrent que les valeurs de la conductivité de l'eau déminéralisée dépassent aussi les normes (inférieur à 0,3 $\mu\text{s/cm}$).

V.1.3. Les autres paramètres

Les analyses physico-chimiques de l'eau distillée et déminéralisée sont faites le 12/02/2024 et les résultats obtenus sont présentés dans les Tableaux.

Tableau V.5 : Les résultats d'analyse de l'eau distillée.

	La valeur obtenue	Les normes
TA	Trace	Trace
TAC	1,4042 mg/l	/
Mg ²⁺	5,0554 mg/l	0,2
Ca ²⁺	Trace	0,03
SO ₄ ²⁻	4,848 mg/l	0,4
Fe	0,15 mg/l	0,04
Cu ²⁺	0,02 mg/l	0,03
Cl	Trace	2,6
SiO ₂	0,16 mg/l	0,1
Conductivité	14,2 µS/cm	<10 µS/cm
pH	6,72	6,5-7,5

Les résultats montrent que : les valeurs de TA, Ca²⁺, Cu²⁺, Cl et le pH sont dans les normes, et la conductivité, SiO₂, Fe, Mg²⁺ et SO₄²⁻ dépassent les normes, mais le Mg²⁺ et SO₄²⁻ dépassent largement les normes.

Tableau V.6: Les résultats d'analyse de l'eau déminéralisée

	La valeur obtenue	Les normes
TA	Trace	Trace
TAC	0,4012 mg/l	/
Mg ²⁺	3,79185 mg/l	/
Ca ²⁺	Trace	/
SO ₄ ²⁻	0,4848 mg/l	/
Fe	0,77 mg/l	0,02
Cu ²⁺	0,01 mg/l	0,007 ppm
Cl	Trace	2,6
SiO ₂	0,16 mg/l	0,01 ppm
Conductivité	1,8 µS/cm	0,3 µS/cm max
pH	5,78	6,5-7,5

Les résultats montrent que le TA, TAC, Mg^{2+} , Ca^{2+} , SO_4^{2+} , et le Cl sont dans les normes, mais le Fe et Cu^{2+} dépassent les normes, la conductivité et largement dépassée, et le pH inférieur aux normes (l'eau produit de nature acide).

V.1.4 Suivi de la production et le rendement de l'unité

Tableau V.7: Les résultats de la production et le rendement de l'unité entre 2011 et 2024

Heure	Production		Rendement	
	02/01/2011	09/02/2024	02/01/2011	09/02/2024
5	338	144	90,42	34,51
6	354	137	94,70	40,93
7	354	143	94,70	33,71
8	354	133	94,70	33,98
9	353	148	94,44	36,38
10	353	166	94,44	35,85
11	354	136	94,70	41,47
12	354	134	94,70	40,13
13	354	135	94,70	33,17
14	355	144	94,97	35,31
15	350	140	93,63	36,12
16	350	135	93,63	35,31
17	350	134	93,63	34,24
18	350	140	93,63	33,98
19	349	145	93,37	35,58
20	350	139	93,63	34,78
21	355	144	94,97	35,85
22	355	146	94,97	34,78
23	365	142	97,65	36,38
0	365	156	97,65	36,92
1	358	145	95,77	34,51
2	360	139	96,31	36,12
3	360	143	96,31	41,47
4	353	139	94,44	36,12
5	355	136	94,97	36,12

Les résultats indiquent une diminution de la production d'eau distillée à l'unité de dessalement de la station CP2K en 2024 par rapport à 2011. L'analyse suggère que cette baisse est principalement due à l'accumulation de dépôts salins sur les surfaces externes des tubes. Ces dépôts agissent comme une

couche isolante, réduisant le transfert de chaleur entre l'eau de mer et la surface des tubes chauds. Cela entraîne une diminution de l'efficacité du processus de dessalement et une augmentation de la consommation d'énergie.

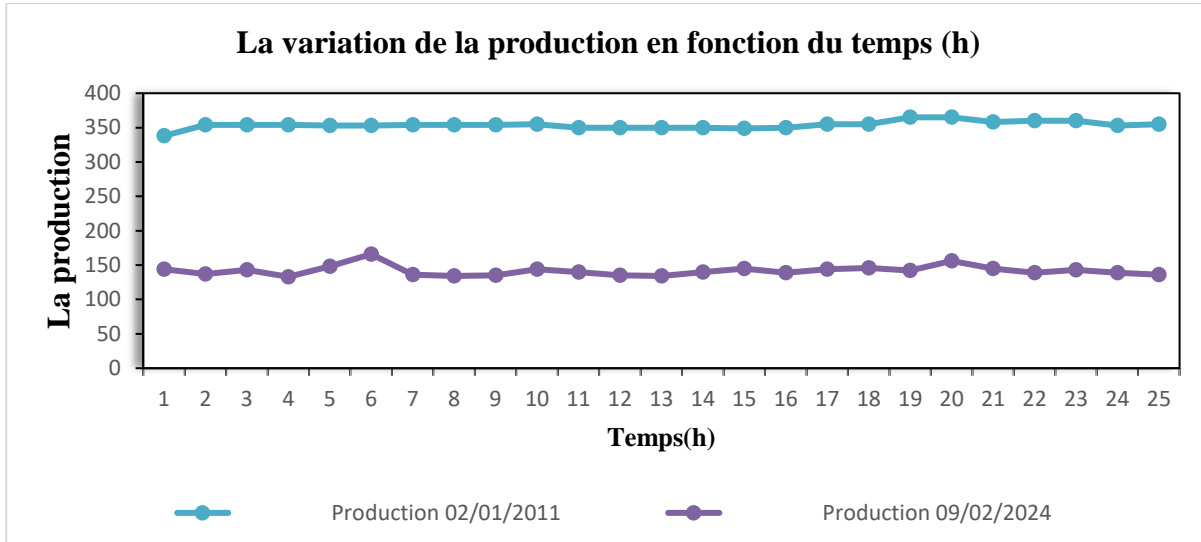


Figure V.9 : La variation de la production en fonction du temps (h).

Les résultats montrent que la production est très faible 150 m³/h par rapport à la production des années passées 350 m³/h.

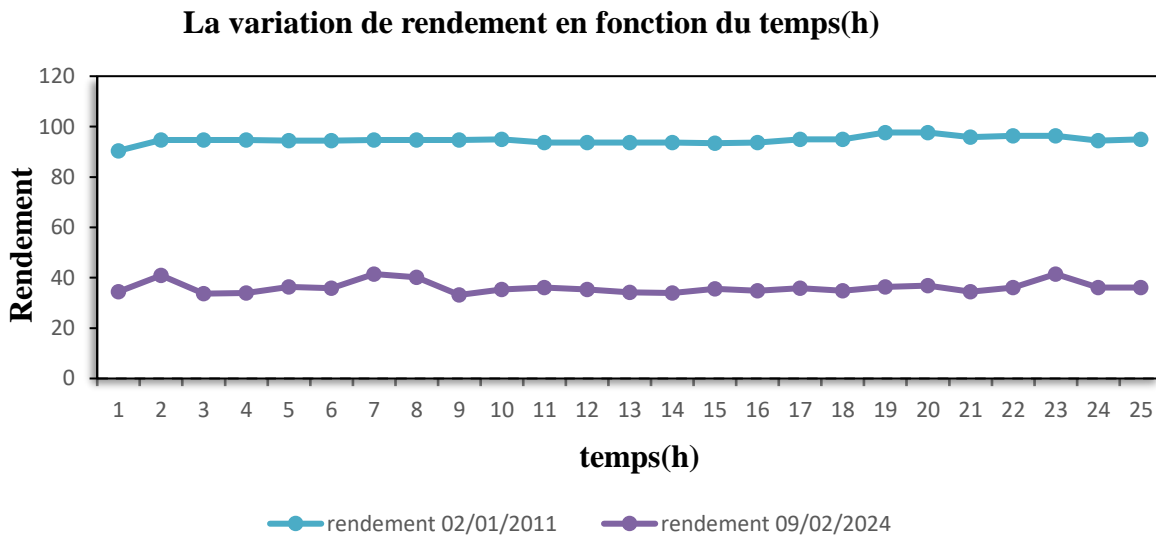


Figure V.10 : La variation de rendement en fonction du temps (h).

Les résultats montrent que le rendement est très faible 39% par rapport à le rendement des années passées.

D'après les résultats obtenus nous prouvons conclure que :

- Les valeurs des paramètres de l'eau distillée, déminéralisée, L'eau d'alimentation montrent un grand écart par rapport aux normes recommandées à cause d'un mauvais prétraitement (état de la

station de prétraitement) et l'absence de traitement chimique (l'arrêt de l'injection de NaOH ou HCl).

- La capacité d'enlèvement des sels par les évaporateurs est très élevée.
- L'unité TCD est fonctionné à basse température (inférieur à 70°C), permettant d'éviter la corrosion et la formation de l'entartrage.
- L'eau produite par l'unité est de nature corrosive.
- la concentration des fers totale dans l'eau de chaudière A et l'eau d'alimentation BFW est dépassé les normes, qui montre il est existé un problème de corrosion.

V .2 Conclusion

- L'unité de dessalement TCD 6-8000 produit l'eau distillée de haute qualité jusqu' au dernier mois, la conductivité augmente et le pH n'est pas stable. Une perte de production et une baisse de rendement ont été enregistrées à cause de l'épuisement des équipements de l'installation.
- Les valeurs des paramètres de l'eau distillée et déminéralisée montrent un grand écart par rapport aux normes recommandées.
- L'entartrage diminue le rendement mais il y a autre problème qui est le responsable principale de la perte de la charge c'est le système de mise de vide

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Le dessalement de l'eau de mer est un moyen industriel efficace permettant de résoudre les problèmes de pénurie de l'eau dans le monde, et les besoins croissants en cette matière. Dans l'industrie et pour de grandes capacités d'eau, les procédés de dessalement se répartissent en deux grandes catégories ; d'une part les procédés à distillation et d'autre part les procédés à membranes. Le complexe CP2/K de SKIKDA utilise pour le besoin de ces unités en eau le procédé de distillation, au début et pendant plusieurs années la distillation de type multi-flash, mais à cause des problèmes de corrosion et de l'entartrage, cette station est tombée en panne (2007). Aujourd'hui la station utilise le procédé de dessalement de type TCD pour la production de l'eau distillée. [78]

Dans ce travail nous avons effectué des analyses concernant les paramètres chimiques des eaux produites par les évaporateurs tel que : le pH, la conductivité, la dureté total, ...etc. Pour contrôler la qualité de ces eaux et vérifier l'efficacité des traitements physicochimiques appliqués sur les eaux. Ainsi que l'étude sur les problèmes rencontrés et résoudre pour maintenir le rendement élevé. [78]

D'après les résultats obtenus nous pouvons conclure que :

Les valeurs des paramètres de l'eau distillée et déminéralisée montrent un grand écart par rapport aux normes recommandées à cause d'un mauvais prétraitement (état de la station de prétraitement) et l'absence de traitement chimique (l'arrêt de l'injection de NaOH ou HCl).

- La capacité d'enlèvement des sels par les évaporateurs est très élevée.
- L'unité fonctionne à basse température (inférieure à 70°C), permettant d'éviter la corrosion et la formation de l'entartrage.
- L'eau produite par l'unité est de nature corrosive. [78]

Suite au stage réalisé dans cette unité de dessalement TCD 6-8000, nous avons constaté la baisse de la production et du rendement. Cela se traduit par la présence des causes suivantes :

- La conductivité de produit $>10 \mu\text{S}/\text{cm}$.
- Entartrage de la surface d'échange extérieure de tubes d'évaporateur des cellules.

Nous avons remarqué après l'ouverture de l'unité pour l'inspection que :

- Un début de dépôt de tartre à la surface extérieure des tubes de l'évaporateur.
- Matériaux corrodés (les anodes sacrificiels) [78]

Les différents constats enregistrés au niveau des tubes de l'évaporateur lors des ouvertures de la cellule du procédé de dessalement TCD 6-8000 ont révélé que la paroi externe est colmatée par des dépôts de tartre, les causes principales sont le débit d'arrosage d'eau de mer faible et la température élevée de la vapeur entrante dans la cellule coté tubes, et surtout, la mauvaise injection ou le dosage des produits chimiques (l'antitartre et l'anti-mousse) [78].

Ces différents constats ont pour conséquences :

- La transmission de chaleur du métal vers le fluide diminue d'où le risque d'un échauffement local du métal ayant pour conséquence une baisse des caractéristiques mécaniques pouvant être rapidement dangereuse pour la durée de vie de l'appareil.
- La baisse du rendement thermique de l'appareil. [78]

Pour résoudre les problèmes qui ont été cités sur le procédé de dessalement, il faut réaliser les actions suivantes :

❖ Injection convenable des produits chimiques

Une surveillance attentionnée des injections des produits chimiques (antitartre, antimousse) aide à maintenir l'entartement au minimum tout au long de la vie de l'unité et réduire le risque d'accumulation anormale de tartre selon les échelles données. A chaque fois qu'une unité est à l'arrêt, nous recommanderons d'ouvrir les trappes d'inspections et de vérifier l'état de propreté de l'unité et d'envisager s'il y aura un besoin d'un lessivage acide [78].

Reference bibliographique

- [1] : C.Cardot, Génie de l'environnement, Les traitements de l'eau. Edition : Ellipses. 247p, 1999.
- [2] : MERCIER J. (2000). Le grande livre de l'eau. Edition : renaissance du livre (la).
- [3] : BALDERACCHI R. (2009). L'eau dans l'organisme. Centre national de la recherche scientifique (CNRS).
- [4] : DUMOULIN L ., MANTHA M .M. Boire de l'eau pourquoi et combien ? Révision médicale : DPaul Lépine, M.D., D.O. Le 26 septembre 2005, Mise à jour : mai 2009.
- [5] : JOA. (2005). Journal officielle algérienne n°60.la loi n°05-12 du 4 aout 2005, relative à l'eau
- [6] : DITMAN M. (2009).L'eau introduction
- [7] : HUOT A. (2010). Eau et santé. La revue Biocontact, n°200.
- [8] : Iver Duedall , Notes de cours - Océanographie, Florida Institute of Technology
- [9] : BAKALOWICZ, M., Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques, Agence de l'eau Rhône Méditerranée, Corse, 1999.
- [10] : Iver Duedall, Notes de cours - Océanographie, Florida Institute of Technology.
- [11] : Dessalement de L'eau de mer, Mémoire de Master, Université 08 Mai 1945 de Guelma septembre 2020.
- [12] : HENRI, L., KAMEL, F., Dessalement de l'eau de mer et des saumâtres par Osmose Inverse,Middle East Desalination Research Center en collaboration avec L'université Saad Dahlab de Blida, Algérie, Janvier 2008
- [13] : H.T.Dessouky.H.M.Ettouney-Fundamentals of salt water desalination-ElsevierScience(2002).
- [14] : A.AOUALMIA, kh.GASMALLAH « Modélisation du système de coagulation-floculation : cas de la station de traitement de l'eau potable Ain Dalia-Souk Ahras, Juin 2015 »
- [15] : ALPHA, S. M., Qualité organoleptique de l'eau de consommation produite et distribuée par l'EDMSA dans la ville de Bamako, Thèse de doctorat en pharmacie, université de bamako, 2005.
- [16] : MONIQUE, H., Les eaux naturelles et les eaux de consommation, Saint Laurent,
- [17] : SAVARY P, Guide des analyses de la qualité de l'eau, territorial éditions, pp75-115, 2010 17
- [18] : HAMANI, A., Etude des performances du pilote d'électrodialyse dans la déminéralisation des eaux saumâtres, Mémoire de fin d'études, Ecole nationale supérieure de l'hydraulique Abraoui Abdelah, 100 pages, 2013.
- [19] : HABET, L., Contribution à l'étude des impacts du dessalement des eaux de mer sur l'environnement, Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara Bumerdes, 153pages, 2012.

- [20] : BELGHITI M.L., CHAHLAOUI A., BENGOUIMI D., EL MOUSTAINE R. (2013). Etude de La qualité physico -chimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe
- [21] : RODIER J. (2009). L'analyse de l'eau .9eme édition© Dunod, Paris, 2009. ISBN 978-2-10-054179-9. 1526p.
- [22] : ATALLAH, A., Procédé de dessalement et qualité physico-chimique de l'eau dessalée de la station HONAINA. Mémoire de fin d'étude, Master, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 99 pages, 2014
- [23] : HENRI, L., KAMEL, F., Dessalement de l'eau de mer et des saumâtres par Osmose Inverse, Middle East Desalination Research Center en collaboration avec L'université Saad Dahlab de Blida, Algérie, Janvier 2008
- [24] : MOULIN, B., Le kayak et la mer, édition le Canotier,2004
- [25] : KEMMER F. N.(1984). Manuel de l'eau.Technique & Documentation Lavoisier.ISBN 2-85206-220-8. RODIER J. (2009). L'analyse de l'eau .9eme édition© Dunod, Paris, 2009. ISBN 978-2-10-054179-9. 1526p.
- [26] : FELLAH A. (2010).Contribution a l'étude des polluants métalliques dans l'eau et les sédiments de l'estuaire de la Tafna (Rachgoune ,Tlemcen).magister en chimie. Université de Tlemcen.
- [27] : LEBLEU N., Désinfection des eaux par procédés membranaires, étude des mécanismes de transfert des bactéries, thèse de doctorat, spécialité génie des procédés et de l'environnement, Université de Toulouse, 2007.
- [28] : HASLAY C. et LECLERC H., Microbiologie des eaux d'alimentation, technique et documentation, édition Lavoisier, Paris, 1993.
- [29] : Sandeep Sethi, Greg Wetterau. Desalination of Seawater MANUAL OF WATER SUPPLY PRACTICES M61, First Edition. 6666 West Quincy Ave. : American Water Works Association, 2011.
- [30] : BOYE H. (2008) .Eau, énergie dessalement et changement climatique en méditerrané .Plan bleu centre d'activité régional, conseil général du l'environnement et du développement durable.
- [31]: PATIER X. & BLANCHON D. (2010). Documentation photographiques. 8078. L'eau,une ressource menacée ? La documentation Française. Paris. 63p
- [32] : Dunglas J., 2014 : « Le dessalement de l'eau de mer Une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau ».
- [33] : .Viviane Renaudin, «le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres».CNRS, Nancy, article 2003.

- [34] : Maurel A., 2006 : « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres », 2ème Ed. Tec&Doc Lavoisier.
- [35] : DUNGLAS J.(2014). Le dessalement de l'eau de mer, une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau. Groupe eau. Académie d'agriculture de France
- [36] : S. Kehal, Rétrospective et perspective du dessalement en Algérie, *Desalination* (136),35-42,2001.
- [37] : James D. Birkett, The History of Desalination Before Large-Scale Use, in *Desalination and Water Resources - History, Development and Management of Water Resources*, Vol.I. (2012) Paris: Unesco. pp.381-434 I (Encyclopedia of life support systems).
- [38] : S. Loeb (1981), The Loeb-Sourirajan Membrane: How It Came About, in Turbak A.F. *Synthetic membranes*. Washington, DC: American Chemical Society. 9p. (ACS Symposium Series).
- [39] : Pastor Jean, Pauli Anne-Marie (1995). *Dialyse. Chromatographie et techniques séparatives*. Paris : Techniques de l'Ingénieur - p 1525.
- [40] : RUMEAU Michel. *Membranes, transferts*. Encyclopædia Universalis.
- [41] : Hari J. Krishna. *Introduction to Desalination Technologies*.
- [42] : Bessenasse Mohamed. *Dessalement d'Eau de Mer : Etude de Trois Stations du Littoral Algérois*; Université SAAD Dahleb (Blida), B.P 26 D Hadjout – W.Tipaza – 42200 – Algérie.
- [43] : Touhant Selim, *Amélioration de la gouvernance du service public de l'eau*, 2013.
- [44] : I. Ahmouda et H.Biaa, *Traitement des rejets de dessalement de l'eau de mer cas de « les dunes » Oran*, mémoire de master, Université Larbi Tebssi, 2015-2016.
- [45] : C.Cardot, *Génie de l'environnement, Les traitements de l'eau*. Edition : Ellipses. 247p, 1999
- [46] : C.Briefert et al, *Chimie de l'environnement (air, eau, sols et déchets)*. Edition : Boeck & larciel, 2001.
- [47] : C. Le Guern, P. Lachassagne et Y. Noël, F. Persin, I. De Buysscher, *Dessalement et recharge artificielle : synthèse technico-économique*, BRGM/RP-52262-FR, mars 2003, 80p
- [48] : Annie Bissonnette, *Utilisation de nanomembranes pour le dessalement de l'eau et comparaison avec l'osmose inverse et la distillation*, Essai effectué en vue de l'obtention du grade de maître en environnement, université de Sherbrooke, Québec, Canada, Janvier 2008, 58p
- [49] : Wladimir Alechine, Claude Aubert, Paul Couget, Pierre Courvoisier, Claude Duffau, Damien Feron, Pierre Glomot, Mustapha Gunaltun, Roger Legrand, Lionel Lemonie, Yvon Morizur, Marcel Roche, Jean-Pierre Samaran et Gérard Tripony, *circuit eau de mer traitement et matériaux*, éditions technique, paris, 1993, 393p.

- [50] : Jean-Pierre Dalpont, Sylvie Baig, Jean-Louis Roubaty, Michel Roustan, Jean-Marie Rovel, Procédés de traitement des eaux potables, industrielles et urbaines, Technique de l'ingénieur, W2700, Août 2008, 116p.
- [51] : Tada-Ducru Farid, Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes, 2009, 15p
- [52] : Patrick Danis, Dessalement de l'eau de mer, Techniques de l'Ingénieur, J 2700, Juin 2003, 18p.
- [53] : Etude d'alimentation de rendement du procédé de dessalement à thermo compression au niveau du complexe d'ammoniac sorfert, Mémoire de fin d'études, Master, Université Mohamed Boudiaf Oran, 74 pages, 2014.
- [54] : Revue, Nancy Brabois ,Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres: Educsol, 18 novembre 2003.
- [55] : Guide de conduit, ENIP SKIKDA, Guide de conduite de de maintenance.
- [56] : Alfa Arzate. Procédés de séparation membranaire et leur Application dans L'industrie Alimentaire. Revue de littérature, 642-RVL-0508. Quebec : Saint-Norbert d'Arthabaska, 30 mai 2008, 56p.
- [57] : BERLAN J M & JUERY C. (2002). le procédé membranaire pour le traitement de l'eau. Office international de l'eau (SNIDE).ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales. direction de l'espace rurale et de la foret- France.
- [58] : A. Maurel, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce, 2ed, Lavoisier,2006.
- [59]: a. t. m. jamaluddin, a.m. farooque, r. al-rasheed, a novel approach for prediction of osmotic pressure for plant design and performance normalization of seawater, 4th annual workshop on water conservation in the kingdom of saudi arabia, 2001.
- [60] : A. Bushnak, Évaluation des meilleures technologies disponibles pour le dessalement en zones rurales/locales. Rapport final, Gestion Intégrée Durable de l'Eau – Mécanisme de Soutien (SWIM - SM), 2012.
- [61] :A.Al-Karaghoul, Renewable Energy Opportunities in Water Desalination , in desalination ,Trends and Technologies , M.Schorr,Ed.InTech, 2011.
- [62] : Mémoire Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master theme Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY Année 2019/2020 page 18 /19/20
- [63] : Mémoire. De. Master. Etude des performances de la station de dessalement d'eau de mer de FOUKA Wilaya de TIPAZA année 2019/2020 la page 19.

- [64] : Chenaoui, B., Dessalement de l'eau de mer à la station de MAINIS et son impact sur l'environnement, thèse d'ingénieur, Université de Chlef, 2010.
- [65] : Tahraoui, D., Qualité des eaux de mer après dessalement au niveau de la station de dessalement de la ville de Ténès (Chlef) et l'impact de dessalement sur l'environnement (milieu aquatique), Communication, WATMED5, lille-France, 2010.
- [66] : Maurel, Osmose inverse in: Les séparations par membrane dans les procédés de l'industrie alimentaire. G.Daouin , F. René , P.Aimar, Paris, Lavoisier - Tec & Doc: 68-85, 1998.
- [67] : S.Frioui , R. Oumeddour, 2008. Investment and production costs of desalination plants by semi-empirical method, Desalination223, 457–463.
- [68] : I. Ahmouda et H.Biaa, Traitement des rejets de dessalement de l'eau de mer cas de « les dunes» Oran , mémoire de master, Université Larbi Tebssi, 2015-2016.
- [69] : Degremont Suez, 2005. Mémento technique de l'eau. Rueil Malmaison, Degremont, 2 tomes, 171p.
- [70] : ATALLAH, A., Procédé de dessalement et qualité physico-chimique de l'eau dessalée de la station HONAINE. Mémoire de fin d'étude, Master, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 99 pages, 2014.
- [71] :F.Ismail.D.Mohammedi.B.Talhi.et.M.DJEHA.Lutte-contre;entartrage-de-installation-a-multi-etages-de-dessalement;eau-de-mer-de;enip-skikda.
- [72] :Christophe.Casademont.Approche-Des-Phénomènes-colmatage ,électrodialyse dans;industri laitière.Département de sciences des aliment et de nutritionfaculte des sciences de l'agriculture et de alimentation université laval québec 2008.
- [73] : Bonnin.J, Hydraulique urbaine. Edition: Eyrolles. 228p, 1986
- [74] : Alain Seron, Marie –christine dictor, Balandine Clozel. prévention et réduction des phénomènes de colmatage par modification de l'interface .Lyon Florian Mermillod.Blondin.Université Lyon I,(HBES) 2006.
- [75] :. Axel ETTORI (2011) : « Vieillesse chimique de membranes d'osmose inverse ». Thèse en vue de l'obtention du DOCTORAT université de Toulouse III - Paul Sabatier FRANCE.
- [76] : Hussein Abazza ,Considérations économiques concernant l'approvisionnement en eau par dessalement dans les pays du sud de la méditerranée . Rapport final, Gestion Intégrée Durable del'Eau – Mécanisme de Soutien (SWIM - SM), Août 2012.
- [77] : Kettab.Ahmed-Bessenasse.Mhamed.Le dessalement d'eau de mer option incontournable pour l'Algérie.Univessité Saad Dahleb(Blida).Laboratoire Lrs-Eea(E.N.P) Alger.
- [78] : Manuel opératoire.