



جامعة بجاية
Tasdawit n'Bgayet
Université de Béjaïa



Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique
Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement (LRHAE)

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par :

BOUKELLAL Imane

HANANE Abdelghani

En vue de l'obtention du diplôme de **MASTER en Hydraulique**

Option : **Hydraulique urbaine**

INTITULE:

**ETUDE DU PROCEDE DE DESSALEMENT DE L'EAU DE
MER ET DE LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU
DESSALEE DE LA STATION DE CAP DJINET DE LA
WILAYA DE BOUMERDES**

Soutenu le **16 juin 2015**

Devant le jury composé de :

- Président : **Dr BERREKSI Ali**
- Promoteur : **Dr HABI Abderrahmane**
- Examineur: **Dr BEY Said**

Remerciements

Avant tout, nous remercions DIEU qui a illuminé notre chemin et qui nous a armé de courage pour achever nos études.

Nous remercions fortement notre promoteur : M. HABI Abderahmane de nous avoir orienté par ses conseils judicieux dans le but de mener à bien ce travail. Nos vifs remerciements vont également à M. ATROUZ et M^{me} BEN DAHMANE et plus particulièrement à :

M. FERRAH « DG. ADE de Boumerdès »

TALANTIKITE Sid Ahmed « Responsable du laboratoire CDJ »

TACHAOUT Nadjib

Nous tenons à remercier aussi :

 *Les membres de jury pour avoir acceptés d'évaluer notre travail*

 *Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans l'élaboration de notre mémoire en particulier M. GOUNANE Ighilas.*

Dédicaces

C'est avec un cœur plein de joie que je dédie ce modeste travail :

Aux deux bougies qui s'allument rien que pour éclaircir mon chemin ; ma très chère mère exemple de courage et mon très cher père mon exemple de sagesse. Je prie Dieu le tout puissant de les protéger du mal et de les récompenser.

A mes adorables frères ; Hakim et Sidali

A mes très chères sœurs ; Souhila et Lilia

A mes oncles, mes tantes ; Zahia, Kahina, Ouiza ainsi que leurs maris

A mes chères cousines ; Dihia, Ouarda et Fifi et le petit Ghilas

A mes deux grandes mères que dieu les protège

A tout mes amis, en particulier Lamia, Noredine, Milia et Fahim que j'aime énormément

A mon binôme Ghani que je respecte tant et à sa famille

A mon cousin Abdnour, sa femme Nadjia et leurs enfants Mayas et Yanni

A ma copine de chambre Soriya que j'estime beaucoup

Et sans oublier Gma Youcef ainsi que toute sa famille

Imane

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Propriétés de l'eau de mer

I-1 Introduction	3
I-2 Sources d'eau.....	3
I-2.1 Eaux douces de surface.....	3
I-2.2 Eaux souterraines.....	3
I-2.3 Eaux de mer	4
I-3 Composition de l'eau de mer.....	5
I-3.1 Eléments principaux	5
I-3.2 Autres éléments minéraux	5
I-3.3 Matières organiques.....	6
I-4 Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer et des eaux saumâtres.....	6
I-4.1 Salinité.	6
I-4.1.1 Notion de salinité.....	6
I-4.1.2 Définitions de la salinité	6
I-4.1.3 Salinité de l'eau de mer	7
I-4.1.4 Sels minéraux	7
I-4.1.5 Origine de la salinité.....	8
I-4.1.6 Salinité des eaux saumâtres	8
I-4.1.7 Mesure de la salinité	9
I-4.2 Densité.	10
I-4.3 Solubilité..	11
I-4.4 Température.....	11
I-4.5 PH.	11
I-4.6 Dureté.	12
I-4.7 Matières en suspension.....	12
I-4.8 Conductivité électrique.....	12
I-5 Paramètres organoleptiques	12
I-5.1 Couleur.	12
I-5.2 Goûts et odeurs	13
I-5.3 Turbidité	13
I-6 Pollution des eaux par les métaux lourds	13
I-7 Paramètres microbiologiques	13

I-8	Conclusion	14
-----	------------------	----

Chapitre II : Généralités sur le dessalement de l'eau de mer

II-1	Introduction	15
II-2	Schéma général d'une installation de dessalement	15
II-2.1	Captation d'eau de mer	15
II-2.2	Prétraitement	16
II-2.2.1	Prétraitements physico-chimiques.....	16
II-2.2.2	Prétraitements chimiques	17
II-2.3	Différents procédés de dessalement	18
II-2.3.1	Procédés de distillation.....	18
II-2.3.1.1	Distillation à simple effet	18
II-2.3.1.2	Distillation à effet multiple.....	19
II-2.3.1.3	Distillation avec compresseur de vapeur.....	19
II-2.3.1.4	Distillation par détente successive ou procédé 'Flash'	20
II-2.3.2	Procédés membranaires.....	20
II-2.3.2.1	Electrodialyse	20
II-2.3.2.2	Osmose Inverse	21
II-2.3.3	Autres procédés de dessalement.....	25
II-2.3.3.1	Echange ionique	25
II-2.3.3.2	Dessalement par congélation.....	26
II-2.3.3.3	Distillation solaire	26
II-2.4	Post traitement ou minéralisation.....	26
II-2.4.1	Ajustement de pH.....	26
II-2.4.2	Chloration.....	26
II-3	Problèmes techniques rencontrés en dessalement.....	26
II-3.1	Entartrage	26
II-3.2	Corrosion.....	27
II-3.3	Colmatage ou fouling	27
II-4	Nettoyage des membranes.....	27
II-5	Situation et évolution du marché du dessalement	28
II-5.1	Capacité installée.....	28
II-5.2	Coût du dessalement.....	29
II-5.3	Dessalement en Algérie.....	30
II-6	Conclusion.....	31

Chapitre III : Impacts du dessalement sur l'environnement

III-1	Introduction.....	32
III-2	Origine et type des émissions et rejets.....	32
III-2.1	Émissions atmosphériques.....	32
III-2.2	Rejets chimiques.....	32
III-3	Consommation énergétique.....	33
III.4	Bruit.....	33
III.5	Impacts sur le paysage.....	34
III.6	Impacts sur l'environnement.....	34
III-6.1	Impacts dépendant du lieu de prélèvement d'eau de mer.....	34
III-6.2	Collision d'organismes marins contre les tambours tamiseurs.....	35
III-6.3	Introduction d'organismes dans le circuit d'eau.....	35
III-6.4	Impacts liés aux rejets.....	36
III-6.5	Impacts liés à la salinité.....	36
III.6.6	Effets des rejets de produits chimiques.....	37
III-6.6.1	Effets dus aux produits de la corrosion.....	38
III-6.6.2	Effets dus aux additifs antitartres.....	38
III-6.6.3	Effets des additifs antisalissures.....	38
III-6.6.4	Effets des additifs antimousses.....	38
III-6.6.5	Effets du concentré (saumure).....	38
III-6.7	Effets dus à la chaleur.....	39
III-7	Conclusion.....	39

Chapitre IV : Cadre d'étude

IV-1	Etude du procédé de dessalement de la station de Cap Djinet.....	40
IV-1.1	Introduction.....	40
IV-1.2	Présentation de la station de dessalement Cap Djinet.....	40
IV-1.2.1	Situation géographique.....	40
IV-1.2.2	Processus du dessalement appliqué dans la station du dessalement de Cap-Djinet.....	41
IV-1.2.2.1	Captage de l'eau de mer.....	43
IV-1.2.2.2	Prétraitement.....	43
IV-1.2.2.3	Procédé Osmose inverse.....	46
IV-2.2.3.1	Récupération d'énergie.....	48
IV-1.2.2.3.2	Poste de nettoyage chimique.....	51
IV-1.2.2.3.3	Rejet de saumure et produits chimiques.....	52

IV-1.2.2.4 Post-traitement	53
IV-2 Matériels et méthodes	54
IV-2.1 prélèvement et échantillonnage	54
IV-2.1.1 Sites de prélèvements	54
IV-2.1.2 Mode de prélèvement.....	55
IV-2.2 Méthodes d'analyse physico-chimique.....	55
IV-2.2.1 Paramètres organoleptiques	55
IV-2.2.2 Paramètres physico-chimiques	56
IV-2.2.2 .1 Mesure de la conductivité	56
IV-2.2.2 .2 Mesure de la Température	56
IV-2.2.2.3 Mesure du pH	56
IV-2.2.2 .4 Mesure des MES.....	56
IV-2.2.2 .5 Mesure de l'Alcalinité	57
IV-2.2.2 .6 Mesure du chlore	58
IV-2.2.2 .7 Mesure de la Dureté Total (TH)	59
IV-2.2.2 .8 Mesure de calcium (Ca^{2+}).....	60
IV-2.2.2 .9 Mesure de magnésium (Mg^{2+})	60
IV-2.2.2 .10 Mesure de TDS	61
IV-2.2.2 .11 Détermination des résidus secs	61
IV-2.2.3 Paramètres chimiques	62
IV-3 Résultats et discussions.....	63
IV-3.1 Résultats de l'analyse de l'eau produite par l'unité de Cap Djinet.....	64
IV-3.1.2 Paramètres physico-chimiques	64
IV-3.1.2.1 Chlore libre	65
IV-3.1.2.2 Dureté totale.....	65
IV-3.1.2.3 Total des solides dissous (TDS)	66
IV-3.1.2.4 Potentiel d'hydrogène (pH)	66
IV-3.1.2.5 Température	67
IV-3.1.2.6 Conductivité électrique.....	67
IV-3.1.2.7Dureté calcique	67
IV-3.1.2.8 Dureté magnésienne.....	68
IV-3.1.2.9 Titre alcalimétrique TA	68
IV-3.1.2.10 Titre alcalimétrique complet TAC.....	69
IV-3.1.3 Paramètres chimiques	69
IV-3.1.2.1 Teneur en Bore	70

IV-3.1.2.2	Chlorures.....	70
IV-3.1.2.3	Nitrites	70
IV-3.1.2.4	Nitrates.....	71
IV-3.1.2.5	Sulfates	71
IV-3.1.2.6	Sodium.....	72
IV-3.1.2.7	Potassium.....	72
IV-3.1.2.8	Fer	73
IV-3.2	Résultats et discussions de l'analyse de l'eau de mer et de la saumure	74
IV-3.2.1	Total des solides dissous.....	74
IV-3.2.2	PH.....	75
IV-3.2.3	Conductivité.....	75
IV-3.2.5	Turbidité	76
IV-3.2.6	Fer.....	77
IV-3.2.7	Matières en suspension	77
IV-3.2.8	Résidus sec à 180 °C.....	78
IV-3.2.9	Chlore total	78
CONCLUSION GENERALE.		79
Références bibliographiques.....		80
Annexes.....		83

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Hémisphère continental (Nord).....	4
Figure I.2 : Hémisphère maritime (Sud).....	4
Figure I.3 : Le réfractomètre.	9
Figure I.4 : Refractomètre standard et pro refractomètre.	9
Figure I.5 : L’hydromètre à aiguille	10
Figure I.6 : L’hydromètre flottant	10
Figure II.1 : Schéma général d’une installation de dessalement	15
Figure II.2 : Schéma général des différents procédés de dessalement	18
Figure II.3 : Distillation à simple effet	18
Figure II.4 : Distillation à effet multiple	19
Figure II.5 : Distillation avec compresseur de vapeur	19
Figure II.6 : Distillation à détente étagées	20
Figure II.7 : Cellule élémentaire d’électrodialyse	21
Figure II.8 : Principe des phénomènes d’osmose et d’osmose inverse	22
Figure II.9 : Module spirale.....	23
Figure II.10 :Structure des membranes d’osmose inverse	23
en polyamide thin film,	23
Figure II.11 : Récupération d’énergie par système à piston (échangeurs de pression)	24
Figure II.12 : Dessalement de l’eau dans les pays méditerranéens	29
Figure III.1 :Répartition de la consommation d'énergie sur une installation	33
Figure III.2 : Puits côtier en Espagne.	35
Figure III.3 : Etat initial du milieu (pas de rejet de saumure)	36
Figure III.4 : Etat du milieu après implantation de l'usine de dessalement.....	37
Figure IV.1 : Station de dessalement Cap Djinet	40
Figure IV.2 : Schéma générale de la station de dessalement	40
Figure IV.3 : Station de pompage de l’eau de mer.....	43
Figure IV.4 : étape de prétraitement chimique	45
Figure IV.5 : Filtres à sable et anthracite	46
Figure IV.6 : Filtres à cartouches	46
Figure IV.7 : Pompe à haute pression	47
Figure IV.8 : Tubes de pression	48
Figure IV.9 : Installation avec échangeur de pression.	48
Figure IV.10 : Emplacement des échangeurs de pression.....	49
Figure IV.11 : Constitution d’un système PX	49

Figure IV.12 : Principe de fonctionnement du système.....	50
Figure IV.13 : Pompes BOOSTER	51
Figure IV.14 : Bâtiment de la saumure	52
Figure IV.15 : Lits de calcite.....	53
Figure IV.16 : Sites de prélèvements	54
Figure IV.17 : Turbidimètre	55
Figure IV.18 : Multi-paramètres à sonde	56
Figure IV.19 : La hotte à filtre	57
Figure IV.20 : Colorimètre.....	59
Figure IV.21 : Titrage par la solution d'EDTA.....	60
Figure IV.22 : Spectrophotomètre DR 5000	62
Figure IV.23 : Boite LCK et le mode opératoire.....	63
Figure IV.24: Variations mensuelles de la teneur en Chlore libre	65
Figure IV.25: Variations mensuelles du titre hydrotimétrique	65
Figure IV.26: Variations mensuelles du Total des solides dissous.....	66
Figure IV.27: Variations mensuelles du potentiel hydrogène.....	66
Figure IV.28 : Variations mensuelles de la Conductivité électrique.....	67
Figure IV.29: Variations mensuelles de la dureté calcique.....	68
Figure IV.30: Variations mensuelles de la dureté magnésienne	68
Figure IV.31: Variations mensuelles de l'Alcalinité totale.....	69
Figure IV.32: Variations mensuelles du Titre alcalimétrique complet	69
Figure IV.33: Variations mensuelles de la teneur en Bore.....	70
Figure IV.34 : L'évolution des chlorures en fonction du temps	70
Figure IV.35: Variations mensuelles de la teneur en nitrites	71
Figure IV.36: Variations mensuelles de la teneur en nitrates.....	71
Figure IV.37: Variations mensuelles de la teneur en Sulfates	72
Figure IV.38: Variations mensuelles de la teneur en Sodium.....	72
Figure IV.39: Variations mensuelles de la teneur en Potassium.....	73
Figure IV.40: Variations mensuelles de la teneur en Fer	73
Figure IV.41 : Variations mensuelles du TDS pour l'eau de mer et la saumure	75
Figure IV.42: Variations mensuelles du PH de l'eau de mer et de la saumure.....	75
Figure IV.43 : Variations mensuelles de la conductivité de l'eau de mer et la saumure	76
Figure IV.44 : Variations mensuelles de la température de l'eau de mer et la saumure.....	76
Figure IV.45 : Variations mensuelles de la turbidité de l'eau de mer et la saumure	76
Figure IV.46: Variations mensuelles de la teneur en fer de l'eau de mer et la saumure	77

Figure IV.47 : Variations mensuelles de MES de l'eau de mer et la saumure.....	77
Figure IV.48 : Variations mensuelles des résidus secs	78
Figure IV.49 : Variations mensuelles du chlore total.....	78

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Concentrations des éléments principaux pour une eau de mer de salinité de 35‰	5
Tableau I.2 : Concentrations des différents éléments mineurs dont la concentration est supérieure à 1 µ g/l	5
Tableau I.3 : Salinité des eaux de mer.....	7
Tableau I.4 : Solubilités des sels dans l'eau pure (18°C) en g/l.	11
Tableau I.5 : Principaux effets associés aux métaux lourds	13
Tableau I.6 : Principales maladies d'origine hydrique et agents microbiologiques	14
Tableau II.1 : Avantages et inconvénients des procédés de dessalement d'eau de mer.....	25
Tableau II.2 : Comparaison entre les procédés membranaires.....	25
Tableau II.3 : Stations monoblocs	30
Tableau II.4 : Les grandes unités de dessalement.....	31
Tableau IV.1 : Caractéristiques des pompes de captage d'eau de mer	43
Tableau IV.2 : Caractéristiques des pompes à haute pression.....	47
Tableau IV.3 : Caractéristiques des pompes d'eau produite.....	53
Tableau IV.4 : Détermination de CO_3^{2-} et HCO_3^- à partir du TA et TAC.....	58
Tableau IV.5 : Code article et plage de mesure de chaque paramètre.....	63
Tableau IV.6 : Les concentrations des paramètres physico-chimiques des échantillons analysés	64
Tableau IV.7 : Les concentrations des paramètres chimiques des échantillons analysés	69
Tableau IV.8 : Les concentrations des paramètres chimiques et physico-chimiques de l'eau de mer et de la saumure.....	74

LISTE DES ABREVIATIONS

ADE:	Algérienne des eaux
ATC :	Automatic Temperature Compensation
dB (A) :	Décibel A (Unité de bruit)
DPD :	Diéthyl-p-Phénylène-Diamine
ED :	Electrodialyse
EDTA :	Acide éthylène diamine tétraacétique
HP:	Pompe à haute pression
MA :	Membrane Anionique
MC :	Membrane Cationique
MED :	Multi-Effet-Distillation (distillation à effet multiple)
MES:	Matières en suspension
MSF :	Multi-Stage-Flash distillation (distillation à détente étagées)
NET :	Noir d'Eriochrome T
NTU:	Nephelométric Turbidity Unit
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
P :	Pression
PH :	Potentiel d'hydrogène
Ptm :	Pression transmembranaire
ppm:	Partie par million
ppt :	Partie par trillion
PX:	Echangeur de pression
RO ou OI :	Reverse Osmosis ou Osmose inverse
S.G :	Specific Gravity = densité
T :	Température (°C)
TA :	Titre alcalimétrique
TAC :	Titre alcalimétrique complet
TDS :	Total des solides dissous
TH :	Titre hydrométrique
UCV :	Unités de couleur vraie

LES ANNEXES

Annexe 01 : La nature, la périodicité et les méthodes d'analyses (Norme Algérienne).....	83
Annexe 02 : Résultats d'analyse physico-chimique de l'eau produite.....	84
Annexe 03 : Résultats d'analyse physico-chimique de l'eau de mer.....	85
Annexe 04 : Les normes Algérienne de consommation en eau potable.....	86
Annexe 05 : Résultats d'analyse physico-chimique de la saumure.....	89

INTRODUCTION GENERALE

Une quantité équivalant à 97,5% du stock d'eau de la planète est salée et seule une fraction correspondant à 2,5 % se compose d'eau douce. Environ 70% de cette eau douce de la planète est fixée dans les calottes glaciaires des pôles et une partie importante des 30% restants est constituée par des nappes aquifères souterraines de régions reculées. En effet, seule une fraction minuscule de l'eau douce (moins de 1% de l'eau douce totale) est disponible dans les cours d'eau, les lacs et les réservoirs et est facilement accessible à l'homme pour son utilisation directe. En outre, la répartition spatiale et temporelle du stock et du débit d'eau douce est très inégale (UNEP, 2001).

Par suite de l'extension des régions arides et aussi de l'utilisation intensive d'eau dans les zones urbaines du monde entier, il est fréquent que l'eau douce ne soit pas disponible dans les quantités souhaitées. Selon une estimation de l'organisation mondiale de la santé (OMS), 1000 m³ par personne et par an sont le niveau repère au-dessous duquel on considère que la pénurie chronique d'eau entrave le développement et est préjudiciable à la santé humaine.

Les ressources en eau de la région méditerranéenne sont limitées, fragiles et menacées. Elles font déjà l'objet d'une exploitation intensive, notamment dans le Sud et à l'Est où la saison sèche se caractérise par sa longueur, avec une pluviométrie annuelle faible.

Des sécheresses temporaires qui peuvent être définies comme une pluviométrie inférieure à la moyenne d'une gravité variable par sa durée et son ampleur, ont occasionné un préjudice particulièrement important pour les ressources en eau. Au cours des dernières décennies, la plupart des pays méditerranéens ont connu des périodes de sécheresse prolongées notoires.

L'eau est un élément de la vie quotidienne, et elle est si familière qu'on oublie souvent son rôle, son importance et sa nécessité absolue. Sans l'eau, la terre ne serait qu'un astre mort, et aucune vie humaine, biologique, végétale ou animale n'existerait. Devant les besoins croissants en eau douce et l'impossibilité de se contenter des ressources naturelles, l'humanité est conduite à étudier et à développer divers procédés permettant d'obtenir une eau douce à partir des eaux de mer et des eaux saumâtres dans des conditions admissibles techniquement et économiquement.

Si l'expérience algérienne dans le domaine du dessalement remonte aux années soixante, c'est à partir de l'an 2000 et suite aux nombreux cycles de sécheresses sévères, que l'Algérie a intégré dans sa nouvelle politique de l'eau le dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres, comme moyen de mobilisation d'eau complémentaire, pour faire face aux différents plans de développement (UNEP, 2001).

Une étude du procédé de dessalement et les caractéristiques chimiques et physico-chimiques de l'eau potable traitée et dessalée par la station de dessalement de l'eau de mer de Cap Djinet a fait l'objet de ce travail. Cet objectif principal se décline en deux sous-objectifs qui définissent ces axes d'études.

- Une étude du procédé de dessalement dans la station de dessalement Cap Djinet.
- Une exploration des caractéristiques physico-chimiques selon les normes de l'OMS.

Le mémoire comporte quatre chapitres :

Le premier chapitre présente les propriétés de l'eau de mer, à savoir la salinité, la dureté, la turbidité,...etc.

Le deuxième chapitre comporte des généralités sur les différents procédés de dessalement utilisés en Algérie et dans le monde.

Dans le troisième chapitre, nous présenterons les impacts du dessalement sur l'environnement. Cette partie est destinée à caractériser les principaux effets du rejet de saumure des usines de dessalement sur le milieu marin, ainsi que sur la faune et la flore aquatique.

Le quatrième chapitre est réservé aux résultats et discussions. Il débute par la description du procédé de dessalement de la station Cap Djinet, suivi par la présentation du dispositif expérimental, la technique et les modes appliqués pour l'analyse. Enfin, les résultats obtenus lors des suivis expérimentaux seront discutés.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

Chapitre I

Propriétés de l'eau de mer

I-1 Introduction

L'eau douce ne représente que 2,5 % du volume total d'eau sur la planète. Elle est inégalement distribuée dans la mesure où certaines régions bénéficient d'excédents considérables, alors que de pénuries chaque année de plus en plus longue avec un taux de 1 000 m³ par personne et par an. Ces régions vulnérables, souvent situées dans les pays en voie de développement, sont d'autant plus exposées que la croissance rapide de la population crée, sur les ressources en eau, une pression supplémentaire (UNEP, 2001).

I-2 Sources d'eau

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

I-2.1 Eaux douces de surface

Leur volume total est très faible : il représente 0,18 millions de km³, soit 0,013 % de l'hydrosphère. Elles sont présentes dans les cours d'eau (ruisseaux, rivières, fleuves) et les lacs.

Elles sont très vulnérables à la pollution car elles reçoivent directement les eaux de ruissellement, c'est-à-dire les eaux de pluie ruisselant sur le sol, qui s'infiltrent dans le sol ou dans le sous-sol, ou qui rejoignent un cours d'eau.

a. Rivières et fleuves

En très 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 glissent sous les glaciers et émergent à leur pied : c'est le régime glaciaire.

Les autres cours d'eau proviennent du ruissellement des pluies excédentaires et/ou de l'émergence, sous la forme de sources, de nappes d'eaux souterraines : ce type de régime est dit pluvial.

Tous les cours d'eau descendent le long des pentes, se rejoignent pour former des rivières de plus en plus imposantes qui finissent par se jeter dans un océan ou une mer intérieure. Tout au long de leur périple, les cours d'eau sont aussi alimentés par les eaux de ruissellement et parfois par des eaux souterraines.

b. Lacs

Les lacs se forment lorsque les eaux qui coulent le long des pentes, cours d'eau ou eaux de ruissellement, rencontrent un obstacle qui les empêche de poursuivre leur course. Les eaux envahissent alors la dépression ainsi créée, formant des étendues parfois immenses, à tel point que certains grands lacs sont appelés des mers (par exemple, la mer Caspienne : 371 000 kilomètres carrés de superficie).

Les lacs sont alimentés par un cours d'eau ou par des eaux de ruissellement et dans certains cas par des eaux souterraines.

I-2.2 Eaux souterraines

Elles proviennent de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. Celles-ci s'insinuent par gravité dans les pores, les microfissures et les fissures des roches constituant le sous-sol, humidifiant des couches de plus en plus profondes, jusqu'à rencontrer une couche imperméable.

Là, les eaux s'accumulent, remplissant le moindre vide, saturant d'humidité le sous-sol, formant ainsi un réservoir d'eau souterraine appelé nappe. La roche plus ou moins poreuse et donc plus ou moins perméable contenant cette eau est appelée aquifère.

Les eaux souterraines constituant la nappe cheminant en sous-sol sur la couche imperméable, en suivant les pentes, parfois sur des dizaines voire des centaines de kilomètres, avant de ressortir à l'air libre, alimentant une source ou un cours d'eau nommés exutoires. Les nappes souterraines fournissent presque le tiers du débit total des cours d'eau de la planète, soit environ 12 000 kilomètres cubes d'eau par an.

Les aquifères représentent un réservoir d'eaux souterraines correspondant à un volume d'environ 8 millions de km³, soit 0,6 % de l'hydrosphère. Elles constituent notre principale ressource en eau douce (BAKALOWICZ, 1999).

I-2.3 Eaux de mer

La mer s'étend sur 71% environ de la surface du globe. L'hémisphère sud est le principal réservoir d'eau de mer. Dans l'hémisphère nord on trouve plusieurs mers salées qui communiquent pour certaines avec l'océan (mer Méditerranée, mer Baltique, etc...) On trouve 30 à 40 grammes de sels dissous pour un kilogramme d'eau de mer (MOULIN, 2004).

La répartition des terres et des mers est inégale et singulière. L'océan glacial arctique s'oppose au continent antarctique et la masse continentale Eurasie + Afrique s'oppose à l'océan Pacifique. En fait, toute saillie qui émerge au-dessus de la surface des océans a 19 chances sur 20 d'avoir un creux pour point diamétralement opposé.

Les masses terrestres sont en grande partie concentrées dans l'hémisphère nord. Hémisphère nord : 61% de mer, hémisphère sud : 81 % de mer. Cette disparité dans la répartition devient encore plus évidente si l'on place la Terre sur un axe Nord-Sud passant par l'Ouest de la France vers l'embouchure de la Vilaine et le Sud Est de la Nouvelle-Zélande. On a alors un hémisphère continental qui comprend 80% de la masse terrestre globale (*Figure I.1 et I.2*).

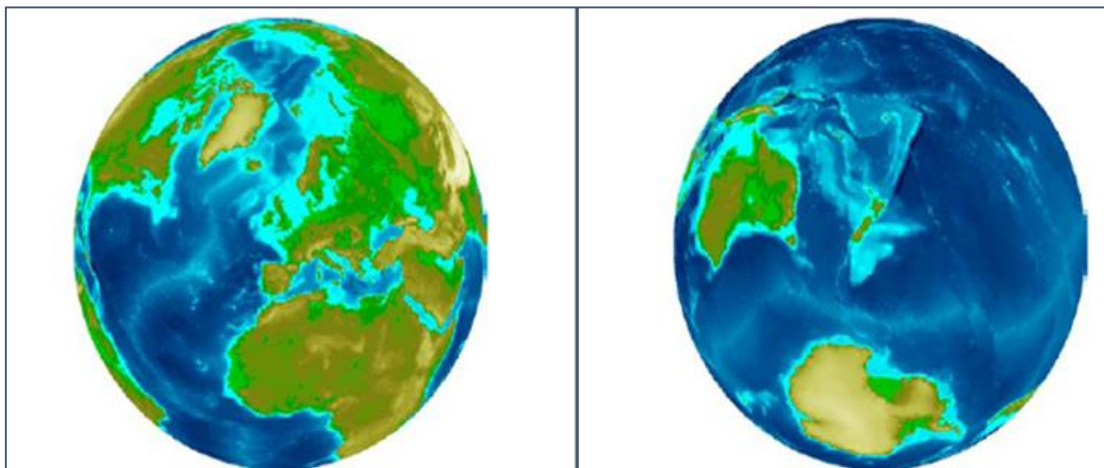


Figure I.1 : Hémisphère continental(Nord) Figure I.2 : Hémisphère maritime (Sud)
(Le CALVÉ, 2002).

I-3 Composition de l'eau de mer

I-3.1 Éléments principaux

Si la masse totale des sels dissous peut varier, le rapport des concentrations des différents éléments est stable. Cette constance des proportions est souvent appelée loi de *Marcet* ou de *Dittmar*. Les éléments principaux, c'est-à-dire ceux qui contribuent d'une façon notable à la masse de sels dissous dans les océans, représentent 11 éléments différents. Leurs concentrations sont données dans le tableau I.1 :

Tableau I.1 : Concentrations des éléments principaux pour une eau de mer de salinité de 35‰ (HENRI et KAMEL, 2008).

Eléments	Concentration (mg/kg)	Eléments	Concentration (mg/kg)
Chlorure (Cl ⁻)	19353	Sodium (Na ⁺)	10160
Sulfate (SO ₄ ²⁻)	2712	Magnésium (Mg ²⁺)	1249
Bicarbonate (HCO ₃ ⁻)	142	Calcium (Ca ²⁺)	413
Bromure (Br ⁻)	67	Potassium (K ⁺)	387
Fluorure (F ⁻)	1	Strontium (Sr ²⁺)	8
Bore	4		

I-3.2 Autres éléments minéraux

L'eau de mer contient de nombreux autres éléments à des concentrations beaucoup plus faibles (Tableau I.2). Ces éléments, malgré leur faible concentration, ont une importance certaine dans des processus biologiques et organiques. Ils peuvent se trouver sous différentes formes (dissous, colloïdaux ou en suspension).

Tableau I.2 : Concentrations des différents éléments mineurs dont la concentration est supérieure à 1 µg/l (HENRI et KAMEL, 2008).

Eléments	Concentration en µg/l	Eléments	Concentration en µg/l
Litium (Li)	170	Cuivre (Cu)	3
Aluminium (Al)	10	Zinc (Zn)	10
Silicium (Si)	3000	Arsenic (As)	3
Phosphate (P)	70	Rubidium (Rb)	120
Titan (Ti)	1	Molybdène (Mo)	10
Vanadium (V)	2	Iode (I)	60
Manganèse (Mn)	2	Barium (Ba)	30
Fer (Fe)	10	Uranium (U)	30

Un litre d'eau de mer contient entre 30 à 40g de sels alors que les matières en suspension représentent quelques dizaines de mg par litre. Ces particules peuvent être finement divisées

augmentant ainsi grandement les surfaces réactionnelles, ce qui peut avoir une importance notable sur les propriétés physico-chimiques de l'eau de mer.

I-3.3 Matières organiques

Les basses concentrations de matières organiques dans l'eau de mer rendent leur analyse chimique très compliquée. Les composés sont difficiles à isoler car dilués dans un milieu contenant beaucoup d'autres éléments à de plus fortes concentrations. Par convention, on sépare par filtration sur des filtres de 0,5µm les matières dissoutes des matières organiques particulaires.

Les matières organiques particulaires sont principalement constituées d'animaux et végétaux ou leurs résidus. Elles peuvent représenter de 10 à 60% de la matière en suspension.

I-4 Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer et des eaux saumâtres

Les principales caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer sont présentées comme suit :

I-4.1 Salinité

I-4.1.1 Notion de salinité

C'est le caractère essentiel de l'eau de mer. L'océan contient en moyenne 35 grammes de sel par kilogramme d'eau de mer. Si on considère le volume total de l'océan (1370 millions de km³) cela représente 48 millions de milliards de tonnes de sel, soit 95 tonnes par m² sur le globe entier.

La présence de sel dans l'eau modifie certaines de ses propriétés telles que la densité, la compressibilité, le point de congélation, la température du maximum de densité, alors que d'autres comme la viscosité, l'absorption de la lumière ne sont pas influencées de manière significative. Enfin certaines sont essentiellement déterminées par la quantité de sel dans l'eau (conductivité, pression osmotique).

Le chlorure de sodium (Na Cl) n'est qu'un des très nombreux sels composant l'eau de mer. On a décelé plusieurs corps simples existant à l'état naturel dans cette dernière. Certains n'ont peut-être pas encore été découverts, car ils existeraient en trop faible quantité (Le CALVÉ, 2002).

I-4.1.2 Définitions de la salinité

Il n'existe pas une mais plusieurs définitions de la salinité : une définition purement théorique et plusieurs définitions pratiques, liées aux méthodes de mesure.

Définition théorique :

La salinité est la quantité totale des résidus solides (en grammes) contenu dans 1 kg d'eau de mer, quand tous les carbonates ont été transformés en oxydes, le brome et l'iode remplacé par le chlore et que toute la matière organique a été oxydée.

Il est très difficile d'estimer la salinité par analyse chimique directe (séchage et pesée du résidu solide), car certains corps présents, notamment les chlorures, s'échappent au cours du dernier stade de séchage. On utilise le fait que, dans l'eau de mer, les proportions relatives des principaux constituants sont pratiquement constantes. Le dosage de l'un d'entre eux est donc

susceptible de donner la teneur de tous les autres, ainsi que la salinité. Les ions chlore, brome et iode peuvent aisément être dosés, avec précision, par titrage au nitrate d'argent (Le CALVÉ, 2002).

I-4.1.3 Salinité de l'eau de mer

La salinité des mers ouvertes sur les masses océaniques (Atlantique, Manche, Mer du Nord, Pacifique) est de l'ordre de 35 g/l et c'est cette valeur qui est considérée comme salinité standard de l'eau de mer. Des variations plus ou moins importantes autour de cette valeur moyenne existent en fonction du bilan précipitations– évaporations. La salinité peut être très différente dans le cas des mers fermées ou peu ouvertes sur les masses océaniques (Tableau I.3) :

Tableau I.3 : Salinité des eaux de mer

Mer	Salinité en g/l
Mer Méditerranée	36 à 39
Mer Rouge	~ 40
Mer Baltique	7
Mer Caspienne	13
Mer Morte	270
Golfe Arabo–Persique	40 à 70
Mer Noire	20

Toutefois, dans le cas des mers ouvertes, la proportion des différents sels en présence est relativement constante. En particulier, la somme des ions chlorures et sodium représente environ 85 % du poids total des sels. Par contre, dans les mers fermées ou les grands lacs salés, la concentration par évaporation à partir d'apports d'eaux de surface faiblement salées mais relativement différentes de celle de l'eau de mer, conduit quelquefois à des compositions ioniques très particulières (HAMANI,2013).

I-4.1.4 Sels minéraux

Un sel est composé d'un cation (métal) et d'un anion.

Exemples :

NaCl	Chlorure de Sodium
CaSO ₄	Sulfate de Calcium
CaCO ₃	Carbonate de Calcium
MgCl ₂	Chlorure de Magnésium
NaNO ₃	Nitrate de Sodium
CaF ₂	Fluorure de Calcium
BaSO ₄	Sulfate de Baryum
SrSO ₄	Sulfate de Strontium

Les sels minéraux sont les constituants qui restent (sous forme de cendres) après calcination des tissus organiques.

Les sels minéraux sont essentiels à l'organisme, notamment parce qu'ils :

- Contrôlent l'équilibre hydrique (pression osmotique) ;
- Règlent l'équilibre acide-base (pH) ;
- Font partie de certaines structures (os, dents) ;
- Catalysent de nombreuses réactions du métabolisme.

I-4.1.5 Origine de la salinité

La salinité de mer provient de l'action des eaux de ruissellement et des eaux souterraines sur la croûte continentale. Les ions (Na^+ , Cl^- , ...) apportés par les rivières se concentrent dans l'eau de mer car ces éléments sont peu réactifs avec les particules et les minéraux marins. La salinité de l'océan ne varie presque plus avec le temps car les apports (ruissellement) et les départs (sédimentation et altération) de sels s'équilibrent.

Il y a une autre source de salinité des eaux souterraines qui représente un problème actuel : c'est l'intrusion marine, c'est-à-dire le retour des eaux de mer vers les nappes qui se trouvent sur le littoral après l'abaissement de niveaux de ces nappes causé par la surexploitation (HAMANI, 2013).

I-4.1.6 Salinité des eaux saumâtres

Généralement on appelle eau saumâtre une eau saline non potable, de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. En fait, la plupart des eaux saumâtres ont une salinité comprise entre 1 et 10 g/l. Elles se présentent soit, sous forme d'eau de surface, soit sous forme d'eaux souterraines.

Leur composition chimique varie énormément d'une région à l'autre et pour une même région d'une saison à l'autre. Ces variations de composition chimique dépendent de plusieurs paramètres : l'eau qui pénètre dans le sol dissout les sels qui composent l'écorce terrestre.

Les principaux sels qui peuvent être dissous en assez grandes quantités sont le CaCO_3 et le NaCl . Indépendamment de la composition chimique et de la structure physique des roches, d'autres facteurs interviennent également parmi lesquels nous citerons :

- La vitesse de circulation de l'eau et par conséquent le temps de contact ;
- Les matières déjà dissoutes (la solubilité variant avec la force ionique) : ainsi des eaux chlorurées et gypseuses peuvent contenir en solution des quantités de sulfate de calcium supérieures à la solubilité du sulfate de calcium dans l'eau pure (Cas des eaux souterraines au Qatar) ;
- Le phénomène d'évaporation (évaporation directe ou évapotranspiration), paramètre principalement lié aux conditions climatiques mais aussi à la profondeur du niveau piézométrique des nappes souterraines (influence des irrigations) (HAMANI, 2013).

I-4.1.7 Mesure de la salinité

Il existe plusieurs méthodes pour mesurer la salinité. A titre d'exemple, on citera la réfractométrie.

Il s'agit d'utiliser un appareil qui mesure l'indice de réfraction d'une gouttelette d'eau posée sur sa vitre (Figure I.3)

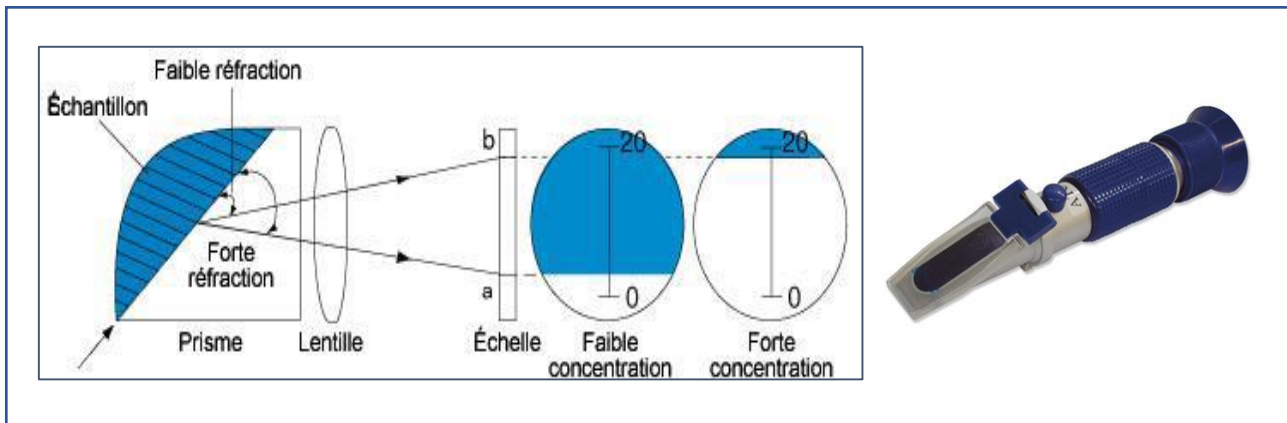


Figure I.3 : Le réfractomètre (HERVÉ, 2014).

Puisque l'indice de réfraction dépend de la température, la plupart des appareils dédiés à l'aquariophilie effectuent une correction dite ATC qui, dans une plage de l'ordre de 20 à 30°C permet d'afficher directement la salinité en ppt ou en ‰ (pour mille) (HERVÉ, 2014).

La plupart d'entre eux affiche aussi la densité qu'aurait l'échantillon à une certaine température, souvent à 20°C comme l'indique l'indication d_{20}^{20} dans l'exemple ci-dessous à gauche, ou précise S.G à 20°C comme à droite (Figure I.4).

Puisque la densité dépend de la température ; par exemple sur l'image de gauche la densité = 1,0145 à 20°C ; à 25°C elle atteindrait 1,0188 ; on voit que cette différence est négligeable.

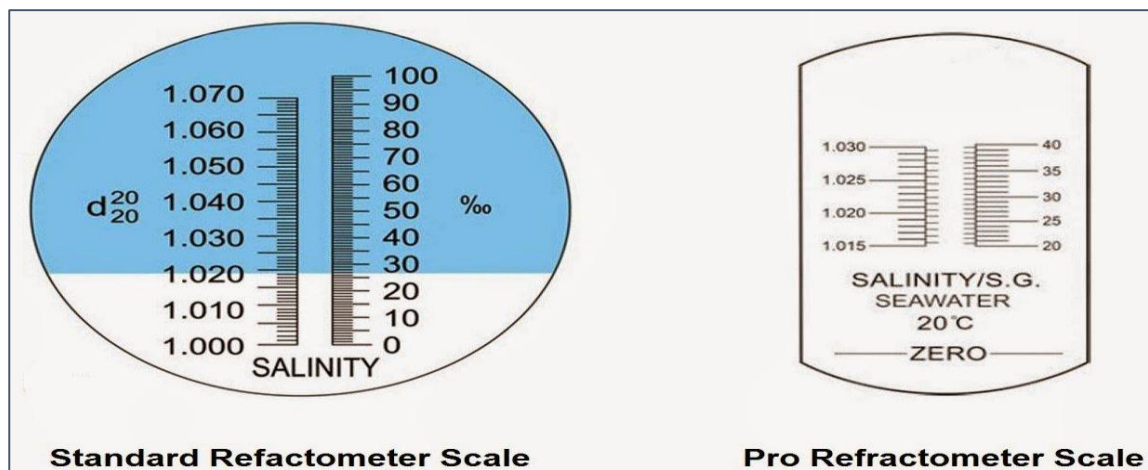


Figure I.4 : Refractomètre standard et pro refractomètre (HERVÉ, 2014).

I-4.2 Densité

Rapport de la masse volumique de l'eau de mer à celle de l'eau distillée à une température de 4°C. La densité des océans est en moyenne de l'ordre de 1,035 à 1,036. Elle varie avec la salinité, la température et la pression. La densité est mesurée par :

- Le densimètre ou hydromètre à flotteur

Il en existe de 2 types :

1. L'hydromètre à aiguille

Présente l'avantage d'être bon marché et facile à utiliser mais a la mauvaise réputation d'être peu précis à cause des frottements des paliers de l'aiguille notamment en raison des concrétions de sel dont ils peuvent faire l'objet (*Figure I.5*).

Il comporte souvent une échelle de densité (Specific Gravity) et en ppt à une température donnée (HERVÉ, 2014).



Figure I.5 : L'hydromètre à aiguille (HERVÉ, 2014).

2. L'hydromètre flottant

Consiste en un cylindre creux, lesté et gradué, qui s'enfonce plus ou moins dans le liquide à mesurer selon sa densité.

Il comporte aussi parfois un thermomètre comme sur l'image ci-contre (*Figure I.6*).

On lit directement la densité du liquide dans lequel il est plongé 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 (HERVÉ, 2014).



Figure I.6 : L'hydromètre flottant (HERVÉ, 2014).

I-4.3 Solubilité

La solubilité d'un composé ionique ou moléculaire, appelé soluté, est la quantité maximale de moles de ce composé que l'on peut dissoudre ou dissocier, à une température donnée, dans un litre de solvant. La solution ainsi obtenue est saturée.

Tableau I.4 : Solubilités des sels dans l'eau pure (18°C) en g/l (HENRI, 2008).

Elément	Na	Ca	Mg	K	Ba	Sr
Cl	360	730	560	330	370	510
SO ₄	170	2	350	110	0,002	0,11
NO ₃	840	1220	740	300	90	70
CO ₃	190	0,013	1	1080	0,02	0,011
F	45	0,016	0,076	930	1,6	0,1

- Les sels de Sodium Cl, SO₄, NO₃, et F sont très bien solubles.
- Les Nitrates Na, Ca, Mg, K, Ba et Sr sont très bien solubles.
- Les sels de Calcium et Strontium SO₄, CO₃, et du F ont une solubilité très limitée.
- Les carbonates ont aussi une solubilité très limitée pour les Ca, Mg, K, Ba et Sr.

Les sels ayant une solubilité basse peuvent causer l'entartrage dans les stations d'osmose inverse provoqué par la précipitation (HENRI,2008).

I-4.4 Température

L'eau de mer est, en général, plus ou moins froide suivant la latitude. Chaude à l'Équateur (26°C en surface dans l'océan, plus de 30°C dans les mers intérieures l'été), froide aux pôles (1 à 3°C) en surface. L'océan Indien à latitude égale est plus chaud que l'Atlantique. A la même latitude dans un même océan les températures sont différentes.

Dans l'hémisphère Sud le phénomène est inverse : ce sont les façades Ouest des continents qui sont plus froides que les côtes Est. Les différences de température sont également importantes suivant les profondeurs.

Les couches superficielles de la mer peuvent être réchauffées ou refroidies par l'air ambiant. Dans les régions polaires, la température des eaux est plus basse au pôle Sud qu'au pôle Nord.

Les échanges thermiques entre la surface de l'eau de mer et l'atmosphère sont très importants : le climat est influencé par la température de l'eau de mer. Les océans se réchauffent moins vite et se refroidissent moins vite également que la terre. Pour cette raison, les régions qui bordent l'océan jouissent d'un climat océanique, plus tempéré (doux et humide) (MOULIN, 2004).

I-4.5 PH

L'eau de mer faiblement alcaline et son PH moyen est de 8,2 avec des variations entre 7 et 8,4.

Les variations de PH ont une certaine analogie avec celle d'oxygène dissous. Ceci s'explique en considérant l'activité synthétique de certains organismes : une forte production d'oxygène s'accompagne d'une diminution de la teneur en CO₂ et par conséquent d'une

augmentation du PH ; l'oxydation de la matière organique diminue la teneur en oxygène de l'eau en produisant du CO_2 et par conséquent abaisse le PH.

Dans certaines conditions le PH peut prendre des valeurs particulières. Notamment dans les bassins isolés où il peut y avoir production d' H_2S . Le PH peut approcher des valeurs voisines de 7 ou tomber à des valeurs nettement plus acides.

Le PH des eaux de mer décroît avec une augmentation de température. Pour une eau chlorinité de 19,5‰ et de $\text{pH}=8$, une élévation de température de 1°C , entre 10°C et 20°C , diminue le pH de 0,0109.

De même, une augmentation de pression de 100 bars produit une diminution du pH de l'ordre de 0,02 (HABET, 2012).

I-4.6 Dureté

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^{++} et Mg^{++} . 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 déterminées :

- *La dureté totale* ou titre hydrotimétrique *TH* qui est la somme des concentrations calcique et magnésienne ;
- *La dureté calcique* qui correspond à la teneur globale en sels de calcium ;
- *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 (ATALLAH, 2014).

I-4.7 Matières en suspension

Les matières en suspension, représentent l'ensemble des particules minérales et organiques contenues dans les eaux. Elles sont fonction de la nature des terrains traversés, de la saison, de la pluviométrie, du régime d'écoulement des eaux, de la nature des rejets, etc.

Les teneurs élevées en matières en suspension peuvent être considérées comme une forme de pollution (ATALLAH, 2014).

I-4.8 Conductivité électrique

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques (Platine) de 1cm^2 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 donne une idée de la minéralisation d'une eau et est à ce titre un bon marqueur de l'origine d'une eau (ATALLAH, 2014).

I-5 Paramètres organoleptiques

Les différents paramètres organoleptiques se traduisent comme suit :

I-5.1 Couleur

Pour l'eau potable, le degré de couleur maximale acceptable est de 15 UCV. Elle peut être due à certaines impuretés minérales (fer) mais également à certaines matières organiques acides. Elle doit être éliminée pour rendre l'eau agréable à boire (ALPHA, 2005).

I-5.2 Goûts et odeurs

Les eaux de consommation doivent posséder un goût et une odeur agréable. La plupart des eaux, qu'elles soient ou non traitées, dégagent une odeur plus ou moins perceptible et ont une certaine saveur. Ces deux propriétés, purement organoleptiques, sont extrêmement subjectives et il n'existe aucun appareil pour les mesurer. Selon les physiologistes, il n'existe que quatre saveurs fondamentales : salée, sucrée, aigre et amère (MONIQUE, 1991).

I-5.3 Turbidité

La turbidité d'une eau est due à la présence des particules en suspension, notamment colloïdales : argiles, limons, grains de silice, matières organiques, la pluviométrie joue un rôle important vis-à-vis de ce paramètre dans les eaux superficielles et souterraines selon leur origine (SAVARY, 2010).

I-6 Pollution des eaux par les métaux lourds

La pollution des eaux se fait par des métaux lourds souvent sous forme de traces, 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. Les principaux effets associés aux éléments ci-dessus sont présentés au tableau I.5 :

Tableau I.5 : Principaux effets associés aux métaux lourds

ELEMENT	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-7 Paramètres microbiologiques

Le risque microbiologique d'origine hydrique (ou risque infectieux) correspond à la présence dans l'eau de microorganismes pathogènes, ou potentiellement pathogènes (opportunistes) et ce en quantité supérieure au seuil d'infection fixé par l'OMS. Parmi ces microorganismes, on distingue les virus, les bactéries et les protozoaires.

Le risque microbiologique provient donc du pouvoir pathogène de ces germes qui est conditionné par les propriétés de l'agent infectieux. Il convient de préciser que la mise en œuvre de procédés élémentaires de désinfection telle que la chloration de l'eau, permet d'éradiquer

totale des fléaux (*Tableau I.6*) tels que le choléra, la dysenterie bacillaire ou les fièvres typhoïdes et paratyphoïdes (LEBLEU, 2007).

Tableau I.6 : Principales maladies d'origine hydrique et agents microbiologiques

responsables d'après (HASLAY et LECLERC, 1993) .

Origine	Maladies	Agents pathogènes
Parasitaire	Dysenterie amibienne	Entamoeba histolyca
	Gastro-enterites	Giardia lamblia Cryptosporidium parvum
Bactérienne	Fievestyphoïde et paratyphoïde	Salmonella typhi Salmonella paratyphi A et B
	Dysenterie bacillaire	Shigella
	Cholera	Vibrio cholerae
	Gastro-enterites	Escherichia coli enterotoxinogène Campylobacter jejuni Yersinia enterocolitica
Virale	Hépatites A et E	Virus hépatite A et E
	Poliomyélite	Virus poliomyélique
	Gastro-enterites	Rotavirus Enterovirus Calicivirus Adenovirus...

I-8 Conclusion

Le recours au dessalement de l'eau de mer constitue une solution urgente pour satisfaire l'alimentation en eau des villes côtières surpeuplées. Ces dernières années la consommation en eau est toujours croissante, pour pallier à cette demande en ressources hydriques engendrée par la situation de sécheresse répétée qu'a connue le monde pendant les dix dernières années. Le choix de réaliser des stations de dessalement d'eau de mer pour alimenter les populations des villes côtières en eau potable est une solution judicieuse.

Chapitre II

Généralités sur le dessalement de l'eau de mer

II-1 Introduction

Le dessalement appelé aussi dessalage consiste à séparer l'eau et les sels à partir d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau saumâtre d'origine continentale (DUNGLAS, 2014).

L'évaporation ou distillation constituait le fondement de la technologie des premières installations de dessalement à grande échelle qui apparurent dans les années 50 et 60, principalement au Moyen-Orient. Ces régions, pauvres en eau mais riches en combustible, convertissaient leurs ressources énergétiques en ce qui leur manquait le plus : de l'eau.

Cependant, les technologies qui emploient la chaleur requièrent de grandes quantités d'énergie.

II-2 Schéma général d'une installation de dessalement

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

On appelle taux de conversion le rapport de la quantité d'eau douce produite par rapport à la quantité d'eau saline pompée (MAUREL, 2006).

Nous présentons ci-dessous le processus de dessalement d'eau de mer dans le cas où le procédé utilisé est l'Osmose inverse (*Figure II.1*) :

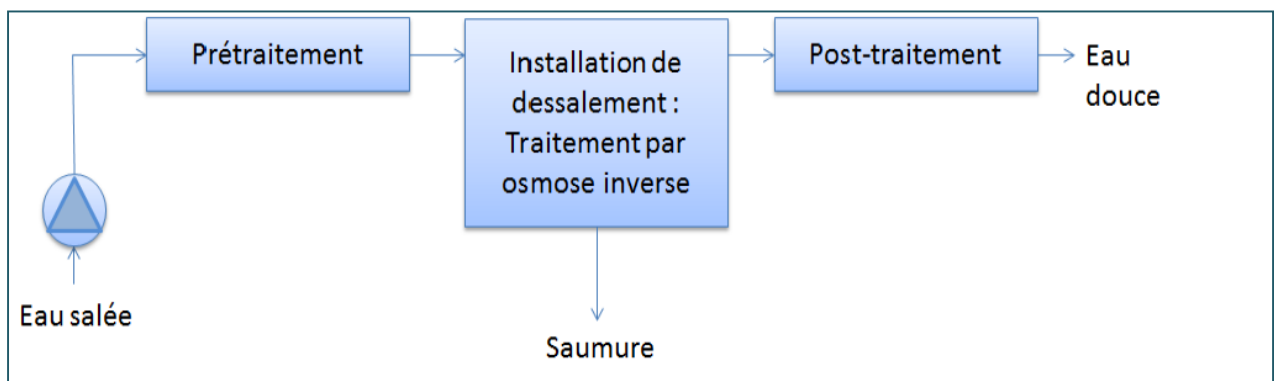


Figure II.1 : Schéma général d'une installation de dessalement (MAUREL, 2006)

II-2.1 Captation d'eau de mer

Consiste à pomper l'eau de mer vers la station de dessalement, cette eau doit être bonne du point de vue matières en suspension. Deux types de technologies sont utilisés dans cette étape :

- *Les forages côtiers* : soit verticaux soit sous forme de galeries horizontales permettant d'obtenir une eau de très bonne qualité et relativement stable.

- *La prise d'eau de surface* : peut être faite en pleine mer. Dans le cas idéal, le captage doit être effectué en zone profonde, éloigné de la côte, protégé des pollutions et des forts courants (MAUREL, 2006).

II-2.2 Prétraitement

Le prétraitement de l'eau de mer avant osmose inverse est absolument nécessaire car ces membranes sont très sensibles au colmatage et une bonne qualité de l'eau en entrée des modules d'osmose inverse est indispensable pour assurer des performances stables de ce procédé sur le long terme. Les procédés de prétraitement peuvent être divisés en deux catégories : les prétraitements physico-chimiques et les prétraitements chimiques.

- *Les prétraitements physico-chimiques* : incluent les préfiltres mécaniques, la clarification (coagulation-floculation), la décantation, la filtration et la microfiltration.
- *Le prétraitement chimique* : consiste en l'addition d'inhibiteurs d'entartrage, de désinfectants et acidification et injection de séquestrant (TANSAKUL, 2009).

II-2.2.1 Prétraitements physico-chimiques

a. Filtration mécanique

Pour une alimentation par prise directe en mer, il convient d'éliminer toutes les matières grossières avant qu'elles ne pénètrent dans le système. Pour ce faire, la conduite de prise en mer doit être équipée d'une crépine.

Pour ne pas avoir à nettoyer manuellement les crépines, il est préférable de choisir des crépines à fentes, obtenues par enroulement d'un fil de section triangulaire, dont l'angle est orienté vers l'intérieur de la crépine, dans le sens de la filtration, ce qui les rend peu sensibles au colmatage.

b. Coagulation-floculation

La coagulation permet de favoriser l'agglomération des colloïdes en diminuant les forces de répulsion électrostatique (liées aux charges superficielles). La floculation consiste à agglomérer ces particules en micro flocs puis en flocs plus volumineux décantables. Les substances les plus couramment utilisées sont :

- *pour la coagulation* : la chaux, l'alun, le sulfate ferrique et le chlorure ferrique,
- *pour la floculation* : les polymères organiques à longues chaînes de masse molaire élevée (BRGM, 2010).

c. Filtration

La filtration est un procédé physique destiné à clarifier un liquide qui contient des MES en les faisant passer à travers un milieu poreux. Les solides en suspension ainsi retenus par le milieu poreux s'accumulent, il faut donc nettoyer le milieu de façon continue ou de façon intermittente. La filtration, habituellement procédé suivant les traitements de coagulation-floculation et décantation, permet d'obtenir une bonne élimination des bactéries, de la turbidité et de certains goûts et odeurs (CASTAING, 2011).

d. Microfiltration

La microfiltration consiste à éliminer d'un fluide les espèces dont les dimensions sont comprises entre 0,05 à 10µm. Les espèces sous la forme de solutés ou de particules sont retenues à la surface de la membrane par effet d'exclusion.

Les membranes les plus utilisées sont poreuses en polyamides ou polypropylène, ou encore inorganiques (en oxyde métallique ou céramique). La pression transmembranaire varie environ de 0,05 à 3 bars. La microfiltration se prête non seulement à la séparation solide-liquide mais aussi liquide-liquide des émulsions d'huile dans l'eau (HADJALI, 2012).

II-2.2.2 Prétraitements chimiques

Les prétraitements chimiques de l'eau d'alimentation du système d'OI ont pour but essentiel de protéger efficacement les membranes contre l'entartrage et le colmatage respectivement par précipitation et dépôts de sels et les matières biologiques.

a. Acidification et injection de séquestrant

L'acidification et l'injection de séquestrant (c'est un produit qui retient dans un milieu une substance fermée) ont pour but d'éviter la précipitation des sels normalement dissous dans la zone alimentaire/concentration des éléments d'OI. Si leur concentration dépasse leur produit de solubilité. Mais il peut apparaître des précipitations ponctuelles même si le produit de solubilité n'a pas été atteint en prenant en considération le système membranaire complet, car à certains endroits la valeur du facteur de conversion peut être très élevée, comme par exemple dans les irrégularités de la surface des membranes.

C'est pour cette raison qu'une marge de sécurité doit être prise. Ainsi, il est à envisager toujours un conditionnement chimique de l'eau d'alimentation pour que la concentration des sels concernés soit au maximum égale à 70% de leur solubilité maximales (HADJALI, 2012).

Pour conditionner chimiquement l'eau afin d'éviter les phénomènes d'entartrage, il est utilisé soit :

- Un acide (acide sulfurique, acide chlorhydrique) qui empêchera la précipitation du carbonate de calcium,
- Un séquestrant, pour les autres sels (sulfate de calcium, sulfate de strontium...etc.),
- Une combinaison de deux produits.

b. Désinfection

Le but de la désinfection est d'éliminer tous les micro-organismes pathogènes présents dans l'eau, afin d'empêcher le développement de maladies hydriques. Le principe de la désinfection est de mettre en contact un désinfectant à une certaine concentration pendant un certain temps avec une eau supposée contaminée. Cette définition fait apparaître trois notions importantes : les désinfectants, le temps de contact et la concentration en désinfectant. Les trois principaux désinfectants utilisés en eau potable sont les suivants : le chlore, l'ozone et le rayonnement par l'ultraviolet.

II-2.3 Différents procédés de dessalement

La totalité des installations actuellement en service fait appel à deux grandes familles de procédés : les procédés de distillation (par évaporation) et les procédés de séparation par membranes qui sont plus récents (*Figure II.2*).

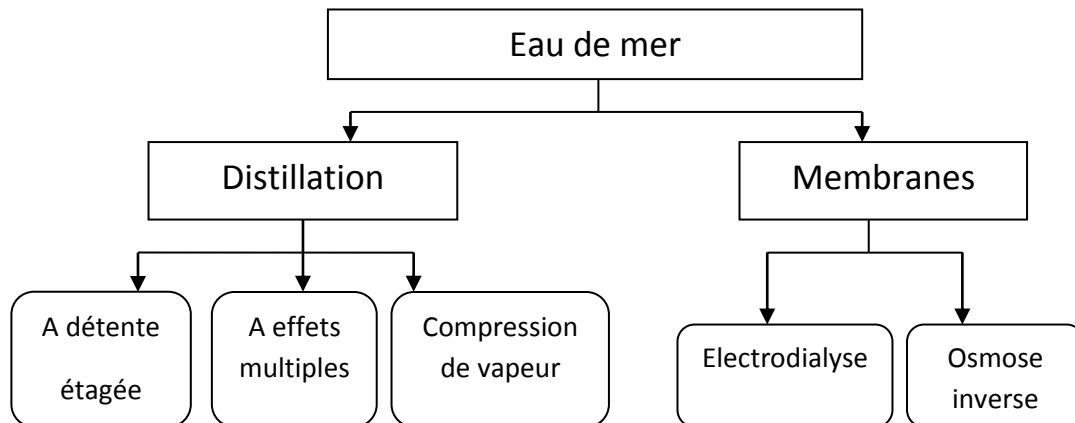


Figure II.2 : Schéma général des différents procédés de dessalement (SALOMON, 2012)

II-2.3.1 Procédés de distillation

L'eau de mer chauffée émet une vapeur d'eau pure qu'il suffit de condenser pour obtenir de l'eau douce. Ce principe de dessalement très simple est utilisé depuis longtemps.

On distingue essentiellement plusieurs techniques de distillation dont on cite :

II-2.3.1.1 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. 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.3*). La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide. Un éjecteur (ou une pompe) évacue les gaz incondensables.

Un groupe électropompe soutire l'eau condensée ; un deuxième, l'eau de mer concentrée ou saumure (DANIS, 2003).

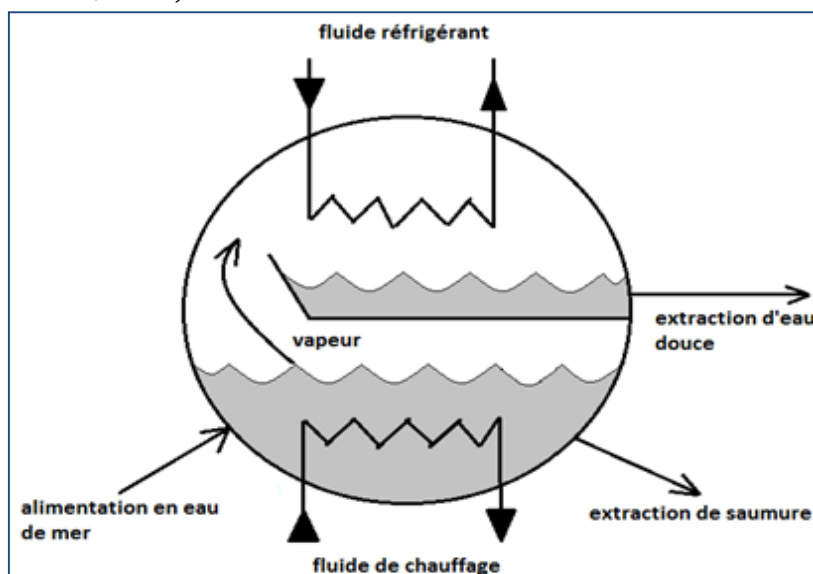


Figure II.3 : Distillation à simple effet (MAUREL, 2006)

II-2.3.1.2 Distillation à effet multiple

Une installation de distillation à effet multiple est constituée par la juxtaposition de n cellules fonctionnant selon le principe de l'effet simple (Figure II.4). Le fluide de réchauffage porte à l'ébullition l'eau de mer admise dans la première cellule, 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 (BOULNOUAR, 2014).

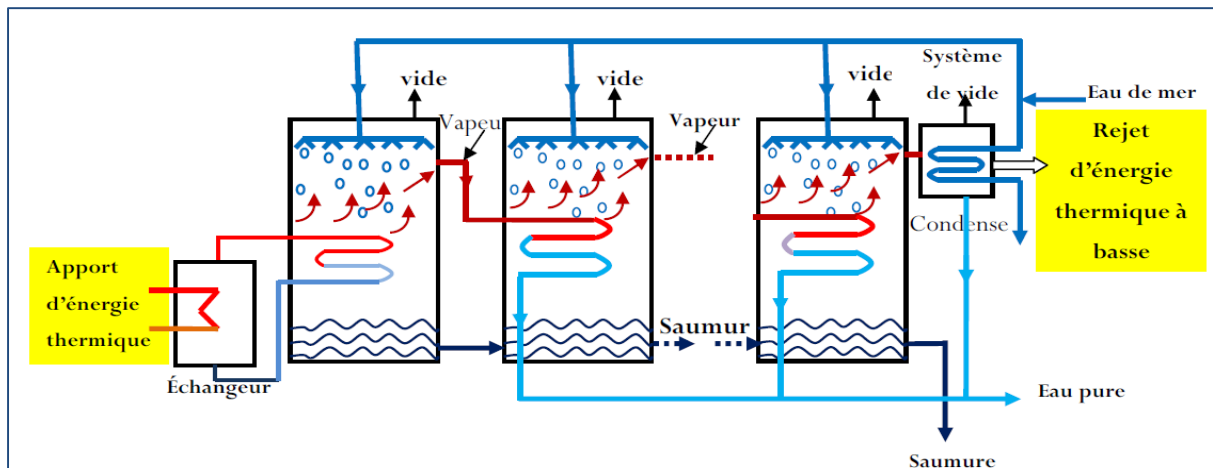


Figure II.4 : Distillation à effet multiple (RENAUDIN, 2003)

II-2.3.1.3 Distillation avec compresseur de vapeur

L'eau salée arrive dans un évaporateur, où elle se vaporise aux environs de 100°C grâce à un serpentin auxiliaire de vapeur qui est ensuite mis hors circuit (Figure II.5). La vapeur d'eau à la pression atmosphérique et vers 100°C est alors aspirée par un compresseur qui la porte à une pression relative de l'ordre de 0,2 bar, avec une surchauffe de l'ordre de seulement 6°C , la vapeur surchauffée passe ensuite dans le serpentin principal de l'évaporateur où elle se condense.

Parmi les avantages de la thermo compression c'est son haut rendement, on peut retirer environ $0,8 \text{ m}^3$ d'eau douce de 1 m^3 d'eau brute (BECHKI, 2011).

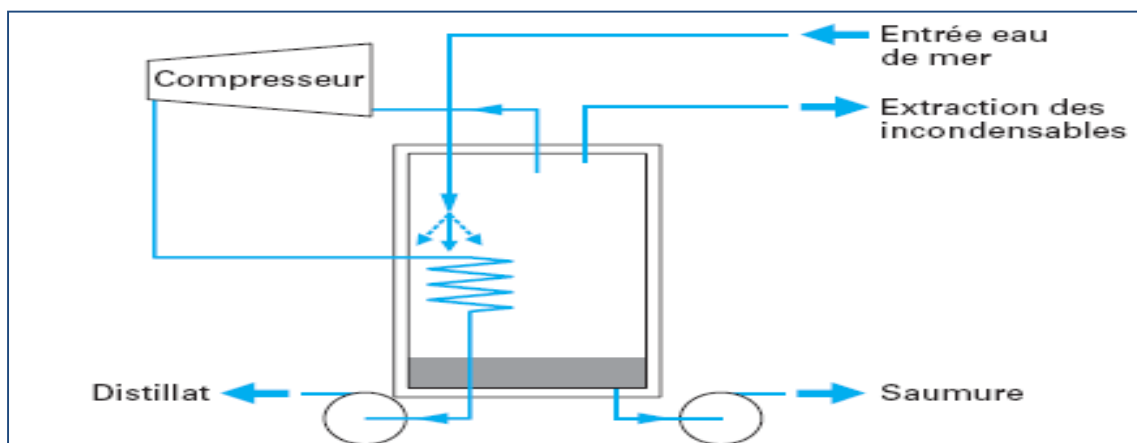


Figure II.5 : Distillation avec compresseur de vapeur (DANIS, 2003)

II-2.3.1.4 Distillation par détente successive ou procédé 'Flash'

Consiste à mettre une enceinte sous vide, isolée et ne contenant que de l'eau de mer. On la maintient en équilibre avec sa vapeur à une température « T » et une pression « P » (Figure II.6). Lorsque de l'eau chaude est introduite dans l'enceinte, et que P est inférieure à la pression de saturation, on observe une vaporisation instantanée par détente. La chaleur de la vapeur est transférée à l'eau froide circulant dans les tubes de condenseur. Elle est alors condensée sur un faisceau tubulaire situé dans la partie supérieure de l'enceinte. On peut alors récupérer l'eau distillée pure (HADJALI, 2012).

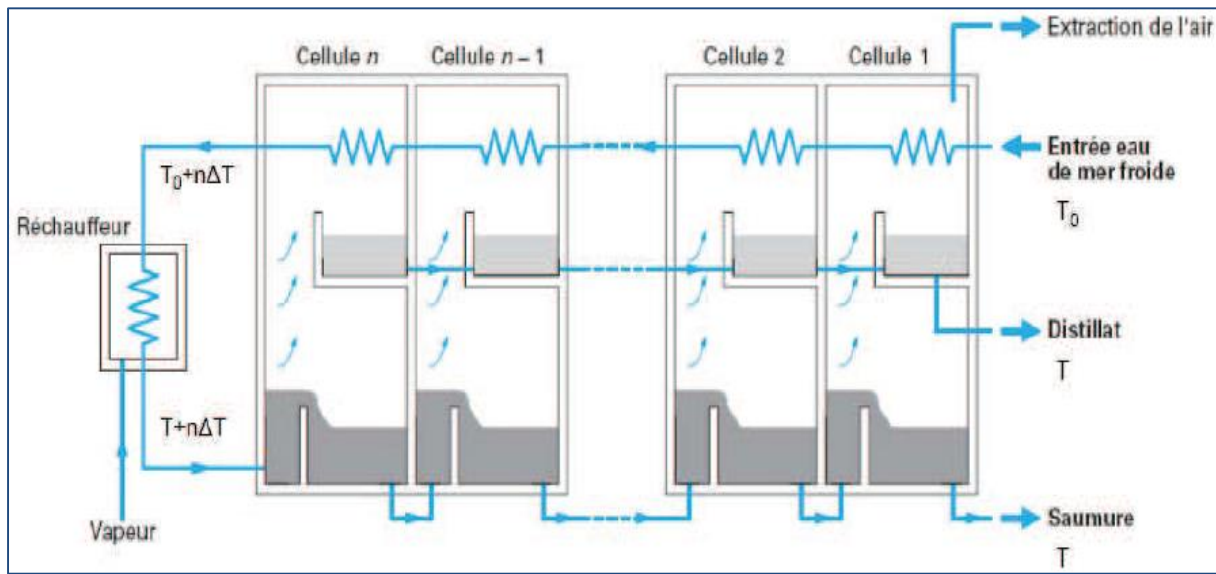


Figure II.6 : Distillation à détente étagées (DANIS, 2003)

II-2.3.2 Procédés membranaires

Au lieu d'extraire par évaporation l'eau douce de l'eau de mer, on peut envisager une séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes sélectives. Deux procédés utilisant de telles membranes sont actuellement commercialisés. Ce sont l'électrodialyse et l'osmose inverse.

Une membrane est une interface physique, de faible épaisseur, qui contrôle le transfert d'espèces chimiques entre les deux milieux qu'elle sépare. Cette interface peut être homogène au niveau moléculaire, uniforme en composition et structure, ou elle peut être chimiquement et physiquement hétérogène, contenant des pores de dimension finie ou contenant des couches superposées. Les membranes se présentent sous forme de film plans (feuilles), spirale, tubes ou fibres creuses, elles sont mise en œuvre dans des modules regroupant un ou plusieurs éléments de base (ARZATE, 2008).

II-2.3.2.1 Electrodialyse

Dans un système d'ED illustré dans la (Figure II.7), les membranes sont disposées l'une à côté de l'autre, enformant des compartiments où un ou plusieurs liquides vont circuler.

Du point de vue électrique, un électrodialyseur est composé de plusieurs compartiments alimentés en série, alors que du point de vue hydraulique, l'alimentation est faite en parallèle. Lorsque le procédé est démarré, le transfert d'ions donne lieu à des changements de nature ou de

concentration des électrolytes qui composent les milieux traités. L'effet du procédé dépend des membranes utilisées et de la configuration des compartiments d'ED :

On distingue trois types d'électrodialyse :

- L'électrodialyse dite conventionnelle (ED)
- L'électrodialyse à membrane bipolaire (EDMB)
- L'électrolyse à membranes (EM)

Le point commun de ces techniques est la mise en œuvre de membranes échangeuses d'ions permettant de transférer des ions de façon sélective sous l'effet d'un champ électrique.

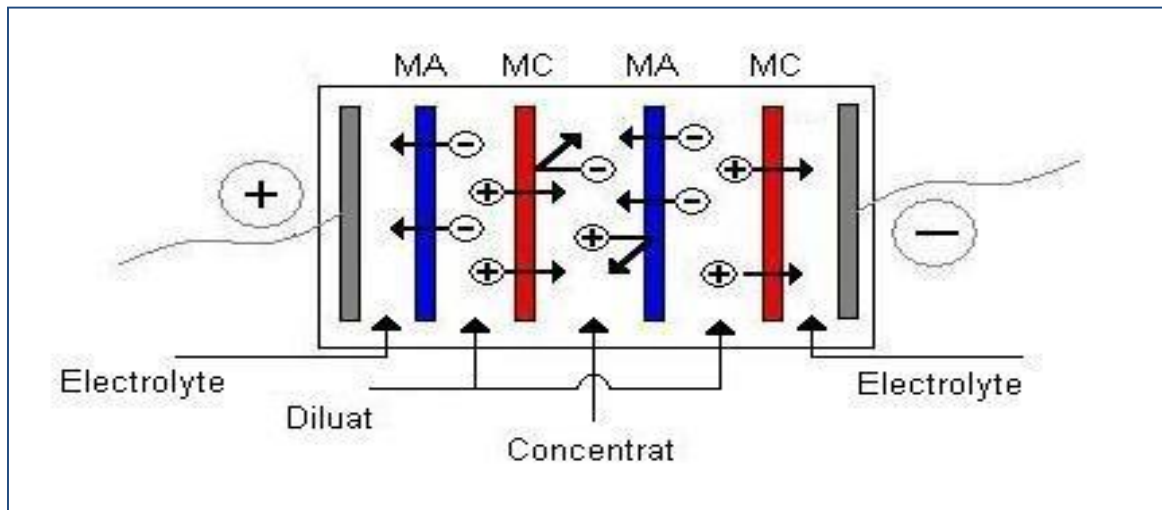


Figure II.7 : Cellule élémentaire d'électrodialyse (HAMANI, 2013)

II-2.3.2.2 Osmose Inverse

L'osmose inverse est un procédé de filtration tangentielle qui permet l'extraction d'un solvant, le plus souvent l'eau, par perméation sélective à travers une membrane dense sous l'action d'un gradient de pression. Elle s'oppose au phénomène naturel d'osmose qui tend à transférer le solvant d'une solution diluée vers une solution concentrée mises en contact par une membrane sélective sous l'action du gradient de concentration (Figure II.8).

Lorsqu'une pression est appliquée sur le compartiment le plus concentré, le flux de solvant diminue jusqu'à s'annuler pour une pression égale à la pression osmotique de la solution.

Lorsque la pression appliquée est supérieure à cette pression osmotique, le flux s'inverse c'est le phénomène d'osmose inverse. La pression efficace correspond donc à la pression de part et d'autre de la membrane (pression transmembranaire, P_{tm}) diminuée de la différence de pression osmotique ($\Delta \Pi$) de part et d'autre de la membrane (SAGNE, 2008).

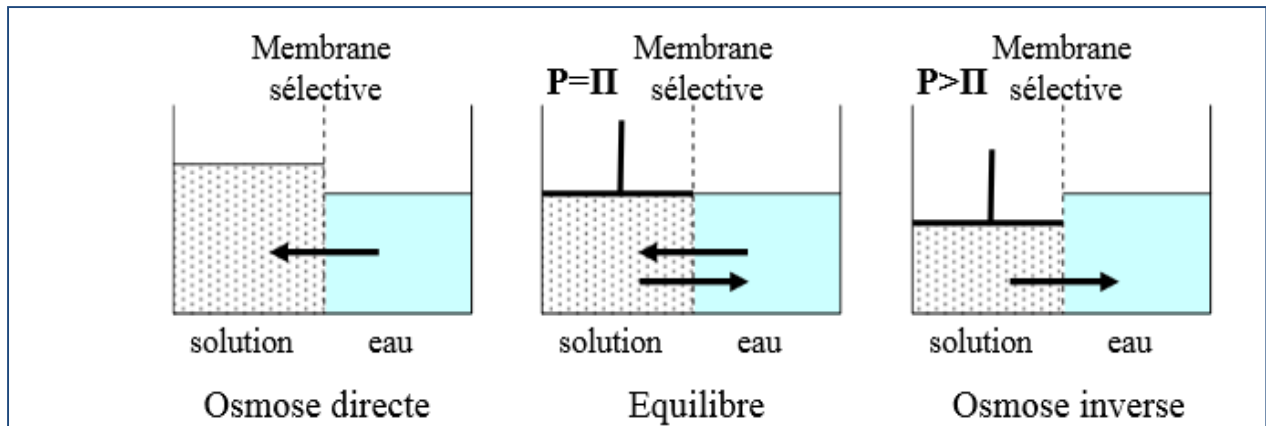


Figure II.8 : Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse (SAGNE, 2008)

Pour les solutions diluées, considérées comme thermodynamiquement idéales, la pression osmotique est calculée à partir de l'équation de Van'tHoff (MAUREL, 2006) :

$$\Pi = C R T$$

Π : pression osmotique de la solution, Pa

C : concentration de la solution, mol.m^{-3}

R : constante des gaz parfait, $8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$

T : température, K

Les membranes d'OI sont des membranes denses et pour obtenir des flux de transfert élevés et vaincre la pression osmotique des solutions traitées, des pressions relativement élevées doivent être utilisées. Les applications principales de l'Osmose inverse sont l'élimination de sels organiques ou inorganiques ou des molécules dans l'eau.

Les membranes d'osmose inverse se présentent aujourd'hui presque exclusivement sous forme des modules spiralés qui sont des cylindres multicouches constitués d'une superposition de feuillets de membranes enroulés autour d'un tube percé qui collecte le perméat (Figure II.9).

Ce dernier s'écoule selon un chemin spiralé vers le tube central tandis que le rétentat circule le long de l'axe dans les canaux formés par les feuillets de membranes.

Il existe également des modules en fibres creuses. Les membranes sont en général en polyamide, aromatique déposée sur un support polysulfone sur polyester, présentant une meilleure tenue mécanique, chimique et thermique et générant des densités de flux plus élevées.

Elles sont donc en général composées de 3 couches (Figure II.10) :

- La base ($\sim 100 \mu\text{m}$), formée d'un matériau inerte type textile tissé ou non (ex : polyester téréphtalique), assure la résistance physique du film. Elle est trop grossière pour permettre le dépôt en couche mince de la partie active ;
- Le support ($\sim 50 \mu\text{m}$) est une membrane d'ultrafiltration aux pores plus fins, calibrés (ex : polysulfone). Il assure la résistance mécanique de l'ensemble ;
- La couche active superficielle ($\sim 0,1$ à $0,2 \mu\text{m}$) permet la séparation des espèces. Elle est déposée sur le support. Le polymère le plus employé est le polyamide aromatique. Il est traité différemment selon les fabricants et les modèles employés.

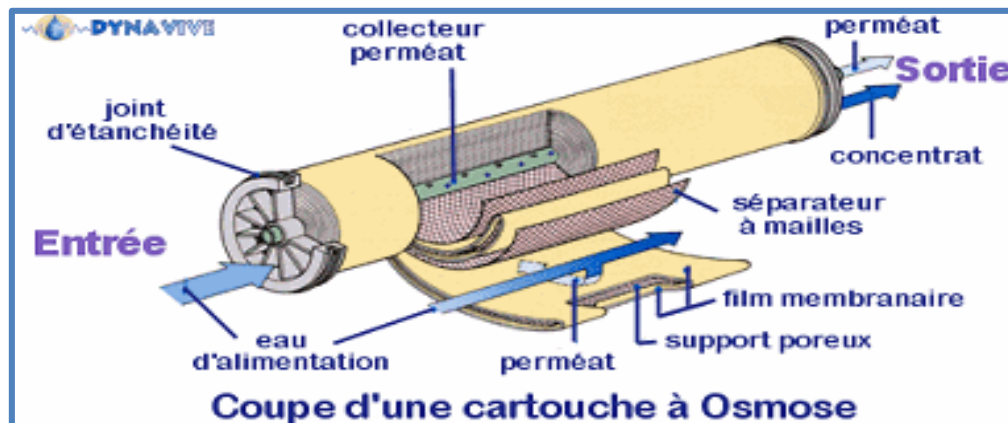


Figure II.9 : Module spirale (DANIS, 2003)

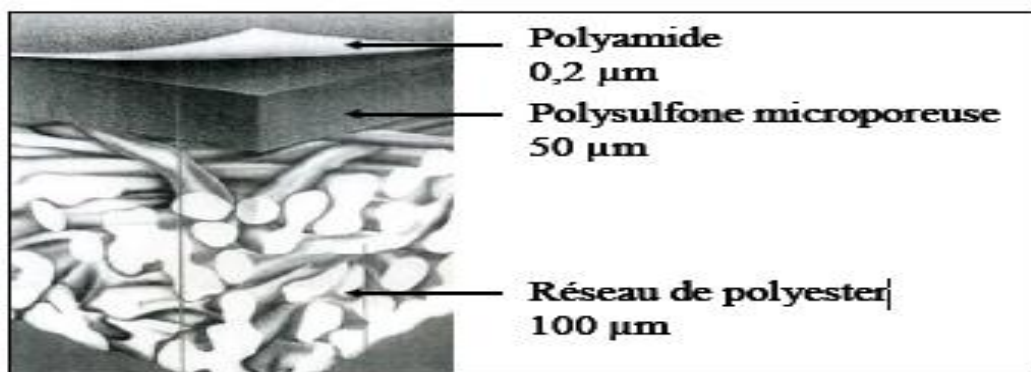


Figure II.10 : Structure des membranes d'osmose inverse (MAUREL, 2006)

a. Pompes de mise en pression

Le débit, la perte de pression et la pression osmotique déterminent ensemble la pression de l'eau d'alimentation nécessaire. On utilise alors un système de pompage (une ou plusieurs pompes) qui permet un débit élevé que celui théoriquement nécessaire pour garder la pression d'alimentation continue.

Il est recommandé d'utiliser de grandes pompes qui donnent un rendement élevé à prix réduit avec opération flexible, réduisant ainsi le nombre de pompes à utiliser. L'efficacité de grandes pompes est 5% plus grande que celle des petites pompes, avec un coût spécifique sensiblement inférieur.

Les pompes volumétriques à piston, ont un rendement supérieur à celui des pompes centrifuges, mais ne sont pas adaptées aux débits supérieurs à 100 m³/h (TRIKI, 2014).

b. Récupération d'énergie

Dès que l'OI a été appliquée au dessalement de quantités importantes d'eau de mer, on a tout naturellement pensé à récupérer l'énergie hydraulique du concentrât, qui est de l'ordre de 55% de celle nécessaire à la mise en pression des modules d'OI (TRIKI, 2014).

Du point de vue technologique deux solutions sont actuellement disponibles : les turbines Pelton et les systèmes dits échangeurs de pression. Les premiers systèmes de récupération ont utilisé des pompes centrifuges multi-étagées fonctionnant en turbine. Puis il a été fait appel à des turbines hydrauliques spécifiques, dont la technologie est issue des turbines utilisées pour l'entraînement des alternateurs des usines hydro-électriques.

Etant donné la pression d'alimentation élevée, le type de turbine le plus adapté est celui utilisant le principe de la roue Pelton. La puissance nécessaire aux pompes HP peut être fournie par le moteur électrique et la turbine de récupération, ou bien on utilise une pompe centrifuge alimentée par la turbine et reliée en série avec celle de HP.

Dans la turbine Pelton toute l'énergie potentielle est transférée en énergie cinétique, la vitesse de l'eau à la sortie de la buse ne dépend donc que de la pression. Actuellement, plusieurs industriels proposent des turbines Pelton pour des débits de 10 à 1200 m³/h (MAUREL, 2006). Bien qu'ayant un bon rendement compris entre 80 et 90%, ces machines présentent quelques inconvénients :

- Corrosion des augets due à la vitesse élevée du jet (environ 100 m/s).
- Centrage du jet difficile à maintenir.

Un nouveau système développé récemment peut donner un rendement de 95% (DANIS, 2003). Il consiste à transférer l'énergie hydraulique directement dans le circuit d'alimentation HP à l'aide d'un échangeur de pression à piston, fonctionnant alternativement : alimentation des modules-évacuation du rejet (*Figure II.11*). Le système comprenant une pompe HP, un ensemble d'échangeurs de pression associés à des distributeurs d'eau salée et de rejet, une pompe de surpression qui compense les pertes de charge dans le circuit de rejet et dans les échangeurs afin d'amener l'eau à la même pression que celle refoulée par la pompe HP. Ce système permet de réduire la taille de la pompe HP, son débit étant égal à celui de la production, tandis que le débit de la pompe de surpression est égal à celui du rejet.

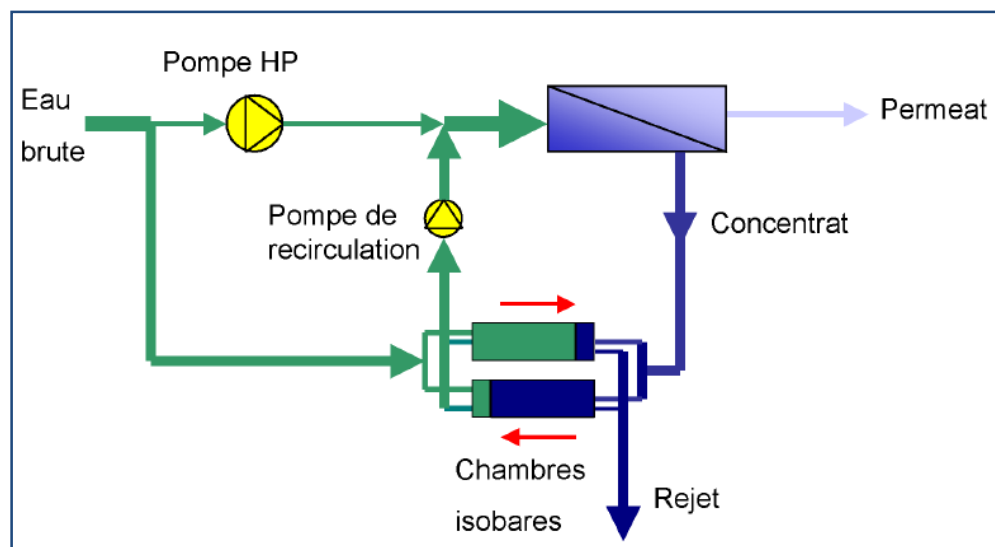


Figure II.11 : Récupération d'énergie par système à piston (échangeurs de pression)

(WWW.BENISAFWATER.COM).

Les principaux avantages et inconvénients des procédés de dessalement d'eau sont représentés dans le tableau II.1 :

Tableau II.1 : avantages et inconvénients des procédés de dessalement d'eau de mer

	Avantages	Inconvénients
Distillation	○ 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.	○ Un taux de conversion bas (inférieur à 35%) ○ Une consommation spécifique d'énergie relativement élevée (8 à 25 KWh/m³ selon le procédé) ; ○ Une non flexibilité par rapport à la variation de la demande en eau ; ○ Un coût d'investissement élevé.
Osmose inverse	○ Un taux de conversion élevé (supérieur à 55%) ; ○ Une consommation spécifique d'énergie basse (3 à 5 KWh/m³) ; ○ Un coût d'investissement relativement bas ; ○ Une durée de mise en œuvre réduite.	○ Sensibilité à la variation de la qualité d'eau brute et surtout aux pollutions ; ○ Nécessité d'un personnel qualifié ; ○ Exploitation relativement difficile surtout au niveau du prétraitement ; ○ Un coût de maintenance élevé dû aux frais de renouvellement des membranes d'une durée de vie ne dépassant pas 7 ans à présent.

Ainsi que nous avons résumé quelques éléments de comparaison entre les procédés membranaires (ED et OI) dans le tableau qui suit (Tableau II.2) :

Tableau II.2 : Comparaison entre les procédés membranaires (MORSLI, 2013)

Désignations	Procédés	
	OI	ED
Energie utilisée	Mécanique (via électricité)	Electrique
Température de fonctionnement (°C)	<45	<45
Consommation électrique (kWh/m ³)	4 à 7	1
Salinité de l'eau brute (g/l)	1 à 45	0,1 à 3
Salinité de l'eau traitée (mg/l)	<500	<500
Capacité d'un train (m ³ /j)	1-10 000	1-12 000

II-2.3.3 Autres procédés de dessalement

II-2.3.3.1 Echange ionique

Le phénomène d'échange d'ions se produit quand on met en contact une eau saumâtre avec certaines substances insolubles ayant la propriété d'échanger certains de leurs ions avec les sels de l'eau. Les produits employés actuellement sont des produits insolubles dénommés échangeurs d'ions (résines synthétiques sous la forme de graines d'environ 0,3 à 1,5 mm).

Cette méthode est applicable seulement pour les eaux contenant jusqu'à 10 g/L de sel (BECHKI, 2011).

II-2.3.3.2 Dessalement par congélation

Le dessalement par congélation est basé sur le changement de phase liquide-solide de l'eau de mer. Selon la thermodynamique, la glace formée à partir de l'eau de mer est pure. Elle peut être séparée de la solution concentrée, puis fondue afin d'obtenir une eau douce.

En pratique, la glace est contaminée par les sels lors de la congélation pour des raisons cinétiques, et par la saumure elle-même pendant la séparation glace solution ; Le procédé doit permettre de minimiser cette contamination (MANDRI, 2011).

II-2.3.3.3 Distillation solaire

La distillation solaire est un procédé simple et pouvant être appliqué de façon rustique mais elle ne convient évidemment qu'aux régions où l'ensoleillement est suffisant. L'eau salée dans un bac va se chauffer (d'autant plus vite que le bassin est noir) et avec l'augmentation de température une partie de l'eau s'évapore et la vapeur d'eau se liquéfie sur la surface intérieure de la vitre transparente. Eventuellement des gouttes d'eau vont se former, couler sur la surface de la vitre et tomber dans le récupérateur situé au coin. Il faut régulièrement nettoyer le bassin pour éliminer le sel (ATALLAH, 2014).

II-2.4 Post traitement ou minéralisation

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

II-2.4.1 Ajustement de pH

L'eau produite par un des procédés de dessalement est agressive. Son pH est inférieur au pH de saturation. La correction du pH se fait par une solution alcaline (CHENAOUI, 2010).

II-2.4.2 Chloration

Il est nécessaire d'assurer une étape de désinfection pour éviter toute contamination et développement biologique. Dans ce contexte, il existe de nombreuses méthodes de désinfection de l'eau, mais la plus utilisée est la chloration de l'eau par l'utilisation d'une solution d'hypochlorite de sodium (eau de Javel). La chloration permet de détruire les organismes pathogènes présents dans l'eau et protéger l'eau contre de nouvelles contaminations ultérieures au cours de son transport ou de son stockage (TAHRAOUI, 2010).

II-3 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-3.1 Entartrage

L'entartrage est un dépôt de sels minéraux qui a tendance à se former sur les surfaces d'échanges. A cause des ions présents dans les eaux salines (calcium, magnésium, bicarbonates et sulfate).

Ces dépôts sont constitués principalement par du carbonate de calcium (CaCO_3), de l'hydroxyde de magnésium (Mg(OH)_2) et de sulfate de calcium (CaSO_4) etc. Par la diversité de leurs origines, les dépôts de tartre ont des conséquences considérables sur le fonctionnement des installations de dessalement :

- Réduction de la section de passage ;
- Dégradation des états de surface ;
- Par leur très forte adhérence, les tartres mènent à une constance de débit ;
- Augmentation des pertes de charge pour un débit constant ;
- Obturation des conduites du fait de la diminution de son diamètre par les dépôts de tartre.

II-3.2 Corrosion

La corrosion est la dégradation d'une substance, en particulier un métal ou un alliage, provoquée par l'action chimique d'un liquide ou d'un gaz sur la substance. Le terme corrosion s'applique plus particulièrement à l'action graduelle d'agents naturels, tels que l'air ou l'eau salée sur les métaux (ATALLAH, 2014).

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.

II-3.3 Colmatage ou fouling

Les eaux naturelles (eaux de mer ou eaux saumâtres) contiennent la plupart du temps des matières organiques en suspension qui vont avoir tendance à se déposer sur les surfaces d'échange et à les colmater. Il va en résulter une augmentation de la résistance de transfert et une diminution de la capacité de production de l'installation (BRIBIESKA, 2005).

Le développement de microorganismes, dans les parties des installations où les conditions physico-chimiques le permettent, peut accentuer le phénomène par suite de la formation de films biologiques sur les surfaces de transfert (biofouling) (ATALLAH, 2014).

Le colmatage a comme conséquences :

- Une augmentation de la perte de charge ;
- Une augmentation du passage de sels, le colmatage empêche la retro diffusion des sels rejetés par la membrane ;
- Une perte de flux.

II-4 Nettoyage des membranes

Le nettoyage des membranes a pour but de limiter le colmatage irréversible de perméabilité, et par le fait même, à prolonger la durée de vie des membranes. Les différentes techniques de nettoyage sont :

- *Le nettoyage mécanique* : partiel mais rapides, son principe consiste à décoller et retirer la matière accumulée sur la membrane par des forces mécaniques.

- *Le nettoyage chimique* : nécessite un arrêt de production périodique, génère des coûts en solution de lavages et en traitement des effluents. Il se compose d'une séquence de lavage acide et basique, ainsi que de phase de rinçage.
- *Le nettoyage enzymatique* : constitue une alternative aux traitements chimiques. Il peut être appliqué dans le cas de membranes sensibles aux réactifs chimiques, au pH ou à la température élevée, ainsi que dans les cas de colmatage avancé (ARZATE, 2008).

II-5 Situation et évolution du marché du dessalement

Le dessalement connaît aujourd'hui un regain d'intérêt sur toute la planète. Après les pays pétroliers et les îles touristiques, de nombreux États se lancent à leur tour dans la construction d'usines de dessalement de capacités très diverses. Non seulement les pays à climat chaud, comme l'Espagne ou les pays pétroliers du Moyen-Orient, continuent à construire de nouvelles usines dans le cadre de plans nationaux pour l'approvisionnement en eau, mais d'autres puissances comme les États-Unis, l'Australie ou la Chine cherchent grâce au dessalement à stabiliser la demande en eau de leur population.

II-5.1 Capacité installée

Il y aurait actuellement environ 13000 unités de dessalement dans le monde, les deux tiers traitant de l'eau de mer et le reste des eaux saumâtres (DUNGLAS, 2014).

La production totale actuelle serait de l'ordre de 58 millions de m³ /jour (47 à partir d'eau de mer et 11 à partir d'eaux saumâtres). Les estimations de cette production varient suivant les sources (de 50 à 60 millions de m³ /jour). Cela représente environ 1% de la quantité d'eau potable consommée mais la production s'accroît de 10% par an.

Les plus grandes unités existant actuellement, également les plus anciennes, sont situées dans la Péninsule Arabique. L'usine de Jebel Ali (distillation), aux Emirats Arabes Unis reste la plus grande du monde avec une capacité de 900.000 m³ /jour, celle de Jubail (également distillation), en Arabie Saoudite produit 800.000 m³/jour. La distillation est préférée dans ces zones d'exploitation pétrolière car elle utilise du gaz qui, autrement, serait brûlé.

Partout ailleurs, l'osmose inverse est systématiquement utilisée car les besoins en énergie sont beaucoup moins élevés. Au Chili, l'usine de Minera Escondida fournit 45 000 m³ à la mine de Cuivre d'Antofagasta. L'Espagne est le quatrième producteur mondial d'eau dessalée (1 600 000 m³ /jour).

L'Algérie a un plan important de développement. L'usine de El Magtaa près d'Oran a une capacité de 500 000 m³ /jour avec un objectif à terme de plus de 2 millions de m³ /jour. Elle est l'une des plus grandes installations d'osmose inverse du monde.

L'Australie mise pleinement sur le dessalement pour alimenter ses grandes villes côtières. Suez Environnement avec l'australien Agbar vient de mettre en route la plus grande installation de dessalement de l'hémisphère sud à Melbourne avec une capacité de 450 000 m³ /jour qui pourra être augmentée régulièrement en fonction des besoins (DUNGLAS, 2014).

A ce jour, la Méditerranée représente environ un quart du dessalement mondial (Figure II.12). Vers 2030, la région pourrait approcher le chiffre du dessalement mondial actuel.

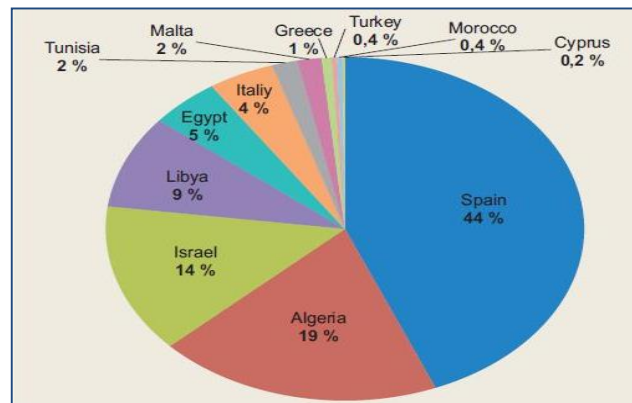


Figure II.12 : Dessalement de l'eau dans les pays méditerranéens (BOYE, 2008)

II-5.2 Coût du dessalement

Le coût du dessalement a baissé de moitié au cours des dix dernières années, avec cependant une remontée de prix récente, conséquence de la hausse de coût des matières premières, dont l'acier inox. Au plan économique, les coûts d'investissement sont de 1000 à 1200 €/m³/j pour la distillation en thermique MED, et de 900 à 1000 €/m³/j pour l'Osmose Inverse. Le coût de l'eau dessalée est estimé en faisant la somme des trois postes suivants : charges financières, coût de l'énergie, coûts de conduite, d'exploitation et entretien.

Le coût de l'eau saumâtre dessalée est nettement inférieur à celui de l'eau de mer dessalée. Il ressort, pour de grandes unités, à 0,2 à 0,3€/m³ en eau saumâtre contre 0,4 à 0,6€/m³ en eau de mer (Source Constructeurs, coûts vérifiés). Ces chiffres sont plus élevés pour des unités plus petites, moins performantes ou anciennes, et bien sûr très sensibles au coût de l'énergie électrique qui diffère selon les pays, et qui est moins élevée dans les pays pétroliers et gaziers comme l'Algérie et les pays du Golfe. L'effet de taille fait baisser le coût de l'eau douce obtenue, d'où l'intérêt de construire des installations de capacité importante, si la demande le justifie et en veillant aux impacts environnementaux.

Il est également important de rappeler que le coût de mobilisation d'un mètre cube d'eau conventionnelle est compris entre 0,1 et 0,3 €/m³ et celui de la réutilisation des eaux usées entre 0,3 et 0,5 €/m³ (Colloque, 2007). L'eau dessalée pour de grandes unités coûte donc environ 2 fois plus que l'eau conventionnelle et 1,5 fois plus que l'eau réutilisée, mais avec des grandes différences selon les situations de terrain. A capacité identique, le recyclage des eaux usées est nettement moins cher que le dessalement d'eau de mer (l'énergie dépensée est réduite au moins de moitié).

II-5.3 Dessalement en Algérie

L'Algérie a vécu plus d'une décennie la sécheresse, les ressources conventionnelles en eau étaient insuffisantes pour subvenir aux besoins de la population, ce qui a incité les autorités algériennes à chercher d'autres ressources pour garantir l'alimentation en eau potable de cette population. La solution la plus adaptée et qui ne dépend pas des aléas climatiques, était le dessalement d'eau de mer. Le dessalement de l'eau de mer en Algérie revêt un caractère stratégique, il remplacera les ressources naturelles dans la majorité des villes du nord algérien.

Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres a connu ces dernières années une avancée remarquable grâce au développement de différents procédés.

Aujourd'hui, plusieurs facteurs militent en faveur de la mise en œuvre de cette technologie dans notre pays :

- Un littoral long de 1200 Kilomètres ;
- Disponibilité de l'eau de mer, ressource inépuisable ;
- Une population et une industrie grandes consommatrices d'eau se trouvant à proximité de la mer ;
- Disponibilité de la ressource énergétique ou combinaison de sa production.

Actuellement le volume dessalé mobilisé est : 111,45 millions de mètre cube par an dont :

- 105,85 Hm³/an sont produits par les grandes stations de dessalement de l'eau de mer ;
- 5,60 Hm³/an sont produits par les stations monoblocs de dessalement de l'eau de mer.

Les tableaux (II.3) et (II.4) représentent respectivement les stations monoblocs et les grandes unités de dessalement en Algérie :

Tableau II.3 : Stations monoblocs (ADE, 2007)

Wilaya	Site	Commune	Capacité m3/j	Population à servir
Alger	Champ de tir	Zéralda	5 000	33 330
Alger	Palm Beach	Staoueli	2 500	16 660
Alger	La Fontaine	Ain Benian	5 000	33 330
Tlemcen	Ghazaouet	Ghazaouet	5 000	33 330
Tipasa	Bou Ismail	Bou Ismail	5 000	33 330
Skikda	L.Ben Mhidi	L.Ben Mhidi	7 000	47 000
Tizi –Ouzou	Tigzirt	Tigzirt	2 500	16 660
Oran	Bou Sfer	Bou Sfer	5 000	33 330
Oran	Les Dunes	Ain Turk	2X2 500	33 330
Ain-Temouchent	Bou Zdjer	Bou Zdjer	5 000	33 330
Ain-Temouchent	Chatt el Ward	Bou Zdjer	5 000	33 330
Boumerdes	Corso	Corso	5 000	33 330

Tableau II.4 : Les grandes unités de dessalement(ADE, 2007)

N°	Localisation	Capacité m3/j	Population à servir	Echéancier prévisionnel
01	Kahrama (Arzew)	90 000	540 000	En Exploitation
02	Hamma (Alger)	200 000	L'Algérois	En Exploitation
03	Skikda	100 000	666 660	En Exploitation
04	BeniSaf A.Temouchent	200 000	1 333 320	En Exploitation
05	Mostaganem	200 000	1 333 320	En Exploitation
06	Douaouda (Alger Ouest)	120 000	666 660	En Exploitation
07	Cap Djenet (Alger Est)	100 000	666 660	En Exploitation
08	Souk Tleta (Tlemcen)	200 000	1 333 320	En Exploitation
09	Honaine (Tlemcen)	200 000	1 333 320	En Exploitation
10	Mactaa (Oran)	500 000	1 333 320	1er T 2014
11	El Tarf	50 000	-	-
12	Ténès	200 000	999 990	-
13	Oued Sebt (Tipaza)	100 000	-	-

Total Stations : 13
Capacité m3/j : 2 260 000
Population : 11 873 220

II-6 Conclusion

Le dessalement est l'une des solutions efficaces et maîtrisées techniquement, pour la mobilisation des ressources en eaux supplémentaires.

L'osmose inverse a connu un développement technologique avec l'apparition des membranes en polyamides sur le marché dont la durée de vie est plus importante.

Il s'agit d'une technique performante qui peut être utilisée sur une grande plage de concentration ; comparé à l'électrodialyse et à la distillation qui sont réservés à des domaines plus spécifiques.

En ce siècle, le dessalement sera un enjeu majeur partout dans le monde. Cependant, il ne faut pas négliger l'impact écologique des rejets de concentrât.

Chapitre III

Impacts du dessalement sur l'environnement

III-1 Introduction

Parmi les impacts dus à une usine de dessalement, il y a ceux qui se limitent à la phase de construction et ceux qui sont 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, le dragage et l'élimination des déblais qui en résultent, le bruit, les entraves à l'accès du public et aux loisirs.

En dépit du fait que des procédés différents ont été mis au point pour le dessalement, osmose inverse, distillation, électrodialyse, congélation sous vide, etc., ils ont tous en commun de consister à ôter de l'eau de mer les substances minérales et notamment mais pas exclusivement les sels, qui y sont dissoutes. Il en résulte donc, dans tous les cas, un effluent (concentré) qui a une composition chimique similaire à l'eau de mer d'alimentation mais dont la concentration est de 1,2 à 3 fois plus élevée avec en plus les produits chimiques utilisés au cours des phases de prétraitement et de post-traitement.

Toute une série de produits chimiques et d'additifs servent en effet, lors du dessalement, à prévenir ou combattre l'entartrage ou la prolifération de microorganismes dans les circuits, faute de quoi la bonne marche de l'exploitation serait entravée.

Les constituants présents dans ces eaux résiduaires rejetées par les usines de dessalement dépendent dans une large mesure de la qualité de l'eau d'alimentation, de la qualité de l'eau douce produite et de la technique de dessalement adoptée. Cependant, les rejets des usines de dessalement ne comprennent pas seulement l'effluent de saumure concentrée, les désinfectants et les agents antisalissures mais également des eaux chaudes et des effluents aqueux tels que les distillats et condensats d'éjecteur.

III-2 Origine et type des émissions et rejets

III-2.1 Émissions atmosphériques

En général, les émissions atmosphériques des usines de dessalement consistent seulement en azote et oxygène provenant d'usines de distillation qui utilisent des procédés de désaération pour réduire la corrosion, en rejets des éjecteurs (usines MSF) ou des dégazeurs (usines OI).

En outre, la production d'énergie destinée à être utilisée dans les usines de dessalement accroît les émissions atmosphériques. Des augmentations substantielles des émissions atmosphériques peuvent également se produire si une centrale thermique ou une installation de production couplée est construite dans le cadre d'un projet de dessalement (UNEP, 2001).

III-2.2 Rejets chimiques

Toutes les usines de dessalement utilisent des produits chimiques pour le prétraitement de l'eau d'alimentation ainsi que le post-traitement de l'eau produite. La plupart des produits sont

utilisés avant tout comme agents biocides, antitartres, antisalissures et antimousses, et ils finissent par modifier la composition de la saumure concentrée. La présence de certains métaux, qui sont des produits de la corrosion du circuit, influent aussi sur la composition de la saumure concentrée (UNEP, 2001).

III-3 Consommation énergétique

Le coût énergétique du dessalement doit être comparé aux autres dépenses énergétiques, pour mieux évaluer son importance. Prenons un exemple. Une usine à osmose inverse de petite taille produit environ 25 000 mètres cubes par jour d'eau douce. Pour cela, elle consomme 100 000 kilowattheures par jour. Si on considère que la dépense quotidienne en eau s'élève en moyenne à 130 litres par personne, une telle usine pourra alimenter en eau 48 000 foyers de quatre personnes par jour (ENCYCLOECOLO.com, 2014).

Les techniques utilisées pour le dessalement de l'eau sont très consommatrices en énergie, même si la tendance est à la baisse, notamment grâce au développement de l'osmose inverse et une bonne répartition de consommation d'énergie (*Figure III.1*) et d'autres technologies innovantes.

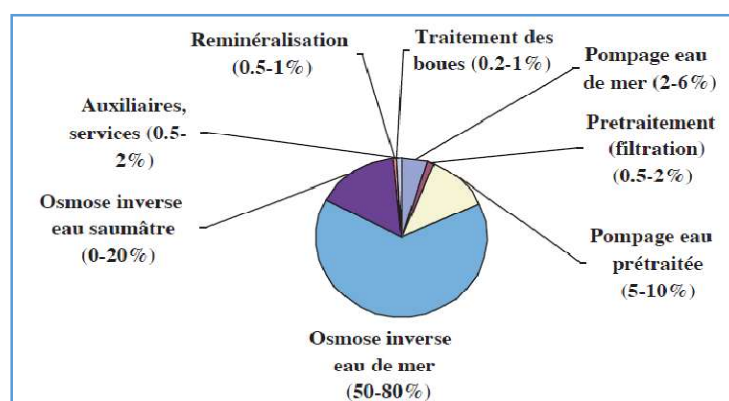


Figure III.1 : Répartition de la consommation d'énergie sur une installation de dessalement par osmose inverse (AIGR, 2009)

Or, cette énergie est le plus souvent fournie par des combustibles fossiles qui présentent pour l'environnement l'inconvénient d'émettre des polluants atmosphériques, notamment du dioxyde de carbone (CO₂), des oxydes de soufre et d'azote et des particules solides.

Il a ainsi été estimé que le système de production espagnol rejetait 680 grammes de CO₂ par mètre cube d'eau dessalée, ce qui, pour une production de plusieurs millions de mètres cubes par jour se traduirait par l'émission dans l'atmosphère de plusieurs milliers de tonnes de CO₂ par jour. Cette contribution à l'effet de serre est loin d'être négligeable dans le contexte actuel de lutte contre le réchauffement climatique (ECOTOXICOLOGIE.fr, 2014).

III.4 Bruit

Une usine de dessalement d'eau de mer par osmose inverse est une usine bruyante. En général ce bruit est produit par des pompes à haute pression et par les turbines utilisées pour la récupération d'énergie, le niveau de bruit est plus de 90 dB(A). L'usine devrait être située loin des secteurs peuplés et être équipée de technologie acoustique appropriée pour réduire le niveau de bruit (HABET, 2012).

III.5 Impacts sur le paysage

L'usine de dessalement représente une zone continue de machines et ouvrages auxiliaires couvrant une grande superficie. L'usine de dessalement influence aussi sur les sites adjacents car les caractères existants du paysage est de nature touristique.

III.6 Impacts sur l'environnement

Le principal impact environnemental associé aux procédés de dessalement provient de la production de saumure : solution à forte teneur en sels qui résulte de la « concentration » de l'eau de mer ou de l'eau saumâtre dessalée.

Cependant, il ne faut pas oublier, lors d'une éventuelle évaluation, l'impact environnemental causé par une station de dessalement, comme les problèmes de dégradation paysagère, bruits, émissions de gaz (CO₂, NO_x), ou encore les rejets associés comme les eaux provenant du nettoyage (filtres de sable, membranes et dépôts) (PLAN D'ACTION, 2003).

En plus, des effets combinés qui affectent la physiologie des plantes et qui se résument par une salinité (pression osmotique), une concentration en ion Na⁺ et une concentration en ion Cl⁻, nous nous trouvons en présence de contraintes anthropiques et climatiques que l'on peut résumer de la façon suivante :

- Dégradation du sol et des plantations par les rejets de résidus.
- Stagnation des rejets libres d'eau de rinçage de la station de déminéralisation, inondation des terres agricoles par les eaux chargées de résidus et dépérissement d'arbres.
- Contamination de la nappe phréatique, disparition de la végétation naturelle et salinisation effrénée des terres agricoles
- Perte de la biodiversité et fragilisation des écosystèmes.
- Diminution de la pluviométrie.
- Conflits d'usage.

III-6.1 Impacts dépendant du lieu de prélèvement d'eau de mer

Si l'eau est prélevée dans des puits côtiers (*Figure III.2*), les effets sur les écosystèmes marins sont réduits non seulement aux captages, mais aussi aux lieux de rejets. L'eau étant plus pure aux puits côtiers qu'au large (filtration par le sable), elle nécessite en effet moins de traitements chimiques. En revanche, cette option a l'inconvénient de ne pas être adaptable aux usines de grande échelle en raison du faible débit prélevable dans ces puits. A l'inverse, si l'eau est captée au large, différentes perturbations des écosystèmes marins peuvent être observées (WWF, 2007).



Figure III.2 : Puits côtier en Espagne (ECOTOXICOLOGIE.fr, 2014).

Il faut ajouter à ces effets les impacts liés aux canalisations permettant de conduire l'eau de mer jusqu'à l'usine. Ces structures, enfouies dans le sol, nécessitent une autorisation spéciale par les autorités nationales compétentes (en raison des impacts qu'elles peuvent causer lors de leur implantation et pendant leur utilisation).

III-6.2 Collision d'organismes marins contre les tambours tamiseurs

Les dispositifs de prélèvement de l'eau installés par les usines de dessalement ne sont pas sans impacts sur les écosystèmes locaux. En effet, dans le but d'empêcher des débris ou des gros organismes de pénétrer dans le réseau d'eau de l'usine, des tambours tamiseurs (structures de prélèvement) d'un maillage moyen de 5 mm sont placés entre le dispositif d'apport et les pompes d'alimentation.

Des organismes marins tels que les poissons peuvent heurter ces tambours et se blesser (écaillage, troubles de l'orientation etc.). Ces troubles physiques peuvent être à l'origine d'une mortalité accrue due aux maladies et à l'augmentation de la prédation (ECOTOXICOLOGIE.fr, 2014).

III-6.3 Introduction d'organismes dans le circuit d'eau

Un des problèmes majeurs associés au captage d'eau est l'aspiration d'organismes marins dans le circuit d'eau. Le maillage de 5 mm des tambours permet d'épargner les organismes de moyenne et grande taille. En revanche, l'entraînement dans le circuit d'eau peut tuer un grand nombre de petits organismes marins tels que le phytoplancton, le zooplancton (petits invertébrés, bactéries etc.) et les alevins, bien que les impacts au niveau des populations n'aient pas été clairement établis.

Cet effet d'entraînement peut être réduit par une faible vitesse d'aspiration et par une prise d'eau en surface (comme c'est le cas pour de nombreuses grosses usines) ou dans des zones biologiquement peu actives telles que des eaux profondes au large (LATTEMANN, 2008).

III-6.4 Impacts liés aux rejets

Les scientifiques s'accordent sur le fait que les impacts des effluents issus de ces usines sont principalement dus à la forte concentration en sel et dans une moindre mesure à la présence de produits chimiques (utilisés pour le fonctionnement de l'usine) et à la température potentiellement élevée de ces eaux.

Les rejets des usines de dessalement sont soumis aux réglementations du protocole « Tellurique » de la convention de Barcelone à laquelle ont adhéré de nombreux pays européens côtiers de la méditerranée : France, Espagne, Israël, Egypte, Liban, Lybie, etc.

Cette convention prévoit des valeurs limites de rejets pour de nombreux éléments (sels, chlore, température, etc.) et l'obligation de réaliser une étude d'impact (dossier examinant les conséquences environnementales d'un projet) avant la construction de l'usine.

III-6.5 Impacts liés à la salinité

La principale caractéristique des eaux rejetées par les usines de dessalement est sa forte salinité. On la qualifie ainsi de saumure. Pour les usines à procédé thermique, le taux de conversion de l'eau de mer en eau douce est en moyenne de 10%, c'est à dire qu'avec 10L d'eau salée est produit 1L d'eau pure. Ainsi, la concentration des effluents issus de ces usines est en moyenne 10 % plus concentrée que l'eau d'alimentation. Dans ce procédé, les eaux de rejets sont souvent diluées par des eaux de refroidissement (eau de mer classique), ce qui donne donc un effluent seulement 5% plus concentré que l'eau de mer naturelle.

Pour les usines à procédé membranaire en revanche, l'eau de rejet est de 30 % à deux fois plus concentrée (UNEP, 2003).

La forte salinité des eaux de rejets est à l'origine des principaux impacts des usines de dessalement sur les écosystèmes marins. Le rejet de saumure dans la mer aboutit en effet à la formation d'un système stratifié de couches de plus en plus salées en allant vers le fond, ce qui diminue les brassages entre eau de fond et eau de surface. Dans certains cas et en fonction des courants marins locaux, 40% de la zone environnante est recouverte de sel (UNEP, 2003).

Ce phénomène peut conduire à des modifications du milieu local (*Figure III.3 et III.4*):

- Anoxie (absence d'oxygène) au niveau des fonds marins : la diminution des brassages associée à la présence d'espèces consommatrices d'oxygène peut conduire à des périodes d'anoxie du fond marin
- Diminution de la lumière : la présence d'eau hyper salée provoque la formation d'un brouillard qui rend difficile le passage de la lumière, affectant ainsi la photosynthèse des espèces marines végétales.

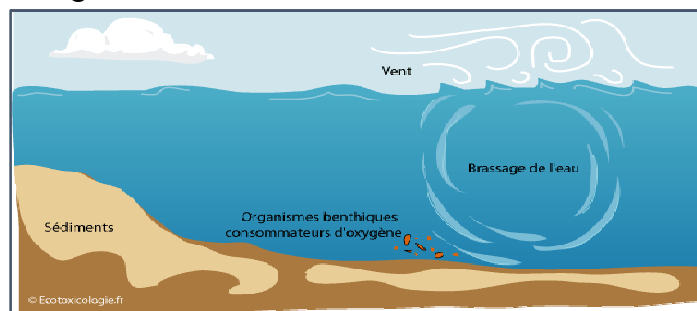


Figure III.3 : Etat initial du milieu (pas de rejet de saumure)
(ECOTOXICOLOGIE.fr, 2014).

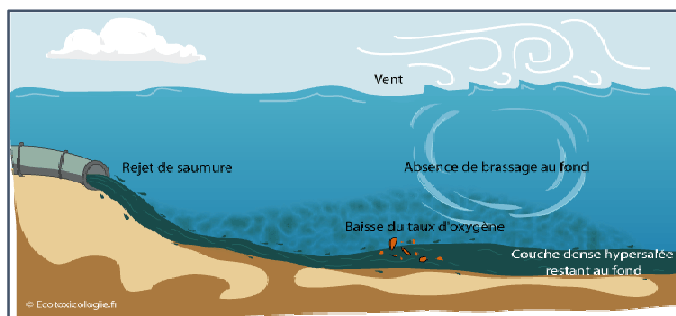


Figure III.4 : Etat du milieu après implantation de l'usine de dessalement (rejet de saumure) (ECOTOXICOLOGIE.fr, 2014).

L'énergie thermique (procédé de distillation) ou l'énergie mécanique (procédé d'osmose inverse) nécessaires au processus de dessalement de l'eau de mer sont à l'origine d'une augmentation de la température de l'eau et donc d'une température élevée de la saumure.

Pour les usines à procédé membranaire, l'augmentation de température entre l'eau de mer et la saumure est relativement faible : une élévation de 0,65°C a été relevée dans les eaux de rejets de l'usine Fujairah aux Emirats arabes unis (UNEP, 2003).

En revanche, pour les usines à procédé thermique, cette élévation de température est bien plus conséquente, de l'ordre de 2,8°C en moyenne.

III.6.6 Effets des rejets de produits chimiques

Certains des composés chimiques rejetés par les usines de dessalement peuvent avoir des conséquences sur les écosystèmes marins. Par exemple, il a été montré que les produits antitartres rejetés par les usines de dessalement étaient des éléments nutritifs qui stimulaient la productivité primaire. Ces produits peuvent donc induire une prolifération d'algues dans des milieux qui habituellement en comptent peu, comme en mer méditerranée. De même, les produits antisalissures rejetés par ces mêmes usines auraient des effets stérilisants sur certains organismes (UNEP, 2003).

Les rejets de saumure issus des usines d'osmose inverse ne contenant que des traces de certains métaux lourds, la contamination du milieu induite est généralement peu importante et donc sans effet pour la faune et la flore locale. En revanche, les quantités de métaux lourds rejetés par les usines à distillation sont plus élevées et, pouvant donc affecter les organismes situés dans la zone de rejet, car ils se retrouvent dans les matières en suspension dont se nourrissent les microorganismes planctoniques.

A partir de certains seuils de concentrations, ces matières sont toxiques voire mortelles et peuvent déstabiliser certains échelons du réseau trophique et les équilibres de l'écosystème.

La saumure contient également les résidus des produits chimiques ayant servi aux prétraitements, dont certains peuvent entraîner une acidification de l'eau, affectant certains organismes et en particulier les coraux. Le métabisulfite de sodium, utilisé pour la déchloration de l'eau d'alimentation ou en tant que biocide, a également un effet toxique, sur le phytoplancton notamment. Certaines de ces substances sont, en plus, bioaccumulables, et peuvent donc se retrouver très concentrées en haut de la chaîne alimentaire, dans les poissons notamment (ecotoxicologie.fr, 2014).

III-6.6.1 Effets dus aux produits de la corrosion

Les usines de dessalement par distillation rejettent des métaux tels que le cuivre, le nickel, le fer, le chrome et le zinc dans le milieu marin.

Ces métaux ne se trouvent pas à l'état d'ions libres mais forment des complexes inorganiques et organiques qui sont adsorbés sur les matières en suspension et déposent en s'accumulant dans les sédiments. Comme, dans ce cas, le problème ne réside pas dans la concentration effective du métal mais dans sa charge totale atteignant l'environnement, on ne peut atténuer les effets en diluant le rejet.

III-6.6.2 Effets dus aux additifs antitartres

Une action précoce contre l'entartrage est obtenue avec l'adjonction de phosphates polymères. L'orthophosphate, produit de l'hydrolyse des polyphosphates, est un macroélément nutritif qui stimule la productivité primaire. Dans une zone marine oligotrophe comme la mer Méditerranée, le rejet d'un macro-élément nutritif peut avoir des effets drastiques tels que des efflorescences algales, des proliférations d'algues macroscopiques, etc.

Ces dernières années, les agents antitartres les plus largement utilisés ont été les polymères de l'acide maléique. L'utilisation de ces produits permet d'empêcher l'apparition d'effets eutrophisants.

Il convient de prendre en compte le recours à l'acide sulfurique pour faciliter l'action des agents antitartres sur les membranes d'usines OI. Une étude d'impact sur l'environnement de l'effluent de l'usine de dessalement OI TIGNE à Malte a montré que les valeurs du pH de la saumure étaient plus basses (7,3) que celles du pH de l'eau de mer ambiante (UNEP, 2001).

III-6.6.3 Effets des additifs antisalissures

La chloration est un bon auxiliaire mais un mauvais maître en ce sens qu'elle est très économique et efficace mais qu'elle n'est pas correctement maîtrisée ; elle donne naissance à des dérivés tels que les thiolométhanes qui sont soumis à réglementation en raison de leurs effets cancérogènes.

Si le chlore est un agent antisalissure à large spectre, il présente aussi des effets étendus sur le milieu marin quand il est rejeté avec la saumure. Il occasionne des effets biologiques par son action stérilisante intrinsèque et des effets chimiques en halogénant les constituants organiques de l'eau de mer (UNEP, 2001).

III-6.6.4 Effets des additifs antimousses

Les agents antimousses sont des détergents. Les détergents ont des effets nocifs sur les organismes en altérant le système membranaire intracellulaire. Les effets sur l'écosystème marin n'ont pas été étudiés mais pourraient être négligeables.

III-6.6.5 Effets du concentré (saumure)

Le volume total de saumure libéré dans le milieu marin est déterminant pour les dommages qu'il peut induire. Un rejet de saumure concentré en grandes quantités appelle un examen plus soigneux des impacts potentiels sur l'environnement que s'il s'agit d'un rejet en petites quantités.

La longueur de l'émissaire, sa distance au rivage, son niveau au-dessus du fond de la mer, l'existence ou non d'un diffuseur, ainsi que la profondeur de l'eau et les caractéristiques hydrologiques (courants, vagues) peuvent conditionner la dispersion de la saumure et l'efficacité

de la dilution au point de rejet et, par voie de conséquence, l'impact potentiel sur l'environnement.

III-6.7 Effets dus à la chaleur

Normalement, les usines de distillation rejettent la saumure à une température qui est environ supérieure de 10 à 15°C à celle de l'eau de mer. On obtient 1°C de plus que la température ambiante dès que le concentré est dilué de dix fois son volume par l'eau de la zone marine réceptrice. Ce 1°C de plus que la température ambiante n'a pas d'importance écologique et n'est pas significativement démontrable. Ce cas se présente lorsqu'il existe un brassage et un échange suffisants avec l'eau de mer du concentré (UNEP, 2001).

III-7 Conclusion

Il convient de traiter avec précaution la problématique liée à ces rejets, car le volume de saumure produit par litre d'eau dessalée, ainsi que la teneur en sels, dépend de la technique de dessalement employée et de la composition saline de l'eau utilisée.

La décharge nulle de saumure s'obtient au moyen d'un procédé d'évaporation des concentrés produit qui permet d'obtenir des résidus secs. Cette technique nécessite une forte augmentation du capital d'investissement et de la consommation d'énergie. Par conséquent, ce choix n'est applicable que lorsqu'il n'existe aucune autre solution de rejet des saumures. De même, il convient de tenir compte de la contamination acoustique résultant de l'exploitation d'une station de dessalement, notamment lorsque les installations se trouvent près des agglomérations.

En matière de contrôle des rejets, c'est sans doute l'agriculture qui pose le plus de problèmes. En effet, les eaux d'irrigation et les eaux de pluies, entraînent par lessivage les produits chimiques épandus sur les cultures. Par ce processus, les sols, les rivières et parfois les nappes phréatiques sont contaminées.

La lutte contre la pollution passe donc par la législation et son application mais aussi par l'amélioration des techniques : utilisation de produits moins nocifs et en doses plus réduites en particulier pour l'agriculture, meilleures performances des unités de dessalement des eaux.

Chapitre IV

Cadre d'étude

IV-1 Etude du procédé de dessalement de la station de Cap Djinet

IV-1.1 Introduction

Les installations de dessalement par osmose inverse se sont développées à partir de la fin des années 90, avec des capacités de production de plusieurs dizaines de m^3/j , aboutissant à des débits pouvant atteindre $500\,000\text{ m}^3/\text{j}$.

Durant ces dernières années les techniques ont évolué, ainsi que les types de contrat. Dans cette partie nous présentons une application du procédé Osmose inverse dans la station de dessalement au niveau de la Wilaya de Boumerdes.

Des données générales et des fiches techniques nous ont été procurées par les responsables de la station, et des photos numériques ont été prises pour mieux illustrer les composants de cette usine.

IV-1.2 Présentation de la station de dessalement Cap Djinet

La mise en service finale de la station de dessalement Cap Djinet était en Aout 2012 dont la capacité de production est de $100\,000\text{ m}^3/\text{j}$ par la technique d'osmose inverse, assurant l'approvisionnement en eau potable de plusieurs communes (Alger, Borj-menail, Zemmouri, Dellys, Afir, Tigzirt, Azefoun) ainsi que les agglomérations urbaines de Boumerdes, soit une population d'environ 400.000 habitants.

L'investissement d'un montant de 133 millions de dollars a été fait par l'entreprise *Sonatrach* et *Sonelgaz* avec 49%, et deux entreprises espagnoles, *INIMA* et *Aqualia* qui détiennent chacune 25,50 % de cet investissement. (FICHE DE LA STATION Cap Djinet)

IV-1.2.1 Situation géographique

A 45 km de l'est de la capitale (Alger), la wilaya de Boumerdes a fait l'objet de l'installation d'une station de dessalement d'eau de mer (*Figure IV.1*), dans la région de < Cap Djinet >.

Djinet est une petite ville côtière algérienne, située dans le littoral de la daïra de Bordj Menaïel, entourée par Sidi Daouad et Lagata. Elle est située à 15 km au Nord-Est de Bordj Menaïel.



Figure IV.1 : Station de dessalement Cap Djinet

IV-1.2.2 Processus du dessalement appliqué dans la station du dessalement de Cap-Djinet

Le processus du dessalement d'eau de mer comporte quatre étapes principales :

- La captation de l'eau de mer
- Le prétraitement
- L'osmose inverse
- Le post-traitement

La figure ci-dessous (*Figure IV.2*) présente le schéma général de la station de dessalement :

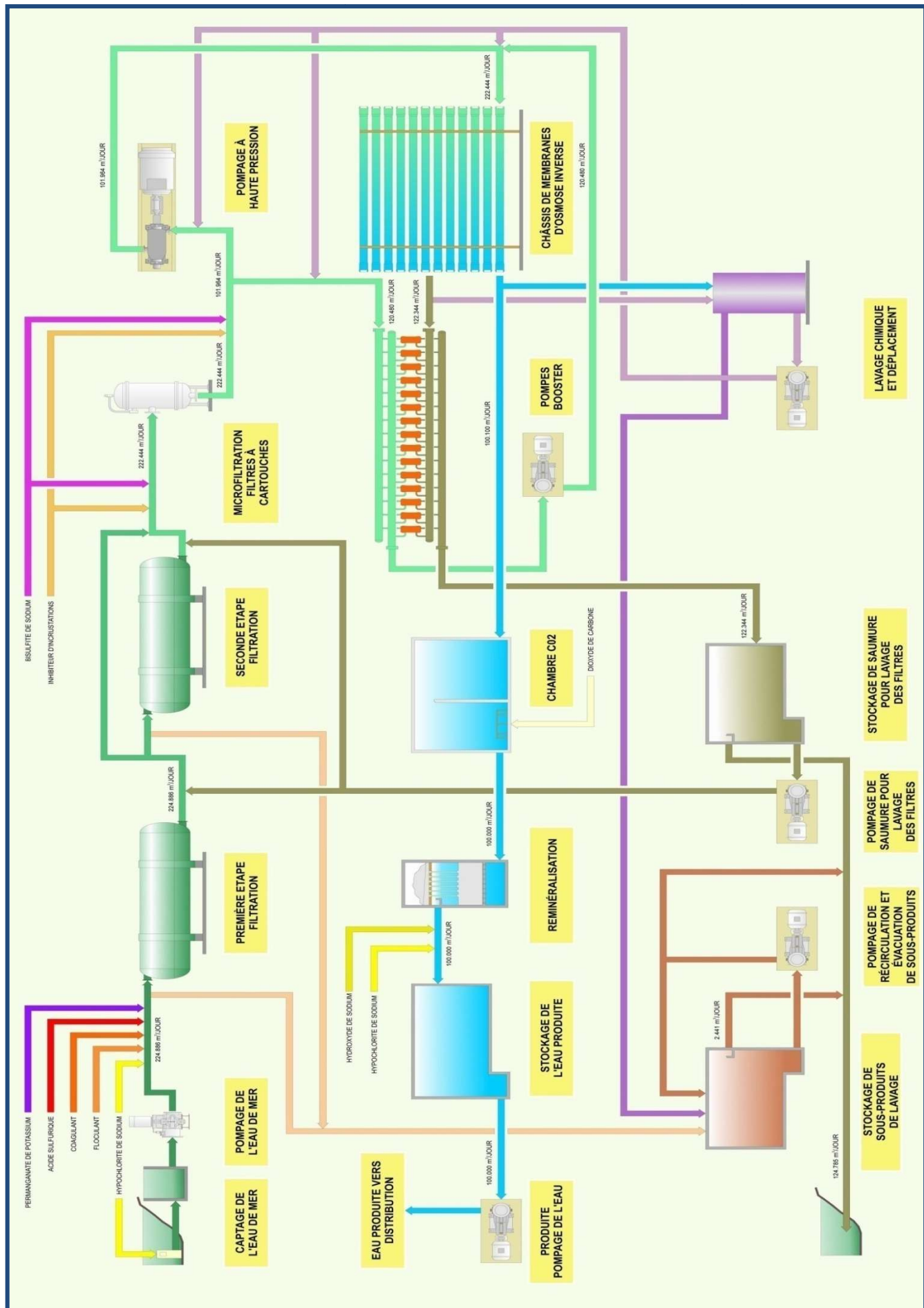


Figure IV.2 : Schéma général de la station de dessalement

IV-1.2.2.1 Captage de l'eau de mer

La première opération s'effectue au niveau de « la tour de captage de l'eau de mer » à partir d'un émissaire de captage dont le diamètre nominal est de 1800 mm, placé à une profondeur de 20 m sur une longueur de 1,8 Km, l'écoulement vers le réservoir d'eau de mer est gravitaire.

Cette eau est ensuite pompée par le biais de 05 pompes centrifuges horizontales dont une de réserve (veille), au débit de 222 000 m³/j (*Figure IV.3*). Le tableau ci-dessous (*Tableau IV.1*) présente les caractéristiques de ces 05 pompes:

Tableau IV.1 : Caractéristiques des pompes de captage d'eau de mer

Condition d'opération	
Débit	2380 m ³ /h
NPSH disponible	6,6 m
Hauteur manométrique (de conception)	45 - 72 m
Fluide à pomper	Eau de mer
Densité	1030 Kg/m ³
Température	Ambiante
Viscosité	1 cp
Fonctionnement	
Puissance	346 - 566 KW
Vitesse	976 – 1185 Rpm
Rendement	87 – 86 %
NPSH requis	4 m



Figure IV.3 : Station de pompage de l'eau de mer

IV-1.2.2.2 Prétraitement

C'est la deuxième étape du processus de dessalement (*Figure IV.4*) dont le but est d'éliminer :

- Les solides en suspension
- Les matières organiques
- Les micro-organismes

Elle est aussi nécessaire pour éviter la détérioration des pompes, l'incrustation, l'encrassement et la dégradation des membranes d'osmose inverse par les microorganismes.

Cette étape comporte deux types de prétraitements :

a. prétraitement chimique

Cette opération s'effectue au niveau de la tour de captage de l'eau de mer ou après refoulement des pompes à eau de mer ainsi qu'à la sortie des filtres. Elle consiste à l'injection d'hypochlorite de sodium (NaOCl), Acide sulfurique (H_2SO_4), Chlorure Ferrique (FeCl_3), poly-électrolytes, Permanganate de Potassium (KMnO_4), Bisulfite de Sodium (NaHCO_3) et d'inhibiteur d'incrustations.

1. Traitement par hypochlorite de sodium (eau de javel)

Cette étape se fait grâce à deux tanks (réservoirs) de NaOCl d'une capacité de 50 m^3 chacun et une dose maximale de 4 ppm, munis de 3(2+1) pompes doseuses ($Q_u=150 \text{ l/h}$) destinées à injecter l'hypochlorite de sodium au niveau de la tour de captage d'eau de mer et après la station de pompage.

L'injection d'hypochlorite de sodium est dans le but de :

- Désinfecter et stériliser l'eau afin de limiter le colmatage biologique ;
- Stopper la prolifération des organismes vivants dans l'eau de mer.

2. Traitement par Permanganate de Potassium (KMnO_4)

Deux autres tanks de dilution avec vannes mélangeuses de KMnO_4 d'une capacité de 5 m^3 chacun, munis de 3(2+1) pompes doseuses ($Q_u=200 \text{ l/h}$) qui sont utilisées pour injecter le KMnO_4 avec une dose maximale de 1 mg/l au niveau du système de pompage de l'eau de mer. Cette injection a pour but d'oxyder la matière organique.

3. Traitement par Acide sulfurique (H_2SO_4)

L'injection d'acide sulfurique avec une dose maximale de 25 ppm au niveau du système de pompage de l'eau de mer, de même que les autres agents chimiques à partir d'un seul tank d'une capacité de 60 m^3 , muni de 4(2+1+1) pompes doseuses ($Q_u=70 \text{ l/h}$) et 1 pompe de transfert ($Q=25 \text{ m}^3/\text{h}$). Cet acide joue le rôle d'un catalyseur dans la coagulation/floculation.

4. Traitement par coagulant et floculant

Consiste à injecter dans le système de pompage de l'eau de mer un coagulant (Chlorure Ferrique (FeCl_3)) à partir d'un tank de 50 m^3 de capacité avec une dose maximale de 9 mg/l, muni de 2(1+1) pompes doseuses ($Q_u=160 \text{ l/h}$) et une pompe de transfert ($Q=25 \text{ m}^3/\text{h}$), ainsi qu'un floculant (poly-électrolytes) d'une dose maximale de 1 mg/l à partir de 2(1+1) tanks de dilution avec vannes mélangeuses d'une capacité de $2,5 \text{ m}^3$ chacun, munis de 3(2+1) pompes doseuses ($Q_u=200 \text{ l/h}$). Cette injection a pour but d'éliminer ou réduire au maximum la présence des matières colloïdales, et éviter l'entartrage des membranes en empêchant la précipitation du carbonate de calcium.

5. Traitement par Bisulfite de Sodium (NaHSO_3)

L'utilisation du bisulfite de sodium permet d'éliminer le chlore résiduel contenu dans l'eau de mer avant son arrivée aux membranes d'osmose inverse, évitant leur détérioration par oxydation. L'addition de la solution de NaHSO_3 s'effectue avec une dose maximale de 8 ppm à l'aide d'un ensemble de pompes (2+1) dont $Q_u=200 \text{ l/h}$ avant et après la microfiltration (filtration à cartouche) pour donner un maximum de temps de contact possible. L'objectif est

d'éliminer les matières biologiques d'une façon indirecte, en réduisant l'oxygène dissous nécessaire à leur respiration, on empêche leur développement.

6. *Traitement parinhibiteur d'incrustations*

Pour la protection des membranes en évitant la précipitation du sel, on procède par injection avant et après la microfiltration d'inhibiteur d'incrustations à base de phosphonate avec une dose maximale de 3 ppm, à l'aide de 3(2+1) pompes doseuses dont le débit unitaire est de l'ordre de 155 l/h.



Figure IV.4 : Etape de prétraitement chimique

b. *Prétraitement physique*

C'est un traitement destiné à éliminer fondamentalement les éléments solides, les algues et la matière organique, par le passage de l'eau de mer à travers des filtres à sable et anthracite et à travers des filtres à cartouches.

Le mouvement de l'eau dans ces filtres est vertical, pénétrant par la partie supérieure du filtre et descendant à travers les couches filtrantes qui retiennent les matières solides dans sa partie inférieure. Des collecteurs munis de buses recueillent l'eau filtrée.

1. *Filtration à sable et anthracite*

Ce système illustré dans la figure ci-dessous (*Figure IV.5*) élimine la plupart des particules en suspension, huile et graisses qui restent dans l'eau de mer, Il est réparti en deux phases :

- *La première phase* : Constituée de 12 filtres horizontaux à sable et anthracite avec un diamètre $D=4\text{m}$ et une longueur $L=24\text{m}$
- *La deuxième phase* : Constituée de 8 filtres horizontaux à sable avec $D=4\text{m}$ et $L=24\text{m}$

Les deux types de filtres sont soumis à un système de lavage, il y'a un manomètre différentiel muni de contact électrique pour alarme, qui indiquera quand il sera nécessaire de nettoyer les filtres. Ce dernier s'effectue à contre-courant comme suit :

- Isoler le filtre à nettoyer en fermant toutes les vannes ;
- Baisser le niveau d'eau jusqu'au sable ;
- Barboter avec de l'air en utilisant des compresseurs ;
- Faire un lavage à contre-courant à l'aide des pompes centrifuges en refoulant de la saumure ;

- Faire une vidange des filtres vers un réservoir de stockage de sous-produits de lavage.



Figure IV.5 : Filtres à sable et anthracite

2. Filtration à cartouche

C'est une microfiltration assurée par des cartouches en polypropylène à membrane de 25 microns et d'un diamètre de 61mm, dans des réservoirs métalliques en position verticale qu'on appelle « filtre à cartouche ». Le nombre de ses derniers est de 9 filtres comportant 360 cartouches chacun (*Figure IV.6*). Son rôle est l'élimination des microorganismes pour la protection des membranes, entre le collecteur d'entrée et de sortie, il y'a un manomètre différentiel muni de contact électrique pour alarme, qui indiquera quand il sera nécessaire de remplacer les cartouches filtrantes. La période de remplacement varie de 3 à 6 mois.



Figure IV.6 : Filtres à cartouches

IV-1.2.2.3 Procédé osmose inverse

L'eau préfiltrée arrive au système de pompage de haute pression puis envoyée vers les membranes d'osmose inverse.

a. Pompe à haute pression

Avant d'entrée dans les membranes d'OI, l'eau prétraitée arrive au système de pompage de haute pression généralement entre 55 et 85 bars (*Figure IV.7*).

Les pompes se trouvant dans notre cas sont en nombre de 5 dont 4 sont fonctionnelles et une de secours, en fournissant une pression totale de l'ordre de 60 bars.



Figure IV.7 : Pompe à haute pression

Les caractéristiques de la pompe HP sont présentées dans le *tableau IV-2* suivant :

Tableau IV.2 : Caractéristiques des pompes à haute pression

Condition d'opération	
Débit	1055 m ³ /h
NPSH disponible	35 m
Hauteur manométrique (de conception)	60,5 m
Fluide à pomper	Eau de mer microfiltrée
Densité	1030 Kg/m ³
Température	Ambiante
Viscosité	1 cp
Fonctionnement	
Puissance	2101 KW
Vitesse	2990Rpm
Rendement	>85%
NPSH requis	17,5 m

b. Systèmes de membranes d'osmose inverse

L'installation se compose de quatre unités, chaque unité est répartie en deux châssis. Chacun de ses derniers comporte 152 tubes de pressions avec une pression de 60 bars (*Figure IV.8*).

Les tubes de pression sont disposés pour avoir un taux de conversion de 45%, Dans chaque tube sont placées 7 membranes spirales (SW 30 HRLE-400i) en polyamide aromatique avec un diamètre de 200 mm.



Figure IV.8 : Tubes de pression

IV-2.2.3.1 Récupération d'énergie

a. Présentation du système

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

Un nouveau concept de récupération fait ses preuves sur les installations de dessalement par osmose inverse et permet de récupérer 95% de l'énergie du rejet de la saumure, c'est le système d'échangeur de pression PX (Pressure Exchanger) de la compagnie américaine ERI.

Le principe de base est de transmettre la pression de la saumure à la même quantité d'eau de mer nouvelle entrant dans le circuit (Figure IV.9) et ainsi de réduire la taille de la pompe haute pression à un débit correspondant non plus au débit d'eau de mer (222 000 m³/j dans notre cas) nécessaire au bon fonctionnement des membranes, entraînant ainsi un gain important de puissance.

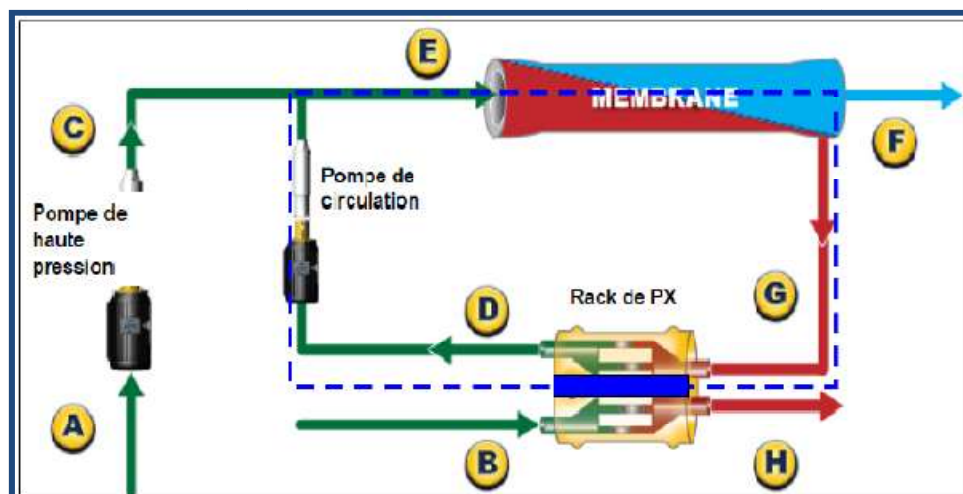


Figure IV.9 : Installation avec échangeur de pression PX(www.benisafwater.com).

Le rejet des membranes est dirigé vers le PX, qui transfère la pression du rejet à l'eau de mer, et la renvoie vers les membranes. Le PX fournit donc en eau prétraitée, l'énergie du concentrât qu'il reçoit.

Chaque châssis de membranes d'osmose inverse possède un système de récupération d'énergie avec 15 modules échangeurs de pression placés entre une conduite d'eau de mer en haut et une conduite de concentrât en bas (*Figure IV.10*).

La station de pompage fournit à l'installation la même quantité d'eau de mer ($9250 \text{ m}^3/\text{h}$) à 4 bars, mais seulement $4233,3 \text{ m}^3/\text{h}$ sont dirigés vers une pompe HP.

Le complément de $5016,7 \text{ m}^3/\text{h}$ est envoyé vers l'échangeur de pression PX qui transmet la pression de 58 bars, des $5087,5 \text{ m}^3/\text{h}$ de saumure à cette nouvelle eau de mer.

L'eau de mer montée à 57 bars sort de l'échangeur, récupère sur un booster en ligne les 3 bars qui lui manque pour rejoindre l'eau de mer sortant de la pompe haute pression et c'est bien un débit de $9250 \text{ m}^3/\text{h}$ à 60 bars qui entre dans le module d'osmose inverse.

La production est donc identique à savoir $4162,5 \text{ m}^3/\text{h}$ d'eau douce. La différence de $5087,5 \text{ m}^3/\text{h}$ revient vers l'échangeur pour fournir l'énergie à l'eau de mer. Cette dernière, après avoir cédé sa pression sort de l'échangeur vers le rejet à pression atmosphérique.



Figure IV.10 : Emplacement des échangeurs de pression

Le travail du rotor peut être vu comme deux longueurs de tuyaux en rotation. L'eau d'alimentation à basse pression entre dans un tuyau, puis transférée sur le côté haute pression du PX, grâce à la rotation du rotor. Au même temps, le rejet de la membrane à haute pression entre dans l'autre tuyau puis transféré vers le côté basse pression.

Du fait que la totalité du rotor soit composée de ces tuyaux, il existe en permanence un débit entre les côtés basse pression et haute pression du PX.

La zone étanche sur les couvercles se comporte tels des vannes (*Figure IV.11*). Dans le PX, au lieu que les vannes s'ouvrent et se ferment, les vannes sont fixes et ce sont les tuyaux qui se déplacent.

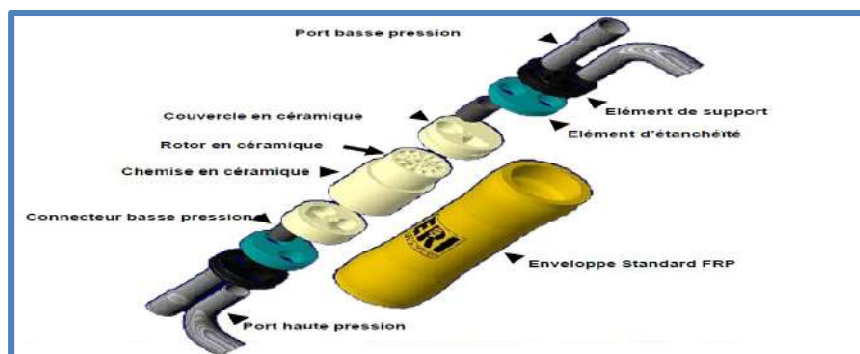


Figure IV.11 : Constitution d'un système PX(WWW.BENISAFWATER.COM).

b. Principe de fonctionnement du système

La figure ci- dessous (Figure IV.12) présente le principe de fonctionnement du Système PX :

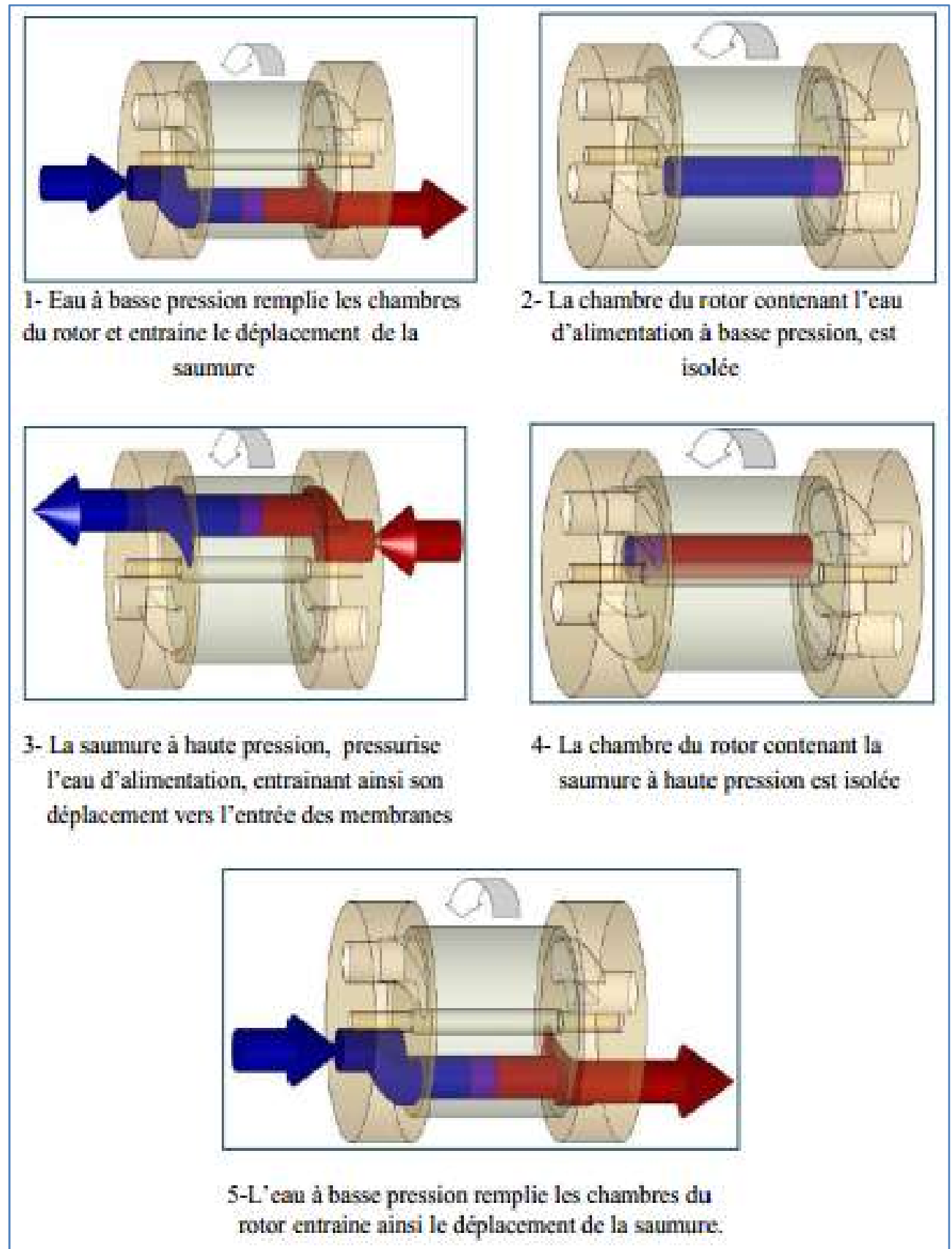


Figure IV.12 : Principe de fonctionnement du système PX(WWW.BENISAFWATER.COM).

c. Pompes BOOSTER

Chaque unité d'osmose inverse contient une pompe HP, deux châssis de membranes d'osmose inverse et deux pompes BOOSTER qui sont reliées à la pompe HP par le même axe de rotation (*Figure IV.13*)

La pompe BOOSTER sert uniquement à compenser les pertes de charges provoquées par les membranes et les PX. Le concentrât actionne la pompe BOOSTER pour aider la pompe à haute pression.



Figure IV.13 : Pompes BOOSTER

IV-1.2.2.3.2 Poste de nettoyage chimique

a. Lavage des membranes

Périodiquement les membranes doivent être nettoyées pour les débarrasser de tous les dépôts qui tendent à diminuer les performances qualitatives et quantitatives du système. Cette élimination est obtenue en faisant recirculer des solutions chimiques acides pour les dépôts de carbonate de calcium, d'hydroxydes métalliques et des solutions basiques pour les dépôts biologiques et bactériens.

L'injection de la solution de lavage dans l'eau de mer se fait dans trois points différents, avant :

- La pompe à haute pression
- Le système de récupération d'énergie
- Le châssis de membranes d'osmose inverse

L'efficacité relative d'une membrane est un paramètre qui sert d'indicateur pour guider le cycle de nettoyage. Il faut déclencher un cycle de nettoyage le plus tôt possible à chaque chute de débit de production normalisé et à chaque augmentation de la différence de pression normalisée de façon à limiter l'activité microbienne. Les fabricants des membranes suggèrent qu'un nettoyage soit fait lorsqu'une diminution du débit de filtrat de 10 à 15 % est observée le comportement de la solution pendant le nettoyage.

b. Conditions limites de nettoyage

- La température maximale et le pH recommandés par les fabricants des membranes doivent être respectés lors du rinçage au filtrat et des lavages chimiques.
- N'utiliser que des solutions compatibles avec les membranes.

- Utiliser un temps adéquat de nettoyage pour éviter le contact prolongé des produits chimiques avec les membranes.
- Respecter le débit et la pression nécessaires pour faire un nettoyage.
- Les modules sont installés en série, le rinçage et le lavage chimique doivent être réalisés de façon indépendante afin de maximiser l'efficacité de la solution de lavage et d'éviter que les agents colmatants retirés du premier module se retrouvent dans les modules subséquents.

Lorsqu'un appareil est arrêté pour une période de plus de 24 heures ou une panne dans le système, le châssis de membranes d'osmose inverse est alimenté avec le concentrât et des agents chimiques afin d'éliminer les microorganismes qui s'y trouvent. Lorsque la membrane est remise en fonctionnement, la procédure à suivre doit comprendre la vidange de la solution et un rinçage court.

c. Procédure de nettoyage des membranes

- Nettoyer le circuit de nettoyage (bâche, filtre...)
- Faire dissoudre les produits de nettoyage en agitant le mélange.
- Au cours de nettoyage, suivre le comportement de la solution et essayer de corriger les paramètres.
- Entre chaque nettoyage acide ou basique, rincer convenablement le circuit de nettoyage, et les membranes avec de l'eau osmosée jusqu'à atteindre son PH.
- Après chaque nettoyage il faut bien rincer les membranes avant de les mettre sous production.
- Au moment de la production il est préférable de jeter la première production au rejet.

IV-1.2.2.3.3 Rejet de saumure et produits chimiques

La saumure est récupérée dans un réservoir (*Figure IV.14*) et ensuite utilisée pour lavage des filtres à sable à contre-courant, puis acheminée vers un deuxième réservoir où elle sera évacuée par un émissaire marin pénétrant jusqu'à 1200 m dans la mer dans le but d'assurer une meilleure dilution et d'éviter les conséquences indésirables sur l'environnement.



Figure IV.14 : Bâtiment de la saumure

IV-1.2.2.4 Post-traitement

L'eau issue du traitement de l'osmose inverse est débarrassée de tous les minéraux, c'est-à-dire non consommable, une reminéralisation est nécessaire pour rendre cette eau potable.

L'injection automatique avec une dose de 25 ppm de CO₂ pour réduire le pH à une valeur proche de 5 qui permet de rendre plus efficace le processus de reminéralisation. Ce dernier est réalisé dans la chambre CO₂

L'eau est ensuite acheminée vers la tour de reminéralisation qui comporte à l'intérieur 32 lits de calcite (carbonate de calcium) de 2 m de hauteur (*Figure IV.15*), équipés par des tuyaux de distribution. A travers ces lits de calcite l'eau traitée passe et s'enrichit du carbonate de calcium qui se dissout dans l'eau pour atteindre le fond (réservoir) par un canal à l'intérieur de la tour. Après et à l'aide d'un doseur automatique, il y aura un ajout d'hypochlorite de sodium (15 l/h) à partir d'un tank (citerne) de capacité de 20 000 L.



Figure IV.15 : Lits de calcite

A l'aide des pompes l'eau traitée est pompée vers le réservoir de stockage afin de la distribuer par l'ADE.

La station de pompage de l'eau produite comporte 3 pompes de type centrifuge horizontale, de marque FLOWSERVE et modèle 14LPH34, dont deux sont en marche et une de réserve. Les Conditions opérationnelles et le Fonctionnement de ces pompes sont représentés dans le tableau ci-dessous (tableau IV-3).

Tableau IV.3 : Caractéristiques des pompes d'eau produite

Conditions opérationnelles	
Débit de conception	2 300 m ³ /h
Hauteur de liquide disponible	12 m
Hauteur manométrique	204 m.c.l
Fluide à pomper	Eau reminéralisée
Température	Ambiante
Densité	1000 Kg / m ³
Viscosité	1 cp
Fonctionnement	
Puissance (Débit nominal)	1 542 KW
Vitesse	1 485 rpm
Rendement	84%
NPSH requis	6,6 m

IV-2 Matériels et méthodes

Nous avons effectué vingt-huit (28) prélèvements au cours du mois d'Avril 2015 en vue d'une analyse physico-chimique, au niveau de trois points de la station :

- A l'entrée de la station (eau de mer) ;
- A la sortie de la station en deux points (eau produite après dessalement et eau rejetée (Saumure))

Nous avons donc mesuré des paramètres physico-chimiques tels que : pH, température, conductivité, TDS, Cl_2 , turbidité, dureté total, calcium, magnésium, alcalinité total, carbonate, bicarbonate, ainsi que d'autres paramètres tels que : Nitrite, Sulfate, Fer, Nitrates, chlorure, Potassium et le Bore.

Cette étude a été réalisée au niveau du laboratoire de contrôle de la qualité de cette station de dessalement.

IV-2.1 Prélèvement et échantillonnage

IV-2.1.1 Sites de prélèvements

La station de dessalement de l'eau de mer de Cap Djinet est dotée de plusieurs sites de prélèvements (*Figure IV.16*), à savoir :

- Au niveau du réservoir de l'eau de mer
- Avant la filtration à cartouche
- Avant l'étape d'osmose inverse
- Au niveau de réservoir de l'eau traitée
- Au niveau de réservoir de la saumure



Figure IV.16 : Sites de prélèvements

IV-2.1.2 Mode de prélèvement

Les échantillons d'eaux ont été prélevés en vue de l'analyse physico-chimique. Le prélèvement d'un échantillon d'eau pour l'analyse physico-chimique est soumis à la procédure suivante :

- Le contenant doit être propre, mais ne doit pas être nécessairement stérilisé, nous avons utilisé des bouteilles en plastique de 500 ml et de 1 litre et parfois des bouteilles en verre qui sont au préalable rincées avec de l'eau distillée au moins trois fois.
- Il faut laisser couler l'eau à un débit maximal pendant 5-10 secondes et ensuite 2-5 minutes à débit moyen avant de prélever un échantillon.
- Ouvrir l'emballage, le remplir et le fermer immédiatement.

IV-2.2 Méthodes d'analyse physico-chimique

Pour faire une étude qualitative de l'eau de mer traitée après le processus de dessalement, une analyse sensorielle des propriétés organoleptiques constitue un des premiers indices de la potabilité de l'eau traitée.

IV-2.2.1 Paramètres organoleptiques

a. Test de la couleur

Le contrôle de la coloration des échantillons prélevés au niveau du réservoir d'eau traitée se fait par simple observation de l'eau contenue dans des flacons de verre transparents.

b. Test de l'odeur et la saveur

L'odeur a été évaluée par sensation lors du prélèvement de l'eau, et après un stockage de 48 h des échantillons, de même que la saveur, par une simple dégustation par six dégustateurs.

c. Mesure de la turbidité

La mesure de la turbidité a été effectuée à l'aide d'un Turbidimètre (HACH, 2100Q) qui est étalonné d'avance à 0,02 NTU (*Figure IV.17*), L'échantillon sera analysé en utilisant des capsules en verre bien nettoyées et bien séchées, remplies de l'eau à analyser et le résultat est affiché en NTU (Nephelométic Turbidity Unit).



Figure IV.17 : Turbidimètre

IV-2.2.2 Paramètres physico-chimiques

IV-2.2.2.1 Mesure de la conductivité

La mesure de la conductivité se fait à l'aide d'un appareil multi-paramètres à sonde (HACH, sensION7) comme indiqué sur le *Figure IV.18*.



Figure IV.18 : Multi-paramètres à sonde

➤ Mode opératoire

Mettre l'appareil en marche ; étalonner le avec de l'eau distillée ; plonger ensuite la sonde tout en agitant légèrement dans un bécher qui comporte environ 100 ml de notre échantillon ; laisser stabiliser et lire ensuite la conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Il faut également rincer la sonde après chaque mesure.

Cet appareil nous a permis de mesurer La température et le TDS avec la même méthode.

IV-2.2.2.2 Mesure de la Température

Cette mesure de T° est effectuée sur les échantillons à l'aide d'un appareil multi-paramètres (Hach, SensION7) au niveau du laboratoire.

IV-2.2.2.3 Mesure du pH

La mesure du PH est faite avec un autre appareil à sonde (HACH, sensION3) en suivant le même mode opératoire que la conductivité.

IV-2.2.2.4 Mesure des MES

Les matières en suspensions caractérisent la teneur des éléments non dissous de diverses granulométries transportées par l'eau de mer. Ces matières peuvent être d'origine minérale ou organique.

➤ Mode opératoire :

On mesure la quantité de MES dans l'eau à l'aide d'une Hotte à filtre (Figure IV.19). On verse 1L d'eau dans le verre filtreur, ensuite l'eau est aspirée par une pompe et traverse le cercle glass microfibre filtre pesé déjà et qui retient les MES. On fait sécher le cercle glass dans l'étuve pendant 25min et on le pèse à nouveau. La quantité des MES est la différence de masse entre la masse initiale et la masse finale.



Figure IV.19 : La hotte à filtre

IV-2.2.2 .5 Mesure de l'Alcalinité

a. Titre alcalimétrique simple (TA)

Le titre alcalimétrique d'une eau correspond à la mesure des concentrations des ions carbonates (CO_3^{2-}) et des ions hydroxydes (OH^-) par la méthode titrage, 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 et un indicateur coloré.

➤ Matériels et Réactifs :

- Erlenmeyer
- Burette
- solution d'HCl (0.02N)
- solution de phénophtaléine 0.5 %

➤ Mode opératoire :

Dans un erlenmeyer de 250 ml, prélever 100 ml d'eau à analyser et ajouter 2 à 3 gouttes de phénophtaléine, une couleur rose est révélée suite au changement du pH qui s'avère inférieur à 8.3. Titrer et agiter avec la solution de HCl de 0.02N jusqu'à décoloration complète de la solution, dans le cas contraire le TA est nul. Les résultats sont exprimés par la formule suivante :

$$\text{TA (meq/l)} = (\text{N}_{\text{HCl}} \times \text{V}_{\text{HCl}}) \times 1000 / \text{V}_0$$

N_{HCl} : Normalité de HCl

V_{HCl} : Volume de HCl

V_0 : Volume de l'échantillon

b. 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.

➤ **Matériels et Réactifs**

- Erlenmeyer
- Burette
- solution d'HCl (0.02N)
- solution de phénophtaléine 0.2 %

➤ **Mode opératoire**

Prélever 100 mL d'eau à analyser dans un Erlenmeyer de 250 mL, ajouter 2 à 3 gouttes de solution de méthyle orange, une couleur jaune doit alors se développer. Titrer avec la solution de HCl de 0.02N à l'aide d'une burette, en agitant constamment, jusqu'au virage du jaune au jaune orangé (Ph = 4.3) de la solution.

Les résultats sont exprimés par la formule suivante :

$$\text{TAC (meq/l)} = (N_{\text{HCl}} \times V_{\text{HCl}}) \times 1000 / V_0$$

N_{HCl} : Normalité de HCl

V_{HCl} : Volume de HCl

V_0 : Volume de l'échantillon

c. Détermination des bicarbonates (HCO_3^-) et des Carbonates (CO_3^{2-})

Les carbonates sont les sels de l'acide carbonique, les sels ont en commun l'anion (CO_3^{2-}). Le carbonate le plus abondant est le carbonate de calcique (CaCO_3). Les bicarbonates sont des sels dérivés de l'acide carbonique qui contiennent l'anion (HCO_3^-).

La détermination de carbonate et de bicarbonate est faite selon le *tableau IV.4* suivant :

Tableau IV.4 : Détermination de CO_3^{2-} et HCO_3^- à partir du TA et TAC

	TA = 0	TA < TAC/2	TA = TAC/2	TA > TAC/2
OH	0	0	0	2 TA - TAC
CO_3^{2-}	0	2 TA	TAC	2 (TA - TAC)
HCO_3^-	TAC	TAC - 2 TA	0	0

IV-2.2.2.6 Mesure du chlore

La concentration en chlore peut être exprimée en chlore libre, chlore combiné et chlore total. La mesure du chlore libre est généralement la plus importante dans la plupart des applications possibles. La méthode au DPD permet de mesurer le chlore libre, combiné et total.

Les réactifs sont dans cette méthode fournis sous forme de pastilles afin de simplifier l'utilisation. Le chlore libre réagit avec la molécule DPD (Diéthyl-p-Phénylène-Diamine) afin de produire une coloration rose. L'intensité de cette couleur produite est proportionnelle à la concentration en chlore libre recherchée.

➤ **Matériels et Réactifs**

- Cuve propre
- Colorimètre
- Pipette graduée
- Pastille DPD (chlore).

➤ **Mode opératoire** (Méthode Colorimétrique)

On utilise un colorimètre, en choisissant la mesure du paramètre chlore libre. Mettre 10 ml de l'échantillon dans une cuve propre et la mettre dans le colorimètre et étalonner ce dernier à 0 mg/l ; et 10 ml de l'échantillon dans une autre cuve propre et ajouter une pastille de DPD (*Figure IV.20*), introduire la cuve dans le colorimètre et effectuer la lecture immédiatement. Le résultat (concentration du chlore libre) est exprimé en mg/l.



Figure IV.20 : Colorimètre

IV-2.2.2.7 Mesure de la Dureté Total (TH)

Appelée aussi le titre hydrométrique (TH), elle détermine la concentration en sel de calcium et de magnésium dissout dans l'eau. Elle se détermine par titrage par l'EDTA, à pH=10, en utilisant le NET (noir d'Eriochrome T), comme indicateur de fin de réaction. La méthode permet de doser la somme des ions calcium et magnésium.

➤ **Matériels et Réactifs**

- Fiole
- Burette
- solution de NaOH
- d'Eriochrome T (N.E.T)
- solution d'EDTA.

➤ **Mode opératoire**

Mettre dans un erlenmeyer 100 ml d'eau à analyser et ajouter 5 ml de la solution tampon de NaOH (pH = 9.5 à 10) et trois gouttes d'indicateur coloré NET (Noir d'Eriochrome). La solution se colore en rouge ou violet, à ce stade, un titrage par la solution d'EDTA(0,02 N), sous agitation jusqu'au virage au bleu permet de mesurer la TH(*Figure IV.21*).

Les résultats sont exprimés par la formule suivante :

$$TH = (N_{EDTA} \times V_{EDTA}) \times 1000 / V_0$$

N_{EDTA} : La normale de la solution EDTA

V_{EDTA} : Volume en millilitres, de la solution EDTA, utilisé pour le dosage

V_0 : Volume en millilitres, d'échantillon dosé



Figure IV.21 : Titrage par la solution d'EDTA

IV-2.2.2.8 Mesure de calcium (Ca^{2+})

Le calcium est présent dans les eaux de manière naturelle. Pour déterminer la dureté calcique on utilise l'EDTA comme complexant, le dosage se fait à un pH élevé (12-13).

L'indicateur utilisé est le Murexide qui est sensible aux seuls ions Ca^{2+} pour former un complexe rouge.

➤ Matériels et Réactifs

- Erlenmeyer
- Burette
- Solution de NaOH
- Murexide
- solution d'EDTA. 0.02 N

➤ Mode opératoire

Prélever 100 ml d'eau à analyser dans un erlenmeyer, et ajouter 5 ml de la solution NaOH (0.1N) et une pincée de Murexide, puis remuer soigneusement pour homogénéiser la solution, une couleur rose apparait. Un titrage par l'EDTA (0.02N) à lieu jusqu'au virage rose au mauve.

La dureté calcique est calculée par la formule suivante :

$$\text{Ca}^{2+} (\text{mg/l}) = (N_{\text{EDTA}} \times V_{\text{EDTA}}) \times 1000 / V_0 \times 20$$

N_{EDTA} : La normale de la solution EDTA

V_{EDTA} : Volume en millilitres, de la solution EDTA, utilisé pour le dosage

V_0 : Volume en millilitres, d'échantillon dosé

IV-2.2.2.9 Mesure de magnésium (Mg^{2+})

Le magnésium peut être estimé par la différence entre la dureté de l'eau et le calcium exprimé en CaCO_3

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

La dureté magnésienne est calculée par la formule suivante :

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

IV-2.2.2.10 Mesure de TDS

Les sels dissous totaux représentent une évaluation totale des sels minéraux contenus dans l'eau (en solution). Au niveau du laboratoire de la station de dessalement de Cap Djinet, la mesure de la concentration des solides dissous se fait par le rapport entre la conductivité ($\mu S/cm$) et la concentration ionique (ppm), qui s'exprime par :

*La conductivité en $\mu S/cm = K * TDS$ en ppm (partie par million)*

- Pour l'eau produite $K = 0,5$
- Pour l'eau de mer $K = 0,61$
- Pour la saumure $K = 0,7$

➤ Matériels et réactifs

- Un Becher.
- conductimètre

➤ Mode opératoire

Après avoir étalonné le conductimètre, mettre environ 100mL d'eau à analyser dans un bécher, dans lequel on plonge l'électrode du conductimètre pour mesurer le TDS, exprimé en mg/L.

IV-2.2.2.11 Détermination des résidus secs

L'élimination de l'eau par évaporation suivie de la pesée du résidu qui subsiste est un procédé simple permettant d'évaluer la teneur en matières dissoutes ou en matières totales (dissoutes et en suspension dans l'eau).

➤ Matériels et réactifs

- Fiole jaugée.
- Capsule en porcelaine, en verre borosilicaté ou de préférence.
- Balance permettant la pesée à 0,1 mg près.
- Étuve dont la température est réglable à $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou $180\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Eau distillée ou de qualité équivalente.
- Acide chlorhydrique dilué à environ 10 % (v/v).

➤ Mode opératoire

- Prélever dans une fiole jaugée, un volume d'échantillon connu (noté V).
- Nettoyer la capsule à l'acide chlorhydrique dilué tiède, puis à l'eau distillée. La sécher par passage à l'étuve à $180\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Faire évaporer progressivement la prise d'essai introduite dans la capsule.
- Laisser refroidir la capsule et son contenu presque jusqu'à la température ambiante, puis la placer dans un dessiccateur pendant 15 min environ et peser.

Le calcul du résidu sec à $180\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, se fait selon l'équation suivante :

$$RS(180^{\circ}\text{C}) = \frac{M1 - M0}{V} \times 1000$$

Où :

RS (180 °C) : le résidu sec à 180 °C $\pm$ 5 °C, en milligrammes par litre.

M1 : La masse de la capsule et de son contenu, après chauffage à 180 °C $\pm$ 5 °C, en milligrammes.

M0 : La masse de la capsule vide, en milligrammes.

V : Le volume de la prise d'essai en millilitres.

IV-2.2.3 Paramètres chimiques

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 Cap Djinet.

Les paramètres mesurés sont :

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

Le DR 5000 est un spectrophotomètre UV-VIS de haute précision, doté de toutes les fonctions nécessaires pour le travail quotidien d'un laboratoire de contrôle ou de recherche.

La qualité supérieure des composants optiques assurent des résultats précis et une durée d'utilisation accrue.

Le DR 5000 est également doté d'un support pour les tests en cuve. Un laser identifie la cuve insérée grâce à son code-barres (IBR = IntegratedBarcode Reading System). Le DR 5000 (*Figure IV.22*) commence la mesure automatiquement et affiche le résultat en mg/l. La mesure s'effectue sans autre manipulation.



Figure IV.22 : Spectrophotomètre DR 5000

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.23*) 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.



Figure IV.23 : 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.5). Les cuves sont à la fois des récipients de transport, des réactions et des mesures.

Tableau IV.5 : 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 Résultats et discussions

La présentation et la discussion des résultats de l'analyse de l'eau traitée est structurée selon trois volets, en référence du décret exécutif n° 09-414 correspondant au 15 décembre 2009 fixant la nature, la périodicité et les méthodes d'analyse de l'eau de consommation de l'eau humaine (J.O. n°75) à savoir: la description des paramètres organoleptiques des eaux de dessalement traitées, les paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle de l'eau, l'exploration des paramètres chimiques dont le profil en certains polluants tels que les nitrates et les nitrites, etc (Annexe 01). Ces paramètres sont évalués selon les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

Nous présentons aussi les résultats d'une comparaison de quelques éléments, entre l'eau de mer et la saumure, afin d'évaluer les concentrations de cette dernière.

IV-3.1 Résultats de l'analyse de l'eau produite par l'unité de Cap Djinet

IV-3.1.1 Paramètres organoleptiques

a. Couleur

Le changement de couleur d'une eau potable peut être le premier signe d'un problème de qualité. Les analyses des échantillons de l'eau traitée ont indiqué que cette eau est incolore et claire.

b. Odeur

La perception des substances responsables des odeurs est un critère indispensable aussi. Après traitement, l'eau devient inodore et ne présente aucune odeur désagréable.

c. Goût

L'eau traitée ne présente aucun goût étrange et donc se comporte comme une eau normale au goût.

d. Turbidité

La turbidité désigne la teneur d'une eau en particules en suspension organiques et/ou inorganiques qui la troublent.

La concentration maximale admissible, fixée par l'OMS est de 5mg /l. Dans notre cas les valeurs obtenues ne dépassent pas cette norme.

IV-3.1.2 Paramètres physico-chimiques

Les concentrations des différents paramètres physico-chimiques mesurées pendant la période d'échantillonnage (Annexe 02) sont structurées en quatre semaines en calculant la moyenne des concentrations sur 7 jours. Une valeur moyenne annuelle est présentée pour chaque paramètre.

Les résultats sont récapitulés dans le tableau (Tableau IV.6) suivant :

Tableau IV.6 : Les concentrations des paramètres physico-chimiques des échantillons analysés de l'eau produite

Eléments	Chlore libre	Dureté	Total des solides dissous	PH	Température	Conductivité	TAC	TA	Magnésium	Calcium
Unités	ppm	mg/l (CaCO ₃)	ppm		°C	µs/cm	ppm (CaCO ₃)	ppm (CaCO ₃)	mg/l (CaCO ₃)	mg/l (CaCO ₃)
1 ^{er} Semaine	0.42	69.88	306	8.39	18.6	615	60.21	60.07	9.81	60.07
2 ^{ème} Semaine	0.43	70.09	326	8.37	18.4	652	60.26	54.31	14.88	55.21
3 ^{ème} Semaine	0.4	69.61	334	8.37	18.8	668	60.05	59.77	9.88	59.63
4 ^{ème} Semaine	0.41	69.82	343	8.35	19.7	685	60.2	60.63	9.26	60.55
Moyenne mensuelle	0.42	69.85	327	8.37	18.6	655	60.17	58.92	10.96	58.84
Norme	< 5	> 65	150<TDS<500	6,5 à 8,5		< 1500	50 à 65		< 150	<75

IV-3.1.2.1 Chlore libre

Le chlore résiduel est le chlore resté libre après 30 minutes de contact ; il constitue une forme de sécurité pour traiter des petites contaminations éventuelles de l'eau. Le taux de chlore libre fluctue entre 0,40 et 0,43 ppm (*Figure IV.24*), avec une valeur moyenne mensuelle de 0,42 ppm. Cette valeur est largement inférieure à la valeur préconisée par l'OMS qui est de 5ppm.

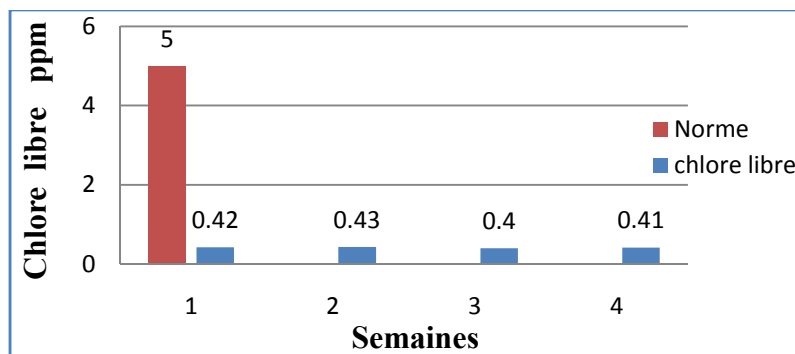


Figure IV.24: Variations mensuelles de la teneur en Chlore libre

IV-3.1.2.2 Dureté totale

La dureté de l'eau fait partie des paramètres utilisés pour déterminer la qualité générale d'une eau, causée par la présence de minéraux comme le calcium et le magnésium.

Dans les eaux étudiées (*Figure IV.25*), cet élément présente une dureté allant de 69,61 à 70,09 mg/l en CaCO_3 avec une valeur moyenne mensuelle de 69,85 mg/l. Les valeurs enregistrées s'avèrent supérieures à la valeur minimale admissible recommandée par les normes de l'OMS qui est 65 mg/l.

La présence des ions Ca^{2+} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3), soit la dissolution de formations gypseuses (CaSO_4).

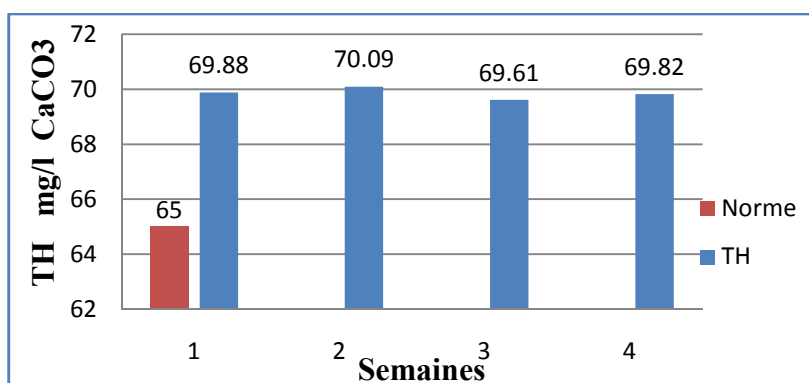


Figure IV.25: Variations mensuelles du titre hydrotimétrique

IV-3.1.2.3 Total des solides dissous (TDS)

Le total des solides dissous ou TDS représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau. Le TDS est composé de sels inorganiques et de quelques matières organiques.

Les résultats obtenus après l'analyse des eaux de consommation ont montré que le taux du TDS varie entre 306 et 343 ppm (*Figure IV.26*), soit une valeur moyenne mensuelle de 327 ppm. Les valeurs de TDS se révèlent conformes aux normes préconisées par l'OMS qui sont de 150 à 500 ppm dans les eaux traitées par dessalement.

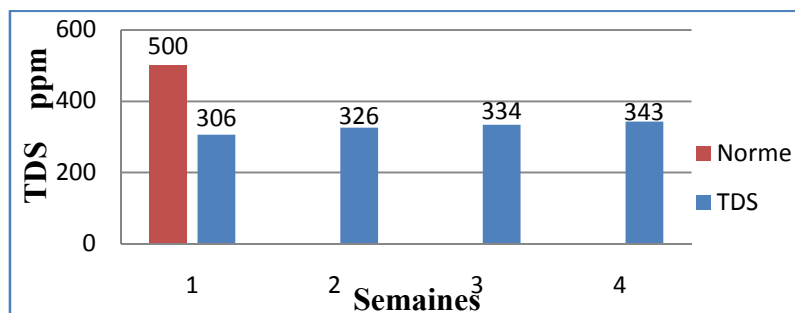


Figure IV.26: Variations mensuelles du Total des solides dissous

IV-3.1.2.4 Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14 avec 7 étant le pH de neutralité.

Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples, dont la température et l'origine de l'eau, il représente une indication importante en ce qui concerne l'agressivité de l'eau.

Les valeurs du potentiel Hydrogène des eaux traitées sont comprises entre 8.35 et 8.39 (*Figure IV.27*) avec une valeur moyenne mensuelle de 8,7. Se référant aux normes de qualité de l'eau potable, les valeurs du pH des eaux traitées sont conformes à la norme de l'OMS dont les valeurs sont fixées de 6,5 à 8,5.

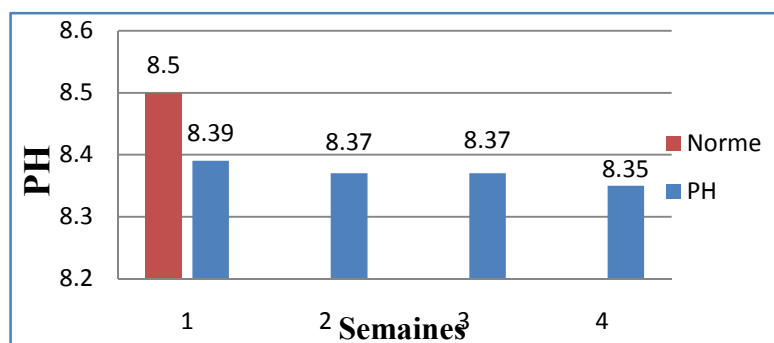


Figure IV.27: Variations mensuelles du potentiel hydrogène

IV-3.1.2.5 Température

C'est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet celle-ci joue un rôle dans la solubilité des gaz, dans la dissociation des sels dissous et dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et les mélanges éventuels, etc.

Les valeurs de température sont entre 18,4 et 19,7 °C. L'OMS ne mentionne aucune référence quant à la température de l'eau potable. Dans la zone d'étude, nous avons remarqué que la température indique les 18,9 °C.

IV-3.1.2.6 Conductivité électrique

La conductivité représente l'un des moyens de valider les analyses physico-chimiques de l'eau, en effet des contrastes de conductivité mesurés sur un milieu permettent de mettre en évidence des pollutions, des zones de mélange.

La conductivité est également en fonction de la température de l'eau, elle est plus importante lorsque la température augmente. Elle sert aussi d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau.

Les valeurs enregistrées pendant les analyses sont entre 615 et 685 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figure IV.28), avec une valeur moyenne mensuelle de 655 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Les valeurs de conductivité électrique pour l'eau de consommation sont conformes à la norme de l'OMS, dont les concentrations maximales admissibles sont respectivement inférieures à 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

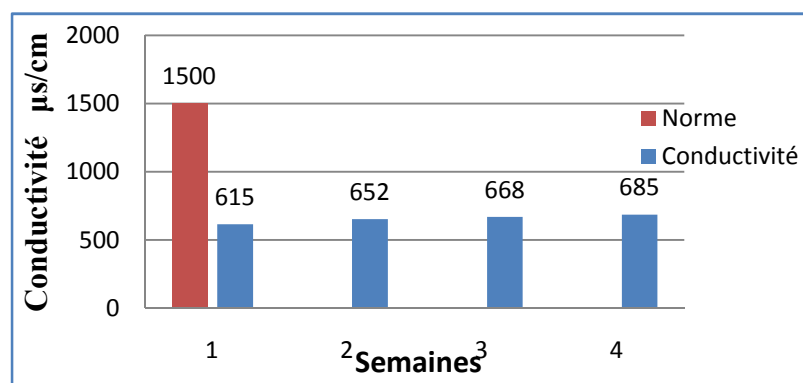


Figure IV.28 : Variations mensuelles de la Conductivité électrique

IV-3.1.2.7 Dureté calcique

Le calcium est présent dans les eaux de mer et contribue de façon importante à leur dureté. Les résultats montrent des valeurs comprises entre 55,21 et 60,55 $\text{mg}/\text{l CaCO}_3$ (Figure IV.29) avec une valeur moyenne mensuelle de 58,84 $\text{mg}/\text{l CaCO}_3$. Ces valeurs sont également conformes aux normes de l'OMS dont les concentrations maximales admissibles sont inférieures à 75 mg/l .

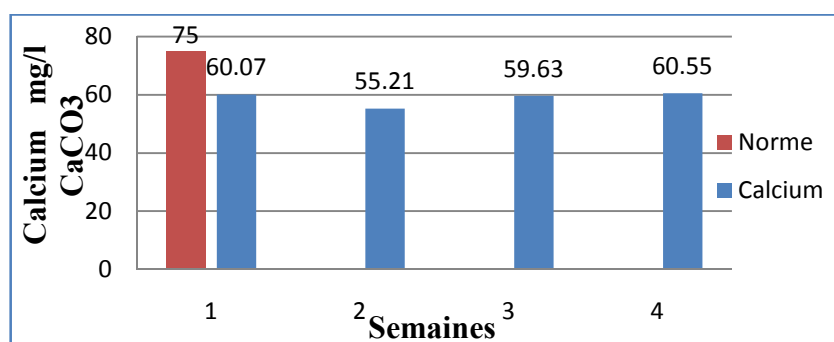


Figure IV.29: Variations mensuelles de la dureté calcique

IV-3.1.2.8 Dureté magnésienne

Le magnésium est présent dans toutes les eaux naturelles. Il s'agit d'un élément indispensable, en petites quantités, à tous les organismes vivants. Le magnésium contribue de façon importante à la dureté de l'eau. Une eau trop dure peut avoir des effets sur le fonctionnement et la durée de vie d'un système de plomberie et des appareils ménagers.

Les valeurs enregistrées pendant les analyses sont entre 9,26 et 14,88 mg/l en CaCO_3 (Figure IV.30), avec une valeur moyenne mensuelle de 10,96 mg/l.

Les valeurs de la dureté magnésienne pour l'eau de consommation sont conformes à la norme de l'OMS, dont les concentrations maximales admissibles sont inférieures à 150 mg/l en CaCO_3 .

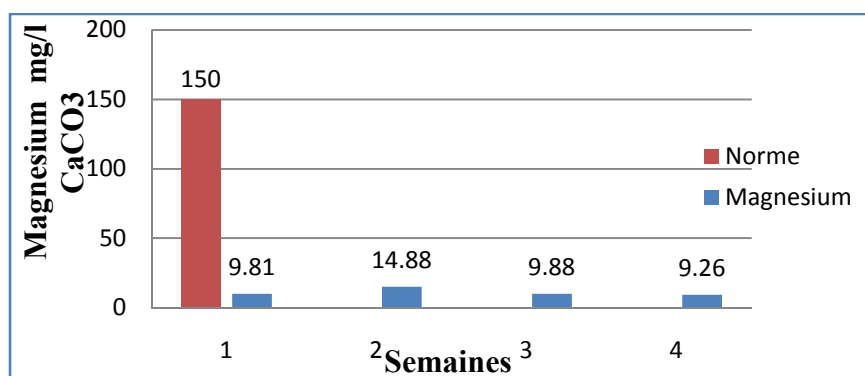


Figure IV.30: Variations mensuelles de la dureté magnésienne

IV-3.1.2.9 Titre alcalimétrique TA

Les résultats montrent des valeurs comprises entre 2,51 et 2,89 ppm CaCO_3 (Figure IV.31) avec une valeur moyenne mensuelle de 2,71 ppm en CaCO_3 . L'OMS ne mentionne aucune référence quant au titre alcalimétrique TA de l'eau potable.

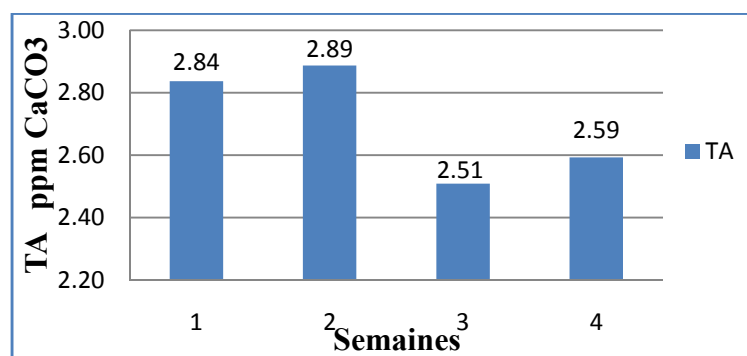


Figure IV.31: Variations mensuelles de l'Alcalinité totale

IV-3.1.2.10 Titre alcalimétrique complet TAC

L'alcalinité correspond à la présence d'espèces basiques telles que les ions hydrogène (OH^-), les ions carbonates (CO_3^{2-}) et les ions bicarbonates (HCO_3^-).

Nos résultats d'analyses montrent une présence du titre alcalimétrique complet qui varie entre 60,05 et 60,26 ppm (Figure IV.32) avec une valeur moyenne mensuelle de 60,17 ppm. Ces valeurs sont également conformes aux normes de l'OMS qui limitent le taux de titre alcalimétrique complet des eaux de consommation de 50 à 65 ppm en CaCO_3 .

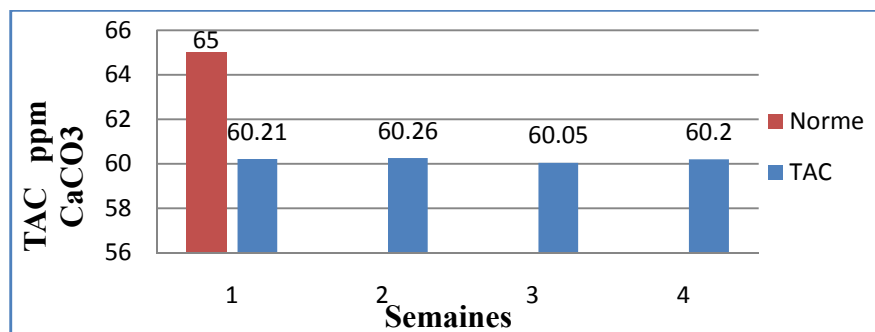


Figure IV.32: Variations mensuelles du Titre alcalimétrique complet

IV-3.1.3 Paramètres chimiques

Les concentrations des différents paramètres chimiques sont représentées dans le tableau IV.7 récapitulatif de la série de données effectuées pendant la période d'échantillonnage (Annexe 02).

Tableau IV.7 : Les concentrations des paramètres chimiques des échantillons analysés

Eléments	Bore	Chlorure	NITRITES	NITRATES	SULFATE	SODIUM	POTASSIUM	Fer
Unités	ppm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Semaine 1	0.8	162	2	33.8	60	40	13	0.1
Semaine 2	0.82	143	1.9	39.9	63	34	14.9	0.24
Semaine 3	0.84	152	1.2	36.9	67.8	42	12.6	0.19
Semaine 4	0.9	169	2.3	38.1	65.3	38	11.7	0.22
Moyenne	0.84	156.5	1.85	37.17	64.02	38.5	13.05	0.18
Norme	< 1	< 250	< 3	< 50	< 500	< 200	< 20	< 0,3

IV-3.1.2.1 Teneur en Bore

La concentration en Bore des échantillons analysés varie entre un minimum de 0,8 ppm et un maximum égal à 0,9 ppm (Figure IV.33). Selon le contrat d'achat de l'eau, la teneur en Bore doit être inférieure à 1 ppm, avec une valeur moyenne mensuelle de 0,84 ppm. Les concentrations quotidiennes obtenues ne dépassent pas les lignes directrices fixées par l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable.

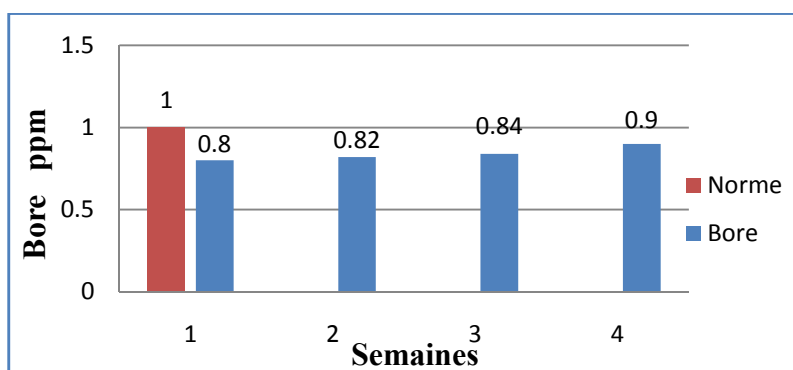


Figure IV.33: Variations mensuelles de la teneur en Bore

IV-3.1.2.2 Chlorures

Les chlorures sont très solubles dans l'eau, leurs éliminations sont difficiles et les méthodes classiques de traitement sont inefficaces. Les concentrations de chlorure dans l'eau peuvent augmenter pendant le traitement si on utilise du chlore pour la désinfection et des sels de chlore. Les eaux destinées à la consommation humaine, ont une teneur en chlorure inférieur à 250 mg/l (norme OMS).

Nos résultats d'analyses montrent une présence d'une teneur en chlorure qui varie entre 143 et 169 mg/l (*Figure IV.34*). Cette variation est due à l'étape de poste chloration qui enrichie également cette eau en chlorures.

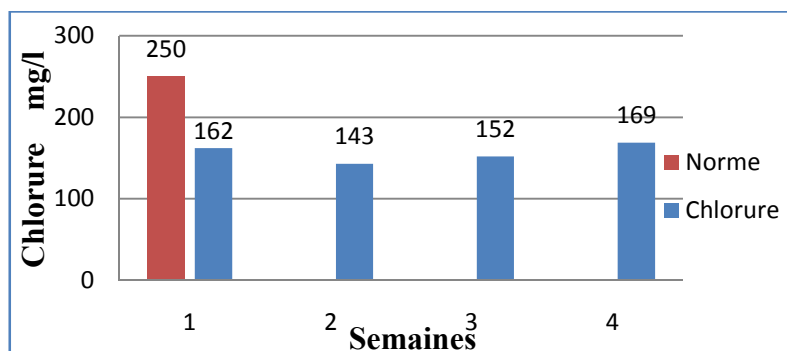


Figure IV.34 : L'évolution des chlorures en fonction du temps

IV-3.1.2.3 Nitrites

Les nitrites sont considérés comme étant des ions intermédiaires entre les nitrates et l'azote ammoniacal, ce qui explique les faibles concentrations rencontrées en milieu aquatique.

La mesure des teneurs en nitrites montre des valeurs de 1,2 à 2,3 mg/l, soit une valeur moyenne mensuelle de 1,85 mg/l (*Figure IV.35*). Ces valeurs restent relativement inférieures à la valeur recommandée en nitrites selon l'OMS, fixée à 3 mg/l.

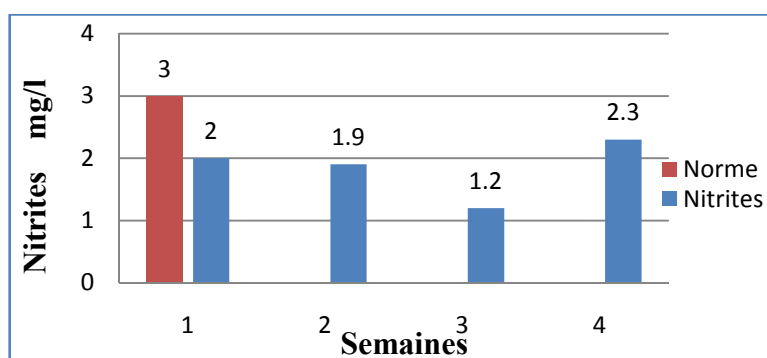


Figure IV.35: Variations mensuelles de la teneur en nitrites

IV-3.1.2.4 Nitrates

Les nitrates transformés en nitrites par l'organisme, peuvent provoquer la transformation de l'hémoglobine en "méthémoglobine" et provoquer un mauvais transfert d'oxygène vers les cellules. Cette pathologie peut affecter les nourrissons de moins de 6 mois. Le risque est très difficile à établir. Partant d'un principe de précaution, la norme de potabilité pour l'eau a été fixée à 50 mg/l. Au-delà de 100mg/l, l'eau ne doit pas être consommée.

Cependant les eaux traitées ne sont pas assujetties à un risque de pollution par les nitrates du fait que les valeurs enregistrées lors des analyses oscillent entre un minima de 33,8mg/l et un maxima de 39,9 mg/l (Figure IV.36) et qui restent d'ailleurs inférieures à la valeur admissible de la norme de l'OMS.

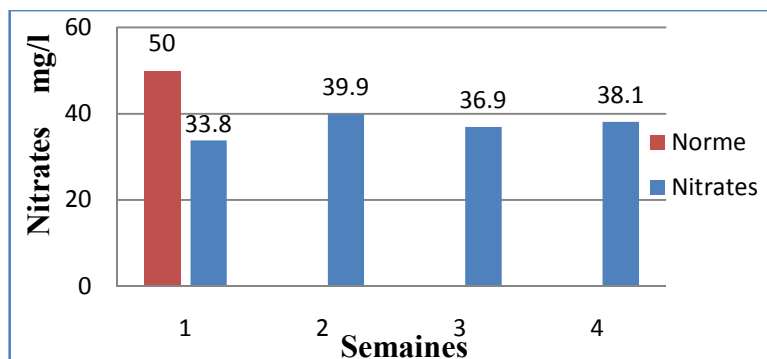


Figure IV.36: Variations mensuelles de la teneur en nitrates

IV-3.1.2.5 Sulfates

L'eau destinée à la consommation humaine, en raison de problèmes particuliers susceptibles d'introduire une gêne pour le consommateur (goût, corrosion). L'OMS recommande comme valeur limite inférieure 500 mg/l. Leur teneur élevée dans l'eau de boisson entraîne des nuisances d'ordre organoleptiques et sanitaires. En effet, ils provoquent des troubles gastro-intestinaux et peuvent donner un goût désagréable.

La présence des sulfates résulte de l'oxydation des sulfures répandus dans les roches. Notre eau a une teneur en sulfate qui varie entre 60 et 67,8 mg/l (Figure IV.37). Les teneurs élevées en sulfates dépendent généralement de l'étape de dosage de réduction du chlore par le bisulfite de sodium qui enrichie également cette eau en sulfate.

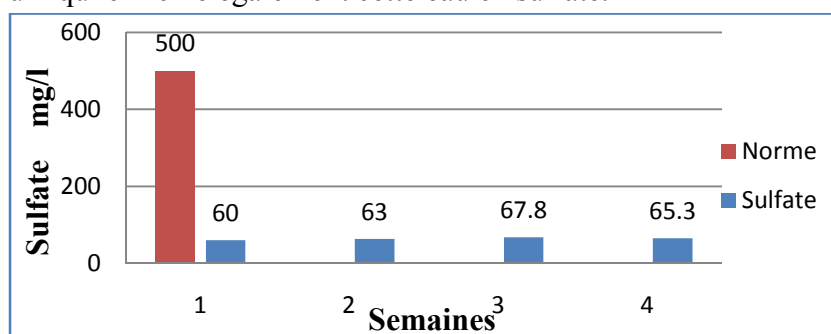


Figure IV.37: Variations mensuelles de la teneur en Sulfates

IV-3.1.2.6 Sodium

Il s'agit d'un élément indispensable, en petites quantités, à tous les organismes vivants. Une concentration élevée de sodium peut procurer à l'eau un goût sale. Le sodium présent dans l'eau potable peut avoir des effets nocifs sur la santé des personnes qui suivent un régime appauvri en sel.

Nos résultats d'analyses montrent une présence d'une teneur en sodium qui varie entre 34 et 42 mg/l (Figure IV.38) avec une valeur moyenne mensuelle de 38,5 mg/l. Ces valeurs sont également conformes aux normes de l'OMS qui limitent le taux de sodium des eaux de consommation à 200 mg/l.

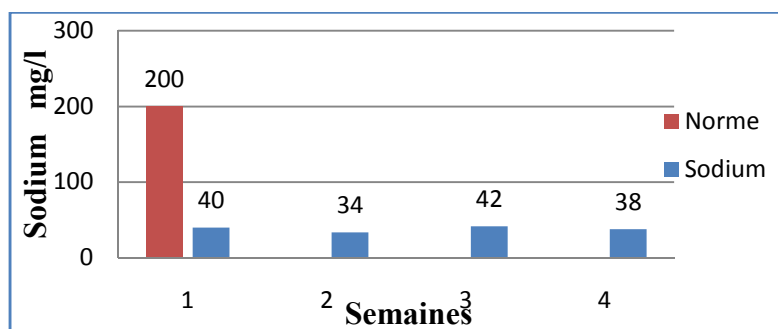


Figure IV.38: Variations mensuelles de la teneur en Sodium

IV-3.1.2.7 Potassium

Les sources les plus fréquentes de cet élément dans l'eau potable sont les systèmes de traitement de l'eau qui utilisent du chlorure de potassium. Il s'agit d'un élément indispensable, en petites quantités, à tous les organismes vivants.

Les effets nocifs associés à une concentration élevée de potassium dans l'eau potable sont peu probables chez les personnes en bonne santé. Le potassium peut en revanche avoir des effets nocifs chez les personnes atteintes de certaines maladies (p. ex. chez les personnes qui prennent des médicaments pour les maladies du cœur, des reins, les douleurs ainsi que les traitements pour le VIH).

La mesure des teneurs en potassium montre des valeurs variant de 11,7 à 14,9 mg/l, soit une valeur moyenne mensuelle de 13,05 mg/l (Figure IV.39). Ces valeurs restent relativement inférieures à la valeur recommandée selon l'OMS, fixée à 20 mg/l.

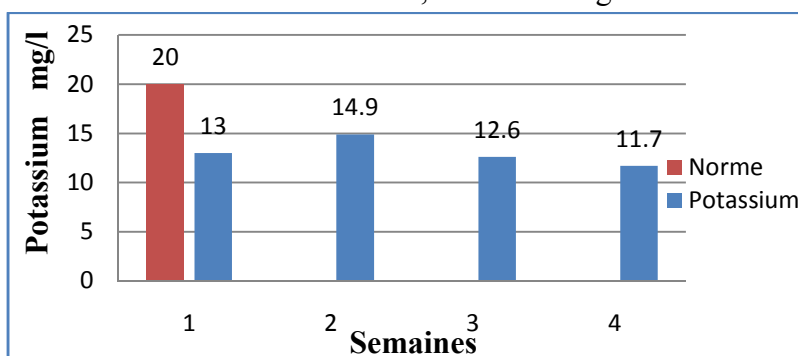


Figure IV.39: Variations mensuelles de la teneur en Potassium

IV-3.1.2.8 Fer

Les concentrations des eaux traitées en Fer varient de 0,1 à 0,24 mg/l (Figure IV.40), soit une teneur moyenne mensuelle de 0,18 mg/l. L'OMS ne mentionne aucune référence quant à la valeur admissible en Fer dans l'eau potable. Ces valeurs sont inférieures à la norme algérienne de potabilité de l'eau qui est de 0.3mg/l.

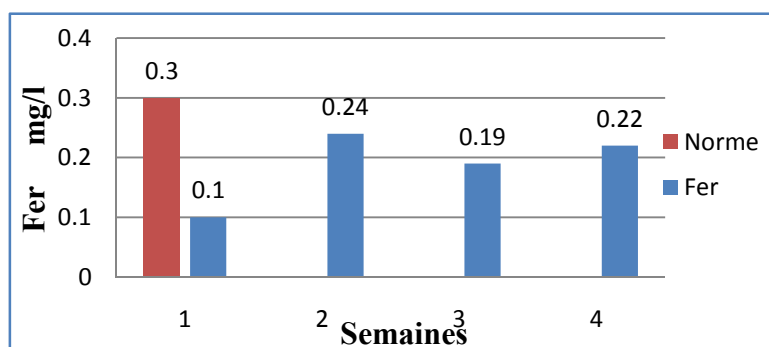


Figure IV.40: Variations mensuelles de la teneur en Fer

❖ Discussions des résultats des paramètres chimiques et physico-chimiques

Dans le cas général, les résultats répondent aux normes de qualité physico-chimiques. Le profil en certains cations et anions spécifiquement le calcium, le magnésium et les sulfates témoigne d'une diminution notable quant aux besoins de l'organisme et les normes OMS. Il serait nécessaire de corriger cette teneur lors de la reminéralisation.

La dureté de l'eau est essentiellement due à la présence de calcium et de magnésium. Sur le plan composition de l'eau dessalée, les teneurs respectives en calcium et magnésium, éléments essentiels pour notre corps, se sont révélées très faibles vis-à-vis d'une consommation équilibrée, sachant que ces deux éléments peuvent être fournis à notre organisme par la nourriture, même si certains régimes riches en calcium et magnésium peuvent ne pas être capables de compenser leur absence ou déficience dans l'eau potable. Les besoins de consommation en eau augmentent avec l'âge du consommateur et son environnement, pendant la grossesse et l'allaitement, et sont affectés par des états pathologiques tels que le diabète insipide ou les maladies de sueurs profuses (OMS, 1978).

Le calcium, un composant des os et des dents, joue un rôle dans la contractilité cardiaque et musculaire, la transmission de l'information intracellulaire et à la coagulation du sang. D'un autre côté, le magnésium joue un rôle important en tant que cofacteur ou activateur de plus de 300 réactions enzymatiques incluant la glycolyse, le métabolisme de l'ATP, l'excitabilité musculaire et la contraction musculaire, etc. Un manque en magnésium augmente le risque pour diverses conditions pathologiques telles que l'hyper-tension, l'arythmie cardiaque et la possibilité de diabète de type II.

Un manque à la fois de calcium et de magnésium peut également entraîner certains types de cancers. Par ailleurs, noter qu'une « eau dure », n'étant pas aussi corrosive que l'eau « douce » risque moins de se charger, lors de son passage dans les canalisations en certains métaux potentiellement nocifs tels que le plomb, le cadmium, etc.

De façon générale, les résultats de notre étude montrent que les caractéristiques physico-chimiques de l'eau produite par la station de cap Djinet sont conformes aux normes de l'OMS à la norme Algérienne (Annexe 04) et peuvent répondre aux besoins des consommateurs. Par ailleurs, des résultats similaires ont été rapportés dans une étude réalisée au niveau de la station de dessalement de Honaine de Tlemcen, en utilisant le même procédé de dessalement, à savoir l'osmose inverse. En effet, les caractéristiques physico-chimiques obtenues au niveau de cette station sont très proches de nos valeurs, particulièrement celles qui concernent la

composition en calcium et magnésium où des valeurs inférieures aux besoins nutritionnels ont été observées. Il est important de rappeler que des valeurs respectant les normes de l'OMS ne traduisent pas forcément une très bonne qualité de l'eau produite. En effet, selon Membratéc (Membratéc, 2008), une entreprise Suisse qui conçoit, construit et commercialise des installations de traitement d'eau par procédés membranaires pour la production d'eau potable, la teneur en chlorure inférieure à 20 mg/l serait idéale sachant que selon l'OMS, la norme est fixée aux environs de 250 mg/l. Il en est de même pour les nitrates où la norme selon l'OMS est de l'ordre de 50 mg/L alors que selon Membratéc, une eau idéale ne devrait pas dépasser 25 mg/l.

IV-3.2 Résultats et discussions de l'analyse de l'eau de mer et de la saumure

Les résultats des analyses chimiques et physico-chimiques de l'eau de mer et de saumure pour les échantillons prélevés le même mois que l'eau traitée (Annexe 03 et 05) sont présentés dans le tableau IV.8 suivant :

Tableau IV.8 : Les concentrations des paramètres chimiques et physico-chimiques de l'eau de mer et de la saumure

Paramètres	TDS	PH	Conductivité	T	Turbidité	FER	MES	Résidus sec à 180 °C	Chlore total
Unités	g/l		µs/cm	°C	NTU	mg/l	mg/l	g/l	mg/l
Eau de mer									
Semaine 1	35.31	8.18	55.51	15.79	2.46	0.14	9.37	37.8	0.02
Semaine 2	35.54	8.2	55.87	15.17	1.76	0.13	6.63	38.6	0.02
Semaine 3	35.96	8.19	56.43	16.19	0.82	0.14	6.34	39.1	0.02
Semaine 4	36.11	8.19	56.7	16.66	0.95	0.13	7.29	40	0.02
Moyenne mensuelle	35.73	8.19	56.13	15.95	1.5	0.14	7.41	38.9	0.02
saumure									
Semaine 1	68.1	7.93	92.03	16.73	0.54	0.05	2.56	70,31	0.03
Semaine 2	68.38	7.9	92.41	15.84	0.57	0.05	2.8	70,89	0.04
Semaine 3	68.61	7.91	92.71	16.17	0.49	0.05	2.96	71,32	0.03
Semaine 4	68.27	7.91	92.26	17.1	0.54	0.05	2.99	71,19	0.03
Moyenne mensuelle	68.34	7.91	92.35	16.95	0.53	0.05	2.83	70,93	0.03

IV-3.2.1 Total des solides dissous

La valeur moyenne de TDS est élevée pour l'eau de mer ainsi que la saumure (*Figure IV.41*), elle varie de 35,31 à 36,11 g/l pour l'eau de mer et de 68,1 à 68,61 pour la saumure, avec des valeurs moyennes mensuelles respectivement de 35,73 g/l et 68,34g/l, cela est due à la forte présence d'ions dans l'eau de mer.

Le TDS de la saumure est élevé d'environ deux fois de plus par rapport à celui de l'eau de mer, ce qui montre la capacité de traitement du procédé d'osmose inverse.

A partir des valeurs moyennes mensuelles de TDS des deux eaux, on déduit que le taux rejeté est de l'ordre de 91,27%. Ce dernier est légèrement inférieur à la valeur pour laquelle le

système d'osmose inverse est conçu et qui est de 99%, nous l'expliquons par un colmatage négligeable des membranes.

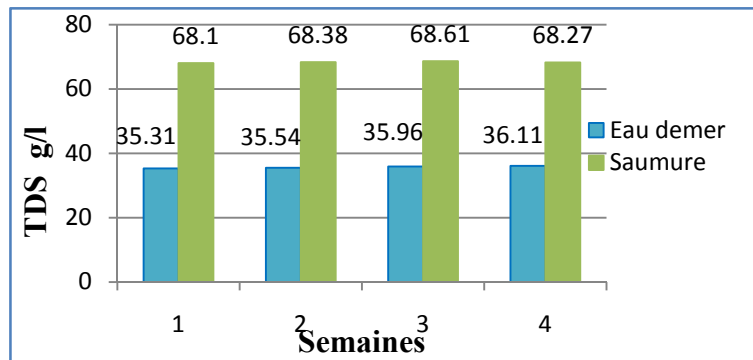


Figure IV.41 : Variations mensuelles du TDS pour l'eau de mer et la saumure

IV-3.2.2 PH

Le pH des eaux de mers n'est pas fixe car leur contenu en carbone varie. Le PH des eaux superficielles est généralement compris entre 8,18 et 8,2 (Figure IV.42). Il peut s'élever à 8,5 quand la consommation du carbone par l'activité photosynthétique est forte.

En revanche le PH de la saumure est compris entre 7,9 et 7,93 avec une moyenne mensuelle 7,91. On remarque une légère différence entre le PH de l'eau de mer et celui de la saumure qui est due au transfert d'ions H^+ dans les membranes d'osmose inverse.

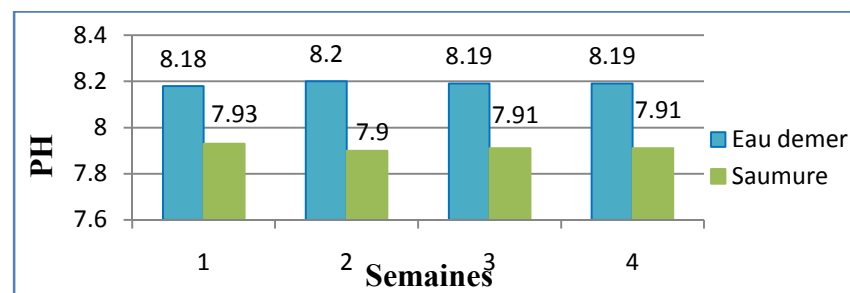


Figure IV.42: Variations mensuelles du PH de l'eau de mer et de la saumure

IV-3.2.3 Conductivité

Nous constatons facilement sur la (Figure IV.43) que les valeurs de la conductivité sont élevées pour l'eau de mer avec une valeur moyenne mensuelle de 56,13 $\mu S/cm$ et beaucoup plus pour la saumure avec une valeur de 92,35 $\mu S/cm$, cela est due à la forte présence d'ions liés contenus dans ces eaux.

Nous retenons que la conductivité est directement proportionnelle à la quantité des solides dissous dans l'eau. Ainsi plus la concentration en solide dissout sera importante, plus la conductivité sera élevée.

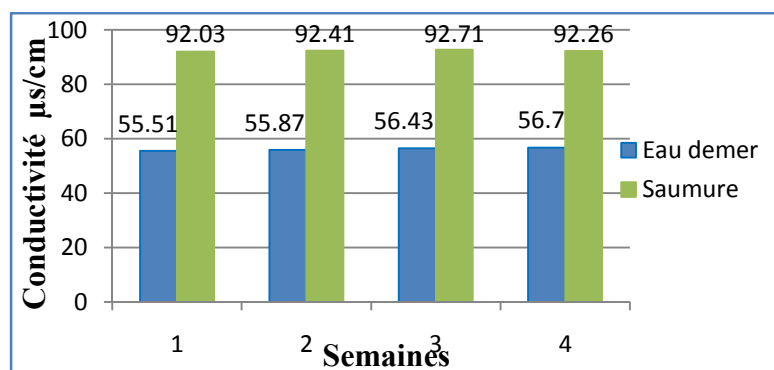


Figure IV.43 : Variations mensuelles de la conductivité de l'eau de mer et la saumure

IV-3.2.4 Température

La température moyenne varie de 15,17 à 16,66 °C pour l'eau de mer et de 15,84 à 17,46 °C pour la saumure (Figure IV.44). Nous constatons donc une petite variation de température moyenne mensuelle qui est de 0,85 °C, cela est dû à l'énergie mécanique nécessaire pour le processus de dessalement qui est l'osmose inverse.

Cette élévation de température favorise l'activité ionique, d'où on peut expliquer les variations de la conductivité citée plus haut.

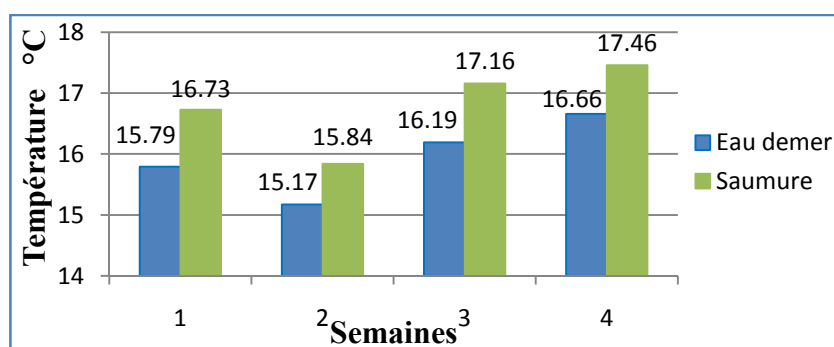


Figure IV.44 : Variations mensuelles de la température de l'eau de mer et la saumure

IV-3.2.5 Turbidité

La Figure IV.45 ci-dessous montre que La turbidité de l'eau de mer (0,82 NTU à 2,46 NTU) et saumure (de 0,49 NTU à 0,54 NTU) sont faibles, notons que ce paramètre physique peut changer au cours du temps.

La turbidité de la saumure est inférieure à celle de l'eau de mer, cela nous renseigne sur l'efficacité de l'étape de prétraitement.

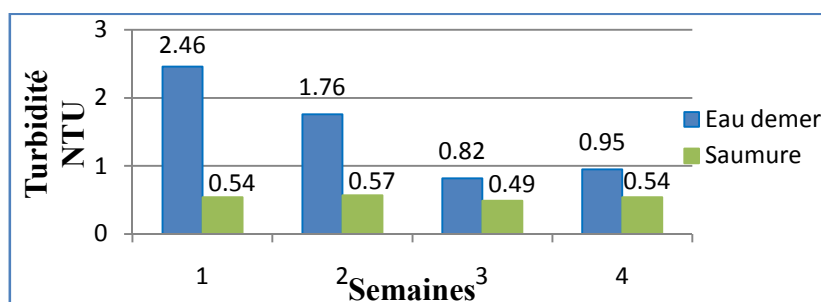


Figure IV.45 : Variations mensuelles de la turbidité de l'eau de mer et la saumure

IV-3.2.6 Fer

Le fer est un élément métallique présent dans l'eau de mer avec une teneur qui varie entre 0,13 et 0,14 mg/l (*Figure IV.46*) tandis que dans la saumure on note une valeur stable qu'est de 0,05 mg/l. Cette variation est due à la passation du fer à travers les membranes qui retient une quantité minimale du fer.

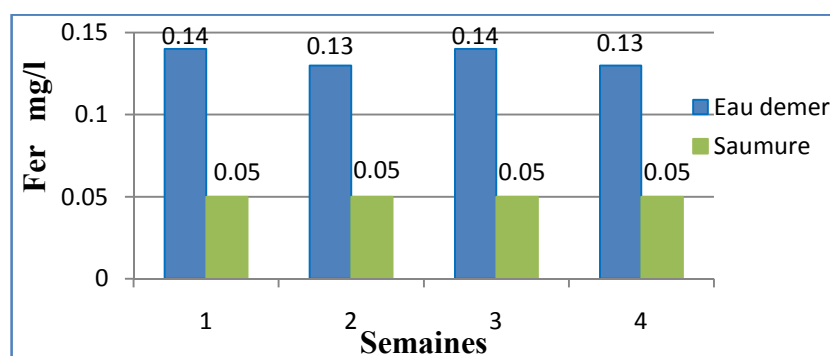


Figure IV.46: Variations mensuelles de la teneur en fer de l'eau de mer et la saumure

IV-3.2.7 Matières en suspension

La Figure IV.47 montre que le taux de MES pour l'eau de mer est de 6,34 à 9,37 mg/l avec une valeur moyenne mensuelle de 7,41 mg/l, cette dernière est inférieure dans la saumure qui ne dépasse pas une valeur de 2,99 mg/l.

On déduit que les MES sont arrêtés dans le système de filtration, d'où une protection sûre contre le colmatage des membranes d'osmose inverse.

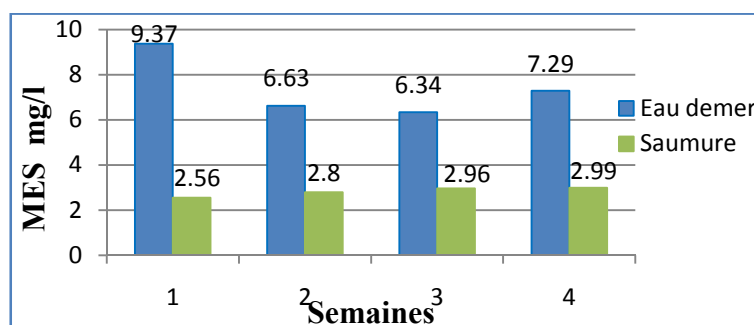


Figure IV.47 : Variations mensuelles de MES de l'eau de mer et la saumure

IV-3.2.8 Résidus sec à 180 °C

Les concentrations en résidus secs sont de 37,84 à 39,99 g/l pour l'eau de mer et de 70,31 à 71,32 g/l pour la saumure (*Figure IV.48*), ces valeurs sont élevées pour les deux eaux, c'est due à la forte présence des minéraux dissous, des minéraux non dissous et des matières organiques.

On remarque une augmentation de la concentration moyenne mensuelle des résidus secs pour la saumure d'une valeur de 32,06 g/l par rapport à l'eau de mer, ce qui montre l'efficacité du procédé étudié pour éliminer les résidus secs.

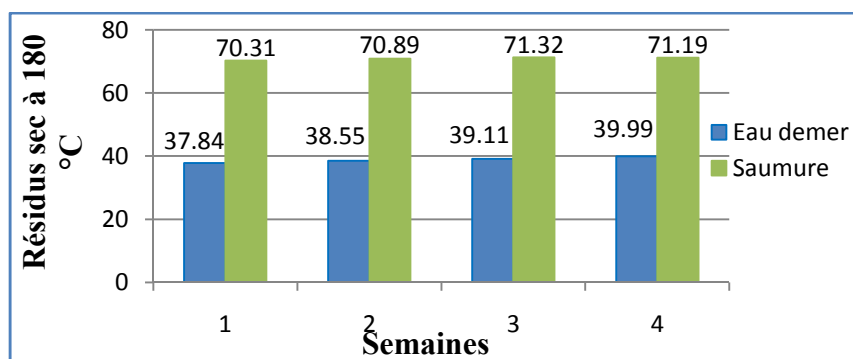


Figure IV.48 : Variations mensuelles des résidus secs

IV-3.2.9 Chlore total

Nous remarquons des valeurs faibles en chlore total pour les deux eaux, elle est de 0,02 pour l'eau de mer et varie de 0,03 à 0,04 pour la saumure (Figure IV.49). On remarque une petite variation du taux de chlore entre les deux eaux, cela est dû à l'injection de bisulfite de sodium avant et après la microfiltration afin de limiter le colmatage des membranes d'osmose inverse.

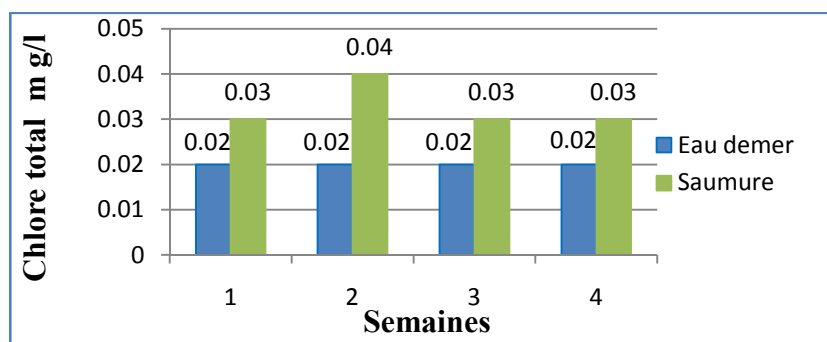


Figure IV.49 : Variations mensuelles du chlore total

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Le dessalement est un enjeu particulièrement important pour l'avenir des régions sujettes aux pénuries d'eau. C'est une méthode d'avenir pour pallier aux problèmes d'eau douce. Elle permet une utilisation et une gestion économe des ressources en eau et la mise en œuvre de moyens appropriés pour faciliter l'accès à l'eau potable.

Le procédé de dessalement de l'eau de mer par osmose inverse a connu un grand développement et présente beaucoup d'avantages. Sur le plan environnemental, il fonctionne à basse température, ce qui prévient une pollution thermique. Sur le plan énergétique, Ce procédé utilise principalement de l'énergie électrique; il est relativement simple et plus performant, avec une récupération d'énergie du concentrât de 95 %.

Dans la station de dessalement, les étapes de prétraitement utilisées garantissent le bon entretien de l'équipement de la station, produisant une eau douce de bonne qualité et présente une conformité aux normes OMS

Ces résultats montrent bien, l'intérêt de l'implantation de cette station pour résoudre le problème de pénurie en eau potable de la ville de Boumerdes et même les villes limitrophes.

La saumure comparativement à l'eau de mer présente une salinité beaucoup plus élevée, ce qui est l'inconvénient majeur du dessalement.

A l'heure actuelle, le dessalement d'eau de mer à travers notre pays se fait par les mêmes procédures que celles de la station de Cap Djinet. Il serait alors intéressant de souligner les recommandations suivantes :

- ✓ Restituer à l'eau de façon équilibrée les minéraux en phase de reminéralisation. Sachant qu'une eau faiblement minéralisée est plus corrosive pour la tuyauterie.
- ✓ Aussi, recourir à une eau de dessalement pour alimenter une région devra être pris avec la plus grande prudence et après une étude approfondie de l'apport total de minéraux dont bénéficie la population cible. L'idéal serait d'entreprendre des études épidémiologiques occasionnelles, en vue de mesurer les effets que peut avoir sur la santé.
- ✓ les saumures doivent impérativement passer un contrôle exhaustif de toxicité qui tient compte des caractéristiques du système récepteur et prêter une attention particulière à la dilution du concentrât.

Références bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALGERIENNE DES EAUX (ADE), rapport, 2007.

AMICAL DES INGENIEURS DU GENIE RURAL MAROC (AIGR), Le dessalement des eaux : Une opportunité pour les régions en pénurie d'eau, séminaire international, Mai 2009.

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.

ARZATE, A., Procédé de séparation membranaire et leurs applications dans l'industrie alimentaire, Revue de littérature, Centre de recherche, de développement et de transfert technologique acéricole inc, référence 642-RVL-0508, Saint-Norbert d'Arthabaska, 2008.

ATALLAH, A., Procédé de dessalement et qualité physico-chimique de l'eau dessalée de la station HONAIN. Mémoire de fin d'étude, Master, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 99 pages, 2014.

BAKALOWICZ, M., Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée, Corse, 1999

BECHKI, D., Etude comparative et optimisation des procédés de distillation solaire en vue de la production d'eau potable dans les zones arides sahariennes, Thèse de doctorat en génie mécanique, Université Hadj Lakhdar Batna, 2011.

BOULNOUAR, N., 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.

BOYE, H., Eau, énergie, dessalement et changement climatique en Méditerranée, Etude réalisée pour le Plan Bleu, 2008

BRIBIESKA, A., Colmatage des membranes par les minéraux et les protéines en cours d'électrodialyse conventionnelle, Collection des thèses et mémoires électroniques, 2005.

BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES (BRGM), Quelles techniques pour quels traitements- analyse coûts, bénéfices, Rapport BRGM/ RP-58609-FR, Orléans, France, Juin 2010.

CASTAING, J. B., Procédés de traitement de l'eau de mer en conchyliculture pour la sauvegarde et le maintien de la qualité des mollusques bivalves, Thèse de doctorat, Université de Nantes, septembre 2011.

CHENAOU, 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.

COLLOQUE SHF, Gestion sociale et économique de l'eau, conférence grand public et professionnels, Paris, 17 et 18 octobre 2007.

DANIS, P., Dessalement de l'eau de mer, Technique de l'ingénieur, Traité génie des procédés référence ; J 2700-18, 2003.

DUNGLAS, J., Le dessalement de l'eau de mer, une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau, Groupe eau, Note de travail N°4, Académie d'agriculture de France, 2014.

HABET, L., Contribution à l'étude des impacts du dessalement des eaux de mer sur l'environnement, Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara Boumerdes, 153pages, 2012.

HADJALI, Y., Impact des stations de dessalement de l'Eau de mer sur le littoral cas de la station plage El Hilel Ain Timouchent, Mémoire de fin d'études, Master, Université bou Bekr belkaid Tlemcen, 91 pages, 2012.

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.

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.

HERVÉ, M., Composition et Salinité de l'eau de mer, pp.1-8, mars 2014.

HASLAY C. et LECLERC H., Microbiologie des eaux d'alimentation, technique et documentation, édition Lavoisier, Paris, 1993.

LATTEMANN, S., Le dessalement est-il écologique, Dossier spécial - par Sabine Lattemann, mensuel n°421, page 62, juillet 2008.

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.

LE CALVÉ, O., Propriétés Physiques du Milieu Marin, Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var, France, 40pages, mai 2002.

MANDRI, Y., Etude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide, Thèse de doctorat, génie des procédés, université Claude Bernard Lyon1, n°d'ordre : CT12, 2011.

MAUREL, A., Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, 2eme édition, TEC & doc. 286p, 2006.

MONIQUE, H., Les eaux naturelles et les eaux de consommation, Saint Laurent, 1991.

MORSLI, M, S., Impacts des arrêts Techniques de l'usine de dessalement de l'eau de mer sur l'entreprise et l'environnement, Mémoire de Magister en Management, Université d'Oran, 203 pages, 2013.

MOULIN, B., Le kayak et la mer, édition le Canotier, 2004.

PLAN D'ACTION POUR LA MEDITERRANEE, Réunion des Coordonnateurs nationaux pour le MED POL, San Gemini, Italie, 27 - 30 mai 2003.

RENAUDIN, V., Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, Revue, Nancy Braboïs : Educsol, 18 novembre 2003.

SAGNE, C., Etude des mécanismes de transfert de molécules organiques en osmose inverse, Thèse de doctorat, Spécialité génie des procédés, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech), 2008.

SALOMON, J., Le dessalement de l'eau de mer est-il une voie d'avenir?, Magazine de Géographie et Aménagement du territoire, paragraphe 1, Centre d'études de Géographie et Aménagement du Territoire, pp. 237-262, 2012.

SAVARY P, Guide des analyses de la qualité de l'eau, territorial éditions, pp75-115, 2010

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.

TANSAKUL, C., Procédés hybrides à membranes pour le prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 182 pages, 2009.

TRIKI, Z., Etudes, Analyses et Optimisation de la Consommation énergétique des Unités de Dessalement pour les Sites Isolés, Thèse de doctorat, Spécialité génie climatique, Université Constantine 1, 2014.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP), Dessalement de mer dans les pays méditerranéens, Plan d'action pour la méditerranée, Réunion des Points Focaux du PAM Athènes, 11-14 septembre 2001.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP), Impacts environnementaux du dessalement d'eau de mer, Posté par Jean-Luc Dothee, 17 février 2003.

WEBOGRAPHIE

<http://fr.slideshare.net/cameleonxavihernandez2012/pnue-dessalement-eaudemerpaysmediterraneens> (fr.slideshare.2012)

<http://www.ecotoxicologie.fr/Dessalement.php> (ecotoxicologie.fr.2014)

<http://www.actu-environnement.com/ae/news/wwf/dessalement/rapport/2913.php4> (WWF, 2007)

http://www.encycloecolo.com/Dessalement_d%27eau_de_mer#L.27impact_environnemental_du_dessalement (encycloecolo.com. 2014)

<http://www.ade.dz/index.php/projets/dessalement>

www.benisafwater.com

www.membratec.com

Annexes

« Art. 4. — Les données et résultats visés à l'article 2 ci-dessus, ainsi que leurs interprétations peuvent être utilisés par l'agence nationale pour la valorisation des ressources en hydrocarbures (ALNAFT) pour la promotion du domaine minier national relatif aux hydrocarbures ».

Art. 4. — Les dispositions de l'article 6 du décret exécutif n° 07- 311 du 25 Ramadhan 1428 correspondant au 7 octobre 2007, susvisé, sont modifiées, complétées et rédigées comme suit :

« Art. 6. — Dans le cadre de la promotion du domaine minier national relatif aux hydrocarbures, l'agence nationale pour la valorisation des ressources en hydrocarbures (ALNAFT), peut demander au titulaire de l'autorisation de prospection des hydrocarbures ou toute autre personne disposant des qualifications requises, de procéder à la commercialisation de ces données et résultats ainsi que leurs interprétations pour le compte de l'agence nationale pour la valorisation des ressources en hydrocarbures (ALNAFT), dans le cadre d'un contrat fixant les conditions de commercialisation et notamment la répartition des produits de la commercialisation ».

Art. 5. — Le présent décret sera publié au *Journal officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger, le 2 Jomada El Oula 1435 correspondant au 4 mars 2014.

Abdelmalek SELLAL.

— — — — ★ — — — —

Décret exécutif n°14-96 du 2 Jomada El Oula 1435 correspondant au 4 mars 2014 modifiant et complétant le décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

— — — —

Le Premier ministre,

Sur le rapport du ministre des ressources en eau,

Vu la constitution, notamment ses articles 85-3° et 125 (alinéa 2) ;

Vu le décret présidentiel n° 13-312 du 5 Dhou El Kaada 1434 correspondant au 11 septembre 2013 portant nomination des membres du Gouvernement ;

Vu le décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine ;

Après approbation du président de la République ;

Décrète :

Article 1er. — Le présent décret a pour objet de modifier et de compléter certaines dispositions du décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

Art. 2. — Les dispositions de l'alinéa 2 de l'article 3 du décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011, susvisé, sont modifiées comme suit :

« Art. 3. — Au sens du présent décret, il est entendu par :

Valeurs limites :(sans changement).....

Valeurs indicatives : valeurs de référence fixées pour certains paramètres organoleptiques et physico-chimiques à des fins de contrôle du fonctionnement des installations de production, de traitement et de distribution d'eau ».

Art. 3. — Les dispositions de l'article 7 du décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011, susvisé, sont modifiées comme suit :

« Art. 7. — Lorsqu'il est constaté que l'eau de consommation humaine a cessé d'être conforme aux valeurs limites fixées par le présent décret..... (le reste sans changement)..... »

Art. 4. — Les dispositions des *tableaux 1 et 2* annexés au décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011, susvisé, sont modifiées conformément à l'annexe du présent décret.

Art. 5. — Les dispositions du décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011, susvisé, sont complétées par un *article 4 bis* rédigé comme suit :

« Art. 4 bis — La concentration minimale du chlore résiduel libre de l'eau fournie aux usagers par le réseau de distribution est fixée à 0,1 mg/l ».

Art. 6. — Le présent décret sera publié au *Journal officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger, le 2 Jomada El Oula 1435 correspondant au 4 mars 2014.

Abdelmalek SELLAL.

ANNEXE
Paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine
Tableau 1 : paramètres avec valeurs limites

GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS LIMITES
Paramètres chimiques	Aluminium	mg/l	0,2
	Ammonium	mg/l	0,5
	Baryum	mg/l	0,7
	Bore	mg/l	- Eaux conventionnelles : 1 - Eaux déssalées ou deminéralisées : 1,3
	Fluorures	mg/l	1,5
	Nitrates	mg/l	50
	Nitrites	mg/l	0,2
	Oxydabilité	mg/l O ₂	5
	Acrylamide	µg/l	0,5
	Antimoine	µg/l	20
	Argent	µg/l	100
	Arsenic	µg/l	10
	Cadmium	µg/l	3
	Chrome total	µg/l	50
	Cuivre	mg/l	2
	Cyanures	µg/l	70
	Mercure	µg/l	6
	Nickel	µg/l	70
	Plomb	µg/l	10
	Sélénium	µg/l	10
	Zinc	mg/l	5
	Hydrocarbures polycycliques aromatiques (H.P.A) totaux	µg/l	0,2
	Fluoranthène, benzo (3,4) fluoranthène, benzo (11,12) fluoranthène, benzo (3,4) pyrène, benzo (1,12) pérylène, indéno (1,2,3-cd) pyrène, benzo (3,4) pyrène	µg/l	0,01
	Benzène	µg/l	10
	Toluène	µg/l	700
	Ethylbenzène	µg/l	300

ANNEXE (suite)

GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS LIMITES
Paramètres chimiques (suite)	Xylènes	µg/l	500
	Styrène	µg/l	100
	Agents de surface régissant au bleu de méthylène	mg/l	0,2
	Epychlorehydrine	µg/l	0,4
	Microcystine LR	µg/l	1
	Pesticides par substance individualisée		
	- Insecticides organochlorés persistants	µg/l	0,1
	- Insecticides organophosphorés et carbamates	µg/l	0,1
	- Herbicides	µg/l	0,1
	- Fongicides	µg/l	0,1
	- P.C.B	µg/l	0,1
	- P.C.T	µg/l	0,1
	- Aldrine	µg/l	0,03
	- Dieldrine	µg/l	0,03
	- Heptachlore	µg/l	0,03
	- Heptachlorépoxyde	µg/l	0,03
	Pesticides (Totaux)	µg/l	0,5
	Bromates	µg/l	10
	Chlorite	µg/l	0,07
	Trihalométhanes par substance individualisée :		
	-Chloroforme	µg/l	200
	- Bromoforme	µg/l	100
	- Dibromochlorométhane	µg/l	100
	- Bromodichlorométhane	µg/l	60
Radionucléides	Chlorure de vinyle	µg/l	0,3
	1,2-Dichloroéthane	µg/l	30
	1,2-Dichlorobenzène	µg/l	1000
	1,4-Dichlorobenzène	µg/l	300
	Trichloroéthylène	µg/l	20
	Tetrachloroéthylène	µg/l	40
paramètres microbiologiques	Particules alpha	Picocurie/L	15
	Particules bêta	Millirems/an	4
	Tritium	Bequerel/l	100
	Uranium	µg/l	30
	Dose totale indicative (DTI)	mSv/an	0,15
	Escherichia Coli	n/100ml	0
	Enthérocoques	n/100ml	0
	Bactéries sulfitoréductrices y compris les spores	n/20ml	0

Tableau 2

Paramètres avec valeurs indicatives

GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS INDICATIVES
Paramètres Organoleptiques	couleur	mg/l platine	15
	Turbidité	NTU	5
	Odeur à 25 °C	Taux dilution	4
	Saveur à 25 °C	Taux dilution	4
Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux	Alcalinité	mg/l CaCO ₃	65 pour les eaux déssalées ou déminéralisées (valeur minimale)
	Calcium	mg/l	200
	Chlorure	mg/l	500
	Concentration en ions hydrogène	Unité pH	≥ 6,5 et ≤ 9
	Conductivité à 20 °C	μS/cm	2800
	Dureté (TH)	mg/l en CaCO ₃	500
	Fer total	mg/l	0,3
	Manganèse	μg/l	50
	Phosphore	mg/l	5
	Potassium	mg/l	12
	Sodium	mg/l	200
	Sulfates	mg/l	400
	Température	°C	25

Décret exécutif n° 14-97 du 2 Jomada El Oula 1435 correspondant au 4 mars 2014 portant dissolution de l'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun.

Le Premier Ministre,

Sur le rapport du ministre des ressources en eau,

Vu la Constitution, notamment ses articles 85-3° et 125 (alinéa 2),

Vu le décret présidentiel n° 13-312 du 5 Dhou El Kaâda 1415 correspondant au 11 septembre 2013 portant nomination des membres du Gouvernement ;

Vu le décret exécutif n° 94-294 du 19 Rabie Ethani 1415 correspondant au 25 septembre 1994 relatif aux modalités de dissolution et de liquidation des entreprises publiques non autonomes et des établissements publics à caractère industriel et commercial ;

Vu le décret exécutif n° 07-337 du 19 Chaoual 1428 correspondant au 31 octobre 2007 portant création de l'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun ;

Après approbation du Président de la République ;

Décrète :

Article 1er. — L'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun, créée par les dispositions du décret exécutif n° 07-337 du 19 Chaoual 1428 correspondant au 31 octobre 2007 portant création de l'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun est dissoute.

Art. 2. — La dissolution de l'agence prévue à l'article 1er ci-dessus, donne lieu à l'établissement d'un inventaire quantitatif, qualitatif et estimatif dressé conformément aux lois et règlements en vigueur par une commission dont les membres sont désignés conjointement par le ministre des finances et le ministre chargé des ressources en eau.

Art. 3. — Le présent décret sera publié au *Journal Officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger le 2 Jomada El Oula 1435 Correspondant au 4 mars 2014.

Abdelmalek SELLAL.

RESUME

La station de dessalement de l'eau de mer de Cap Djinet Boumerdes, constitue l'un des plus grands projets réalisés par le gouvernement algérien en matière d'approvisionnement en eau potable, avec une capacité de 100.000 m³/ jour. Ce travail a pour objectif de faire un suivi de l'évolution de la qualité physico-chimique de l'eau obtenue par le dessalement de l'eau de mer en utilisant la technique d'osmose inverse. Dans ce contexte, vingt huit (28) prélèvements, ont été effectués au cours du mois d'Avril 2015. A la lumière des résultats obtenus, les eaux issues du dessalement de l'eau de mer de Cap Djinet présentent une qualité physico-chimique adéquate vis-à-vis de la réglementation de l'OMS.

Mots clé : Dessalement, Qualité, Physico-chimique, Osmose inverse

ABSTRACT

The desalination station of seawater from Cap-Djinet Boumerdes, is one of the largest projects undertaken by the Algerian government in drinking water, with a capacity of 100 000 m³/day. This work aims to follow the evolution of the physicochemical quality of the water produced by desalination of seawater by reverse osmosis technique. In this context, twenty eight (28) samples were conducted during the months April 2015. In light of the results obtained, the water from desalination of seawater from Cap Djinet has an adequate physicochemical quality with the World Health Organization.

Keywords: Desalination, Quality, Physicochemical, Reverse osmosis

الملخص

محطة تحلية مياه البحر على مستوى بلدية رأس جنات - بومرداس، واحدة من أكبر المشاريع التي قامت بها الحكومة الجزائرية من أجل التزويد بالمياه الصالحة للشرب بسعة 100 000 م³ في اليوم. هذا البحث يهدف إلى متابعة تطور النوعية الفيزيوكيميائية للمياه المنتجة من تحلية مياه البحر بواسطة تقنية الضغط الأسموزي العكسي. في ضوء النتائج التي تم الحصول عليها تمتاز المياه المنتجة من تحلية مياه البحر برأس جنات بجودة فيزيوكيميائية ملائمة على العموم مقارنة بالمعايير المعمول بها من طرف منظمة الصحة العالمية.

الكلمات الرئيسية: تحلية، الجودة، الضغط الأسموزي العكسي، الفيزيوكيميائية