



Department of Process Engineering

قسم هندسة

الطرائق

Ref:...../U.M/F.S.T/2024

رؤم / ج.م.ك.ع.ت.2024//

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : GENIE DES PROCEDES

Option : GENIE DES PROCEDES DE L'ENVIRONNEMENT

Thème

DESSALEMENT DE L'EAU DE MER PAR OSMOSE INVERSE

Présenté par

- 1- Machid Dahbia
- 2- Douidi Mohamed Walid

Soutenu le 26/06/2024 devant le jury composé de :

Présidente :	Mme Bendenia S	Professeur	Université de Mostaganem
Examinatrice :	Mme Driouche .A	MCA	Université de Mostaganem
Encadrante :	Mme Belhadji K.A	MCA	Université de Mostaganem

Remerciements

Avant tout, j'exprime mes remerciements au bon Dieu, le tout puissant, qui nous a donné la santé, la force et le courage pour accomplir ce modeste travail.

On adresse également nos profondes gratitude et à toute nos reconnaissance à nos encadreur, MM BELHADJI Kenza.

Le présent travail a été réalisé au niveau de la station de dessalement de l'eau de mer de Mostaganem. Par l'occasion nous remercions tous les responsables et les agents de cette station : le chef de production Mr. Abderazak,

On saisit aussi, cette opportunité pour remercier l'ensemble des enseignants qui ont contribué à notre formation et à toutes les personnes qui de près ou de loin, aidé à la réalisation de ce travail et aux membres du jury pour la lecture et les critiques de ce rapport.

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 ; mon très chère mère et mon très cher père. Je prie Dieu
le tout puissant de les protéger du mal et de les récompenser.*

Walid

*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 ; mon très chère mère et mon très cher père. Je prie Dieu
le tout puissant de les protéger du mal et de les récompenser.*

A mon frère ; Ahmed, nadir

Dahbia

RESUME

La station de dessalement de l'eau de mer de SONACTER -Mostaganem, constitue l'un des plus grands projets en matière d'approvisionnement en eau potable, avec une capacité de 200.000 m³/ jour. Ce travail a pour objectif de faire un suivi de l'évolution de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau obtenue par le dessalement de l'eau de mer en utilisant la technique d'osmose inverse. Dans ce contexte, quatre (4) prélèvements, ont été effectués au cours du mois de mars 2023. A la lumière des résultats obtenus, les eaux issues du dessalement de l'eau de mer de sonacter présentent une qualité physico-chimique et bactériologique adéquate vis-à-vis de la réglementation de l'OMS.

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

ABSTRACT

The desalination station of seawater from SONACTER-Mostaganem, is one of the largest projects undertaken in drinking water, with a capacity of 200 000 m³/day. This work aims to follow the evolution of the physicochemical and Bacteriological quality of the water produced by desalination of seawater by reverse osmosis technique. In this context, for (4) samples were conducted during the months mars 2023. In light of the results obtained, the water from desalination of seawater from sonacter has an adequate physicochemical and Bacteriological quality with the World Health Organization.

Keywords: Desalination, Quality, Reverse osmosis, Physicochemical, Bacteriological.

ملخص

محطة تحلية مياه البحر سونكتار-مستغانم واحد من أكبر المشاريع من اجل التزود بالمياه الصالحة للشرب بسعة 000 200 م³ في اليوم. هذا البحث يهدف الى متابعة تطور النوعية الفيزيوكيميائية والبكتيرية للمياه المنتجة من تحلية مياه البحر بواسطة تقنية الضغط الاسموزي العكسي. في ضوء النتائج التي تم الحصول عليها تمتاز المياه المنتجة من تحلية مياه البحر سونكتار-مستغانم بجودة فيزيوكيميائية وبكتيرية ملائمة على العموم مقارنة بالمعايير المعمول بها من طرف منظمة الصحة العالمية.

الكلمات الرئيسية: التحلية، الجودة، الضغط الاسموزي العكسي، الفيزيوكيميائية، البكتيرية.

SOMMAIRE

Liste des tableaux.	
Liste des figures.	
Liste des abréviations.	
Introduction générale.....	01

Partie théorique

Chapitre 01 : Généralités sur l'eau

1. Généralités sur l'eau de mer	03
2. Définition de l'eau.....	03
3. Ressources hydriques naturelles	03
4. Composition de l'eau de mer.....	05
5. Les paramètres de qualités des eaux salées.....	06

Chapitre 02 : Les différents procédés de dessalement

1. Histoire du dessalement.....	15
2. Principe du dessalement.....	15
3. Les étapes de dessalement de l'eau de mer.....	16

Partie pratique

Chapitre 03 : Présentation de la station de Sonaghter Mostaganem

1. Introduction.....	32
2. Situation géographique de Mostaganem.....	32
3. Population.....	32
4. Les données chimiques de l'eau de mer.....	32
5. Stations de dessalement en Algérie.....	32
6. Présentation de l'unité de dessalement Sonaghter Mostaganem.....	34
7. Description de la station de Mostaganem.....	34

Chapitre 03 : Procédés de dessalement de la station de Sonaghter

1. Introduction.....	36
----------------------	----

2. Fonctionnement de la station.....	36
2.1. Captage et pompage de l'eau de mer.....	36
2.2. Système de prétraitement.....	37
2.3. Système de filtration.....	38
2.4. Système de microfiltration.....	39
2.5. Système d'osmose inverse.....	40
2.6. Système de reminéralisation et conditionnement de l'eau osmoses.....	42
2.7. Dosage de chlore résiduel.....	43
2.8. Stockage et impulsion de l'eau produite.....	43
2.9. Réseau de transport de l'eau d'externe.....	44

Chapitre 04 : Contrôle de qualité

1. Introduction.....	46
2. L'ALGERIENNE DES EAUX (ADE).....	46
3. Mode de prélèvement.....	47
4. Protocole expérimentale	48
5. Résultats et discussion.....	59
6. Conclusion.....	69

Liste des figures

Numéro	Titre de figure	Page
1	Les sels qui se trouvent dans l'eau de mer	09
2	L'hydromètre à aiguille	10
3	L'hydromètre flottant	10
4	Schéma général d'une installation de dessalement	16
5	Les différents procédés de dessalement de l'eau de mer.	19
6	Distillation à simple effet.	20
7	Principe de fonctionnement d'un système par détente successives (MSF) à 3 étages	21
8	Distillation à effet multiple	22
9	Unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur.	22
10	Principe général de l'électrodialyse	23
11	Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse.	24
12	Module à plaque	25
13	Module tubulaire	26
14	Module spirale.	26
15	Module à fibres creuses.	27
16	localisation de la station de dessalement de Mostaganem	34
17	Vue générale sur la station de dessalement de Mostaganem	34
18	Salle de pompage captage	37
19	Les filtres à sable	38
20	les filtres à cartouches (microfiltration)	40
21	Pompe haute pression (HP)	41
22	Membrane FILMTEC	41
23	Lit de calcite	43
24	différentes photos des deux blocs de Le laboratoire d'analyses	46
25	Turbidimètre	48
26	l'appareil de mesure le pH mètre (HACH, sens ION TM+).	49
27	Colorimètre	50
28	le titrage (Calcium)	52

29	spectrophotomètre et pack LCK	56
30	photométrie de la flamme	56
31	Variations quotidienne du potentiel hydrogène	60
32	Variations quotidienne de la Conductivité électrique.	61
33	Variations quotidienne du Total des solides dissous	61
34	Variations quotidienne du titre hydrotimétrique	62
35	Variations quotidienne de la dureté calcique.	63
36	Variations quotidienne du Titre alcalimétrique complet.	63

Liste du tableau :

Numéro	Titre du tableau	Page
1	Réserves d'eau de la planète	5
2	Concentrations des éléments principaux (mg/kg) et éléments mineurs dont la concentration est supérieure à 1 µ g/l pour une eau de mer de salinité de 35%.	6
3	Salinité des eaux de mer.	8
4	Solubilités des sels dans l'eau pure (18°C) en g/l	11
5	Comparaison des procédés du dessalement.	28
6	Grandes unités de dessalement	33
7	Petites stations (monoblocs)	33
8	Le conditionnement de l'eau par des réservoirs	37
9	Caractéristique de la couche de filtration première étape.	38
10	Caractéristique de la couche de filtration (deuxième étape).	39
11	Code article et plage de mesure de chaque paramètre	56
12	Les concentrations des paramètres physico-chimiques des échantillons analysés de l'eau produite pendant 5 jours.	59
13	Résultats bactériologiques	65
14	Les concentrations des paramètres chimiques des échantillons analysés de l'eau produite pendant 5 jours.	66

LISTE DES ABREVIATIONS

ADE : Algérienne Des Eaux

BEA : Bile Esculine Agar

DPD : Diéthyl-p-Phénylène-Diamine

EDTA : Acide éthylène Diamine Tétracétique

LCK : Serrure

m.c.e : mètre de colonne d'eau

MES : Matières En Suspension

NET : Noir d'Eriochrome T

NTU : Nephelometric Turbidity Unit (unité de Turbidité Néphélométrique)

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

P : Pression

PH : Potentiel d'Hydrogène

P_{tm} : pression transmembranaire

P_{ppm} : Partie Par Million

UTEO&M MTM : Temporaire des Entreprises Opération & Maintenance Mostaganem

RO ou OI : Reverse Osmosis ou Osmose Inverse

R.S : Résidés Secs

SDI : Silt Density Index (le test d'indice de densité limon)

T : Température

TA : Titre alcalimétrique

TAC : Titre Alcalimétrique Complet

T_{ca} : Titre Calcique

TDS : Total des Solides Dissous

TH : Titre Hydrométrique

TTC : Triphenyl Tetrazolium Chloride (Chlorure de Triphenyl Tetrazolium)

VBL : Bouillon Lactosé bilié au Vert brillant

Introduction générale :

L'eau, en tant que bien commun, est indispensable à la vie. C'est l'élément primordial à fixer en un lieu où vit toute une population. La croissance démographique dans le monde s'accompagne d'une augmentation de la demande d'eau potable tandis que l'industrialisation, l'irrigation des sols et l'élévation des niveaux de vie se traduisent par un accroissement supplémentaire de la consommation d'eau douce par habitant.

Cependant, les populations ont un accès très inégal à ces ressources. En effet, seule une faible quantité de l'eau totale mondiale est de l'eau douce disponible ce qui implique que 2/3 de la population sera en situation de stress hydrique d'ici 2025. On estime en outre que 2,5 milliards de personnes pourraient souffrir du manque d'eau en 2050 compte-tenu de l'évolution de la démographie et de l'augmentation des consommations d'eau.

Pour faire face à cette pénurie d'eau, le dessalement d'eau de mer est présenté comme une alternative quand les ressources conventionnelles (cours d'eau, nappes phréatiques) viennent à être insuffisantes.

L'Algérie a lancé ces dernières années un programme ambitieux d'installations de stations de dessalement pour faire face à des problèmes d'alimentation en eau qui s'accroissent par l'explosion démographique. Le dessalement d'eau de mer est un processus qui permet de retirer le sel de l'eau salée ou saumâtre pour la rendre potable ou l'utiliser dans l'irrigation. Mais cette solution, selon WWF (Fond mondial pour la nature), peut avoir un impact négatif sur l'environnement à cause de la composition des rejets engendrés par ce processus, qui peut modifier les paramètres de la mer et influencer négativement sur la faune et la flore sous-marines. Le rejet généré par l'usine de dessalement se présente généralement sous la forme d'une saumure contenant divers sels, et composés organiques. Cette saumure est deux à trois fois plus salée (entre 50 et 80 g/L) que l'eau de mer habituelle.[1]

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR L'EAU

1. Généralités sur l'eau de mer :

L'eau est une ressource vitale essentielle conditionnant la vie et l'existence des êtres vivants sans ses éléments la terre ne serait qu'un astre mort, semblable à ce que la lune est demeurée depuis sa formation. La terre est souvent appelé la planète bleue par ce que l'eau recouvre la majorité de la surface de la terre, environ 71% de plus le volume d'eau sur terre est estimé à environ 1,4 milliard de Km³. [2]

2. Définition de l'eau :

L'eau de mer est une solution aqueuse salée qui recouvre la plus grande partie de la surface de la Terre. Elle est composée d'eau et de divers sels minéraux, principalement du chlorure de sodium (sel commun), ainsi que de petites quantités d'autres composés tels que le magnésium et le calcium. L'eau de mer a une concentration en sel d'environ 3,5%, ce qui la rend impropre à la consommation directe pour la plupart des organismes terrestres en raison de sa teneur en sel. Elle joue un rôle fondamental dans de nombreux processus naturels, comme la régulation de la température mondiale, la circulation océanique et le cycle de l'eau. [3]

3. Ressources hydriques naturelles :

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

3.1 Eaux douces de surface

Leur volume total est très faible et 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.[4]

3.2 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 cheminent 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. [4]

3.3 Eaux de mer

La mer s'étend sur 71% environ de la surface du globe. L'hémisphère sud est le principal communiquant 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. 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. 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. [5]

3.4. Répartition de l'eau sur la planète :

L'eau constitue les trois quarts de la surface de la terre. , deux tiers de l'eau douce est gelée dans les régions polaires ou les glaciers. Donc, toute la population mondiale doit partager la petite fraction d'eau douce disponible dans les lacs et les rivières (Tableau°01).

Tableau°01 : Réserves d'eau de la planète [7]

Réservoirs	Volume (10¹⁵ m³)	%Total	Temps de résidence
Océans	1350	97,0%	2500 ans
Glaciers (calotte glacier)	33	2,4%	1000 à 10000 ans
Eau souterraines	08	0,6%	1500 ans
Lacs	0.1	< 0,01%	17 ans
Eau dans le sol	0.070	< 0,01%	01 an
Eau dans l'atmosphère	0.013	< 0,001%	08 jours
Rivières	0.0017	0,0001%	16 jours
Eau dans la matière vivante	0.0011	0,0001%	Quelques heures
Total	1391	100%	-

4. Composition de l'eau de mer :

4.1 Eléments principaux :

Bien que la masse totale des sels dissous puisse varier le rapport des concentrations des différents éléments est constant Cette constance des relations est souvent appelée loi de Marcetou de Dittmar. Les principaux éléments ses savoirs ceux qui influencent la masse de sels dissous dans les océans sont représentés par 11 éléments différents. [5]

4.2 Autres éléments minéraux :

L'eau de mer contient de nombreux autres éléments à des concentrations beaucoup plus faibles. Malgré leur faible concentration ces éléments ont une certaine importance dans les processus biologiques et organiques. [5] Ils existent sous différentes formes (dissoutes, colloïdales ou en suspension)

Tableau°02 : Concentrations des éléments principaux (mg/kg) et éléments mineurs dont la concentration est supérieure à 1 µ g/l pour une eau de mer de salinité de 35‰. [5]

Eléments principal		Autres éléments minéraux	
Eléments	Concentration (mg/kg)	Eléments	Concentration en µ g/l
Chlorure (Cl ⁻)	19353	Lithium (Li)	170
Sulfate (SO ²⁻ ₄)	2712	Aluminium (Al)	10
Bicarbonate (HCO ⁻ ₃)	142	Silicium (Si)	3000
Bromure (Br ⁻)	67	Phosphate (P)	70
Fluorure (F ⁻)	1	Titan (Ti)	1
Bore (B ³⁺)	4	Vanadium (V)	2
Sodium (Na ⁺)	10160	Manganèse (Mn)	2
Magnesium (Mg ²⁺)	1249	Fer (Fe)	10
Calcium (Ca ²⁺)	413	Cuivre (Cu)	3
Potassium (K ⁺)	387	Zinc (Zn)	10
Strontium (Sr ²⁺)	8	Arsenic (As)	3
		Rubidium (Rb)	120
		Molybdène (Mo)	10
		Iode (I)	60
		Barium (Ba)	30
		Uranium (U)	30

5. Les paramètres de qualité des eaux salées :

5.1. Paramètres organoleptiques :

5.1.1. La couleur :

Pour l'eau potable, le degré de couleur maximale acceptable est de 15 UVC. Elle peut être due à certaines impuretés minérales (fer) mais également à certaines matières organiques acides humiques, fulviques). Elle doit être éliminée pour rendre l'eau agréable à boire. [6]

5.1.2. Gouts et odeurs :

Les eaux de consommation doivent posséder un gout et une odeur agréable. La plus part 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.[7]

5.1.3. La turbidité :

La turbidité d'une eau est due à la présence des particules en suspension notamment colloïdales : argiles, limons, grains de silice, matières organiques, le pluviomètre joue un rôle

important vis-à-vis de ce paramètre dans les superficielles et souterraines selon leur origine. [8]

5.2. Les paramètres physico-chimiques :

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

5.2.1. Salinité :

5.2.1.1. 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. [9]

5.2.1.2. 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. 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. [9]

5.2.1.3. 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. [10]

5.2.1.4. 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 n°03)

Tableau n°03 : Salinité des eaux de mer. [10]

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. [10]

5.2.1.5. Sels minéraux :

La composition relative d'une eau de mer (répartition des différents sels) reste quasi-constante dans le cas des mers ouvertes ou peu ouvertes ; Dans le cas des mers fermées, il peut néanmoins y avoir de fortes variations dans la composition en fonction de l'évaporation et des apports d'eaux de surface. Les ions chlorure et sodium représentent environ 85% de la masse en sels présents dans l'eau de mer mais il faut également noter la présence de bicarbonates, de calcium et de sulfates. L'Organisation Mondiale de la Santé a défini des normes de potabilité pour l'eau concernant le taux en sels : la salinité globale doit être inférieure ou égale à 1000 mg. L⁻¹, et la teneur en chlorure doit être inférieure ou égale à 250 mg. L⁻¹. [11]

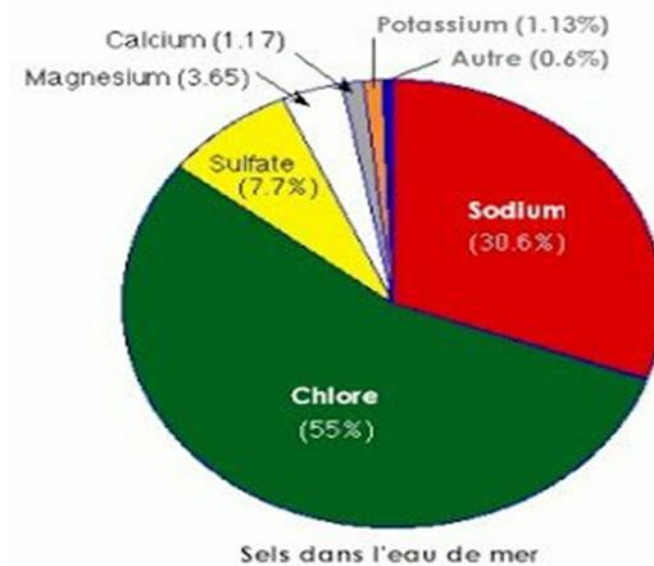


Figure n°1 : Les sels qui se trouvent dans l'eau de mer. [11]

5.2.1.6. Salinité des eaux saumâtres :

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). [10]

5.2.2. 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.



Figure n°02 : L'hydromètre à aiguille [12]



Figure n°03 : L'hydromètre flottant [12]

5.2.3. 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 saturé (Tableau n°04).

Tableau n°04 : Solubilités des sels dans l'eau pure (18°C) en g/l. [13]

Elément	Na	Ca	Mg	K	Ba	Sr
Cl	360	730	560	330	370	510
SO₄	170	2	350	110	0.002	0.11
NO₃	840	1220	740	300	90	70
CO₃	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 SO, CO₂, 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. [13]

5.2.3.1. Solubilité des gaz dans l'eau :

L'eau contient toujours des gaz dissous dont les concentrations dépendent notamment de la température ainsi que de la composition et de la pression de l'atmosphère gazeux avec laquelle elle est en contact. La loi de HENRY appliquée à la solubilité des gaz dans l'eau pure, prévoit que, la concentration dissoute d'un composé gazeux dans l'eau est directement proportionnelle à la pression partielle de ce composé dans la phase gazeuse au contact de l'eau. Les gaz dissous comprennent principalement 64% d'azote, 34% d'oxygène, 1,8% de dioxyde de carbone (soit 60 fois la proportion de ce gaz dans l'atmosphère terrestre). [14]

5.2.4 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 ; Les différences de température sont également importantes suivant les profondeurs. 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). [15]

5.2.5. 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 CO_2 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 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. [16]

5.2.6. 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 Mg^{2+} et Ca^{2+} , la présence de ces deux cations dans l'eau tend souvent à réduire la toxicité des métaux. La dureté se mesure en mg de CaCO_3 , par litre dans l'eau, sont 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. [17]

5.2.7. Matière 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. [17]

5.2.8. Conductivité électrique :

La conductivité donne une idée de la minéralisation d'une eau et elle est à ce titre un bon marqueur de l'origine d'une eau. La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques (Platine) de 1cm²de surface et séparée l'une de l'autre de 1cm. L'unité de la conductivité est le Siemens par mètre (S/m). [17]

5.3. 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(Cd), Arsenic(As), Mercure (Hg) le fer(Fe), le plomb(Pb), l'arsenic, le nickel(Ni), le bore(Br) et Sélénium (Se).

5.4. Paramètres microbiologiques

Le risque microbiologique d'origine hydrique (ou risque infectieux) correspond à dans l'eau de Micro-organismes 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 totalement les fléaux tels que le choléra, la dysenterie bacillaire ou les fièvres typhoïdes et paratyphoïdes. [17]

Chapitre 2
***LES DIFFERENTS
PROCEDES DE
DESSALEMENT***

1. Histoire du désalement :

L'idée d'extraire de l'eau potable à partir de l'eau de mer : d'ailleurs pas nouvelle. La nature le fait depuis toujours à travers le cycle naturel de l'eau. Sous l'effet du soleil, les océans s'évaporent, la vapeur d'eau forme des nuages qui provoquent des précipitations de pluie ou de neige dès que les masses d'air humide atteignent des régions plus froides. L'eau des précipitations est pure car le sel contenu dans la mer n'étant pas volatil, seule l'eau s'évapore. Les marins de l'antiquité confrontés à l'approvisionnement en eau à bord des bateaux avaient déjà imité la nature en faisant bouillir de l'eau de mer pour en extraire de l'eau non salée par condensation de la vapeur produite. Dans *Meteorologica*, Aristote (384-322 av. J.C.) écrit : J'ai prouvé expérimentalement que l'eau salée qui s'évapore s'adoucit et que la vapeur condensée ne réforme pas de l'eau de mer. Pline l'Ancien (23-79, *Histoire Naturelle*), Alexandre d'Aphrodise (150-215) et St Basile (329-379, *Homélie*) semblent avoir été les premiers à décrire des procédés pour rendre l'eau de mer potable. [19]

Puis, autour de 1959, un procédé appelé osmose inverse a été mis au point à l'Université de Californie dans le prolongement de la méthode plus ancienne de séparation des sels contenus dans les mélasses (Dubrunfaut, 1853), (Graham 1854, à l'origine du terme osmose). Il s'agit d'un procédé membranaire : l'eau douce est extraite de l'eau salée à travers une membrane semi-poreuse, en appliquant une pression. Les premières membranes commerciales datent de 1970. Mais il a fallu attendre le 18^{ème} siècle pour qu'on évoque des procédés permettant d'augmenter la production, améliorer la pureté de l'eau ou économiser l'énergie. Et ce n'est qu'au début du 20^{ème} siècle que sont apparus les premiers procédés vraiment industriels de distillation, c'est-à-dire de concentration des solutions et de production d'eau douce par vaporisation puis condensation. [20]

2. Principe du désalement :

Le désalement de l'eau de mer, aussi appelé *dessalage* », est le processus de traitement d'eau qui consiste à enlever les sels de l'eau saline permettent de traiter de l'eau salée ou saumâtre afin de la rendre potable ou utilisable pour l'irrigation. Cette technique est généralement moins rendable que le traitement des sources d'eau douce, qu'il s'agisse des eaux de surface ou des nappes souterraines. Cependant, elle est utilisée dans certaines régions du monde ou les

sources d'eau douces sont inexistantes ou insuffisantes pour répondre aux besoins de la population ou de la production agricole. Les différentes qualités d'eau qui peuvent être obtenues à partir d'une unité de désalement sont :

- Eau potable,
- Eau d'irrigation,
- Eau de procès : eau d'alimentation de chaudière, eau de refroidissement
- Eau déminéralisée ou ultra pure. [21]

3. Les étapes de désalement de l'eau de mer :

Le processus de désalement d'eau de mer se fait en quatre étapes :

- la captation de l'eau de mer
- le prétraitement
- les différents procédés de désalement
- le post traitement ou minéralisation

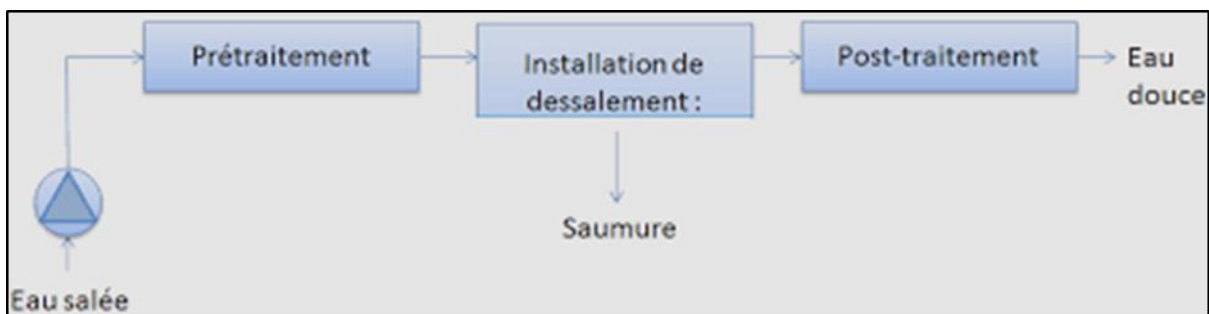


Figure n°04 : Schéma général d'une installation de désalement. [22]

3.1. Captation d'eau de mer :

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

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

- 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. [22]

3.2. Le prétraitement :

Les procédés de prétraitement peuvent être divisés en deux catégories : les prétraitements physiques et les prétraitements chimiques.

- ✓ Les prétraitements physiques incluent le pré filtres mécaniques, les filtres à cartouche, la filtration à sable et la filtration membranaire.
- ✓ Le prétraitement chimique consiste en l'addition d'inhibiteurs "entartrage, de coagulants, de désinfectants et acidification et injection de séquestrant. [23]

3.2.1. Prétraitements physico-chimiques :

➤ 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.

➤ 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. [24]

➤ **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. [25]

➤ **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 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. [18]

3.2.2. 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.

• **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. 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. [18]

3.2.3. 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.

3.3. Les 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. [26]

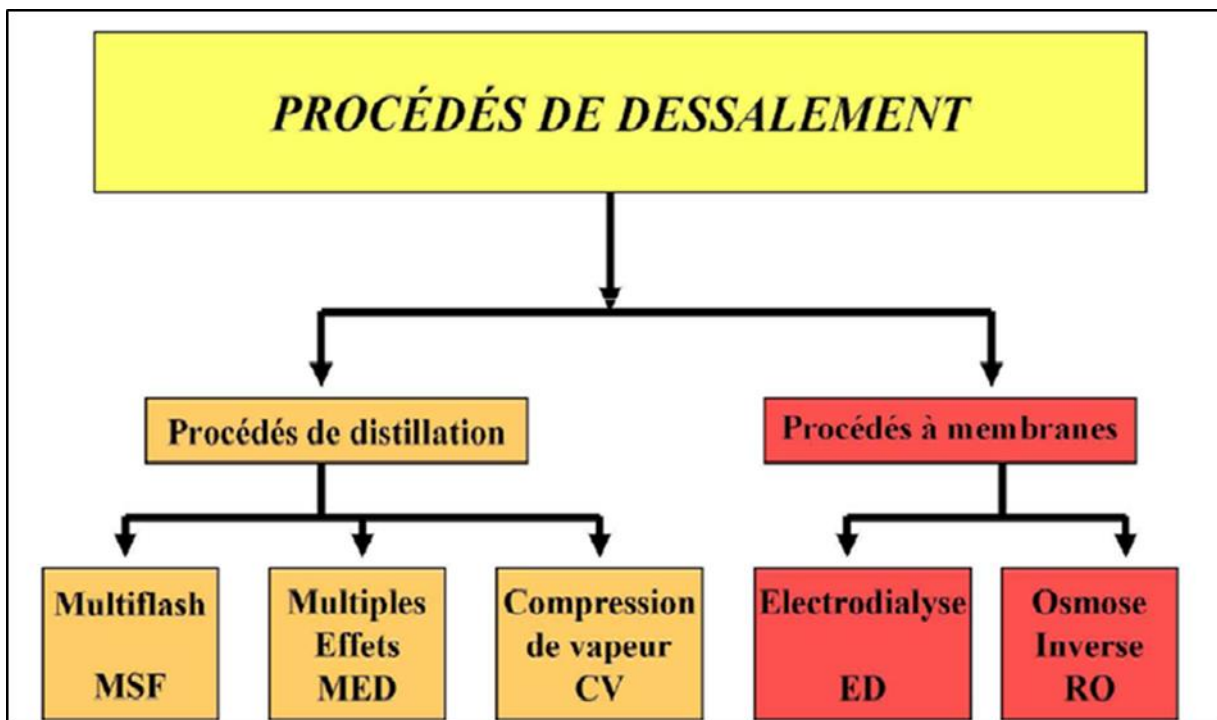


Figure n° 05 : Les différents procédés de dessalement de l'eau de mer. [26]

3.3.1. 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 :

3.3.1.1. 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. 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. [27]

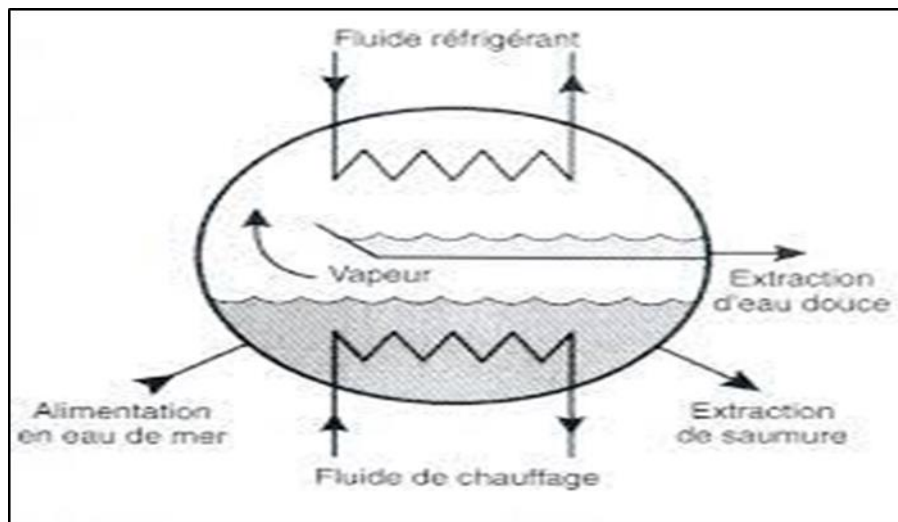


Figure n° 06 : Distillation à simple effet. [22]

3.3.1.2. Distillation à détente étagées (Multi-Flash MSF)

Ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash. Une fraction de l'eau s'évapore puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à 120°C, l'eau de mer circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant d'abord par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur d'eau. Elle est finalement portée à 120 °C grâce à de la vapeur à une température supérieure à 120°C produite par une chaudière ou provenant d'une centrale de production d'électricité. On remarque lors du

phénomène de flash que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un dévésiculateur. Constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte. La plus grande capacité du MSF en service de nos jours est celle de Shuaiba 3 en Arabie saoudite avec 880 000 m³/j. Pour une capacité typique de 25 000 m³/j. le coût de production de l'eau est de 0,88 €/m³. [28]

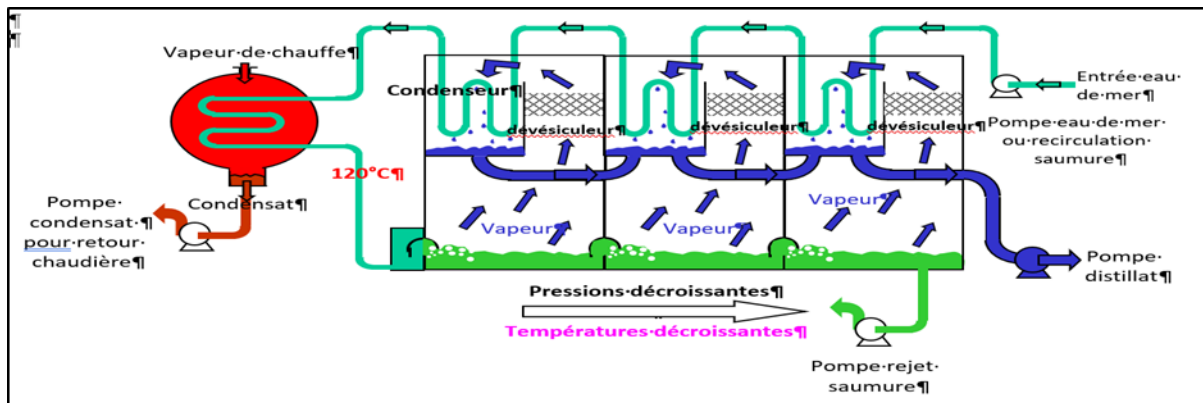


Figure n° 07 : Principe de fonctionnement d'un système par détonations successives (MSF) à 3 étages. [29]

3.3.1.3. Distillation à multiples effets (MED) :

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs. La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le 1er effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2ème effet où règne une pression inférieure. La chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2ème effet et ainsi de suite. Ainsi seule l'énergie nécessaire à l'évaporation dans le premier effet est d'origine externe. La multiplication du nombre d'effets permet donc de réduire la consommation spécifique (énergie/m³ d'eau douce produite). L'énergie requise pour les multiples effets (MED) est principalement l'énergie thermique à fournir par la chaudière produisant le fluide de chauffage pour le premier effet. On peut cependant utiliser des chaleurs résiduelles en couplant le procédé MED à des usines de production d'électricité ou des usines rejetant les eaux résiduelles à des températures de l'ordre de 80°C. Il faut également de l'énergie électrique pour les pompes de circulation et la production de vide. [28]

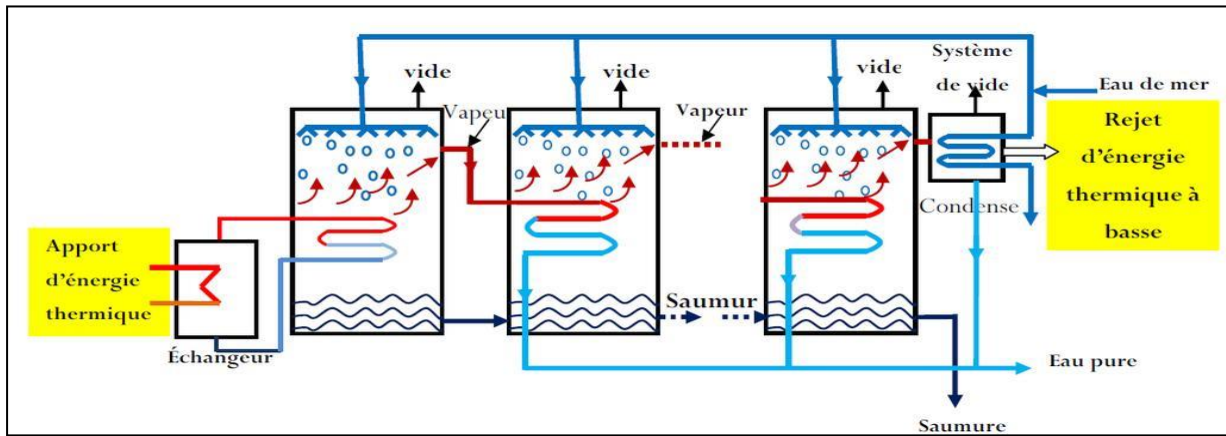


Figure n°08 : Distillation à effet multiple. [29]

La plus grande capacité MED en service est celle d'Al Hidd 2 en Arabie Saoudite, avec une production de 272 520 m³/j. Pour une capacité de production de 10 000 m³/J le coût de production est de l'ordre de 0,64 €/m³.

3.3.1.4. Distillation par compression de vapeur (cv) :

Lors de la distillation par compression de vapeur, l'eau de mer est portée à ébullition dans une enceinte thermiquement isolée. La vapeur produite est aspirés par un compresseur qui élève sa température de saturation. Cette vapeur traverse ensuite un faisceau tubulaire placé à la base de l'enceinte et se condense en provoquant l'évaporation de l'eau salée. Ce procédé permet d'obtenir une production maximum 5000 m³/j avec une salinité de 1 à 50 mg /l pour une consommation énergétique de 12 à 17 kWh/m³ d'eau produite. [30]

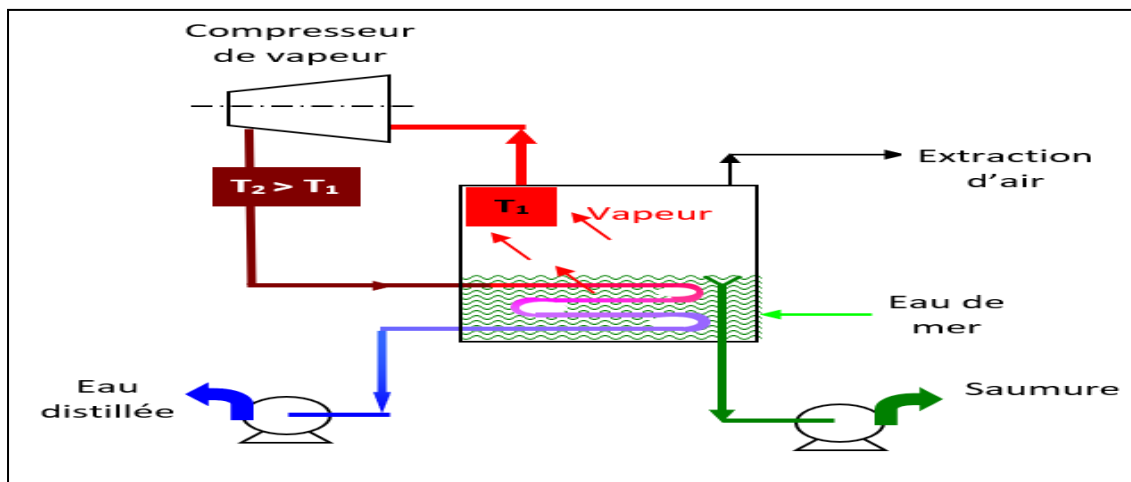


Figure n° 09 : Unité d'évaporation simple-effet avec compression de vapeur. [29]

3.3.2. 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.

Définition de la membrane :

La membrane est une mince paroi, qui est une interface physique de faible épaisseur permettant une séparation sélective d'espèces chimiques, ioniques, moléculaires ou biologiques 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 l'ordre de grandeur de nanomètre ou contenant des couches superposées. [17]

3.3.2.1. Électrodialyse :

L'électrodialyse est une technique électro membranaire qui permet le transfert des ions à travers des membranes à perméabilité sélective. Le but de l'opération est d'extraire les sels d'une solution, d'où on obtient alors, d'un côté une solution saumure très concentrée et de l'autre une solution dessalée. Sous l'effet d'un courant appliqué dans les bacs externes, les ions Na^+ sont attirés vers l'électrode négative et les ions Cl^- vers l'électrode positive. En raison de la sélectivité des membranes seules les ions Na^+ peuvent uniquement traverser les Membranes cathodiques et seuls les ions $[Cl]$ peuvent traverser les membranes anioniques, on obtient de l'eau douce dans deux des quatre compartiments. [31]

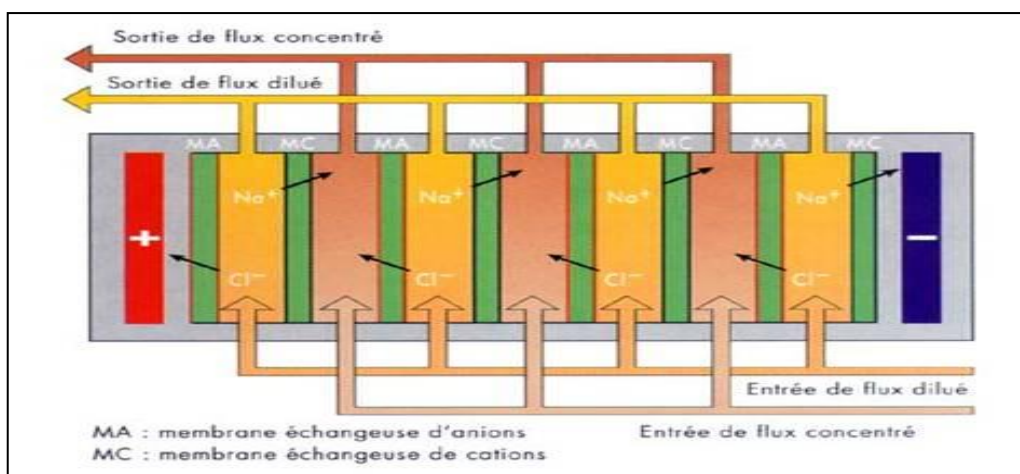


Figure n°10 : Principe général de l'électrodialyse. [31]

3.3.2.2. L'osmose inverse :

L'osmose est un phénomène qui tend à équilibrer la concentration en soluté de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. C'est un phénomène naturel, notamment à travers les membranes cellulaires (BERLAND & JUERY, 2002). Le phénomène d'osmose va se traduire par un flux d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau va s'annuler. Si pour simplifier, on suppose que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique. Une augmentation de la pression au-delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique, c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée ; c'est le phénomène d'osmose inverse. [22]

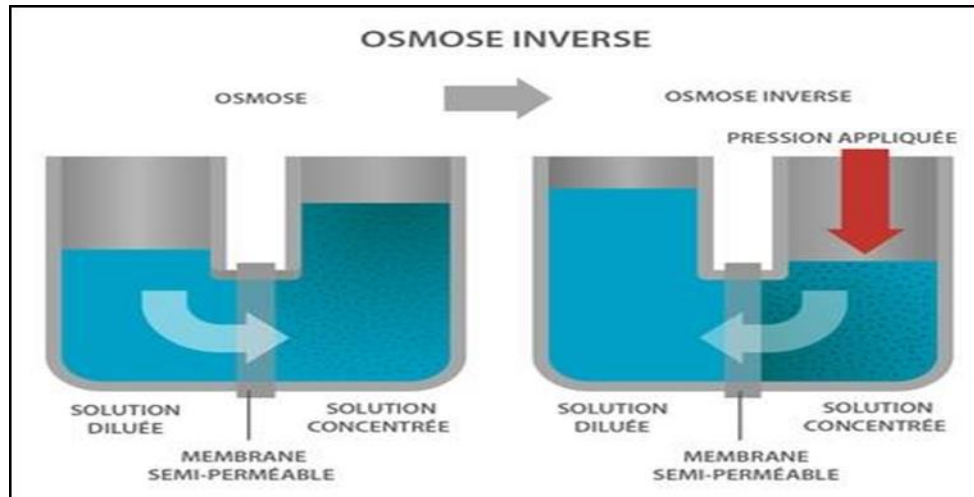


Figure n° 11 : Principe des phénomènes d'osmose et d'osmose inverse. [22]

3.3.2.2.1. Installation d'osmose inverse :

Les principaux constituants d'une installation d'osmose inverse sont les suivants :

- Membrane proprement dite : module.
- Pompe haute pression HP.

- Eventuellement un système de récupération d'énergie. [32]

3.3.2.2.2. Les type de membranes : On distingue :

- **les membranes organiques** : sont fabriquées dans la plus part de cas, à partir de polymères organiques (acétate de cellulose, poly sulfones, polyamides).

- **les membranes inorganiques** : fabriquées à partir de matières céramiques, métal fritté et verre. Elles peuvent travailler dans des conditions extrêmes de température et d'agression chimique.

- **les membranes composites** : apparues au début des années 1990, sont des membranes asymétriques dont la peau est très fine, et caractérisées par une superposition de plusieurs couches différenciées soit par la nature chimique, soit par l'état chimique. Elles peuvent être organiques, organo-minérales ou minérales. Les membranes composites d'osmose inverse représentent 85% de l'utilisation mondiale des membranes (sur la base de la surface totale utilisée). [33]

3.3.2.2.3. Les modules d'osmose inverse :

Pour être mises en œuvre les membranes doivent être montées dans des supports appelés modules. Une enceinte résistante à la pression est toujours nécessaire. Il existe quatre types de modules :

❖ Modules plans et en plaques :

Ils sont constitués d'un empilement de plaques chacune équipée sur ses deux faces d'une grille de drainage faisant office d'espace filtrant, et d'une feuille poreuse soutenant la membrane. [32]

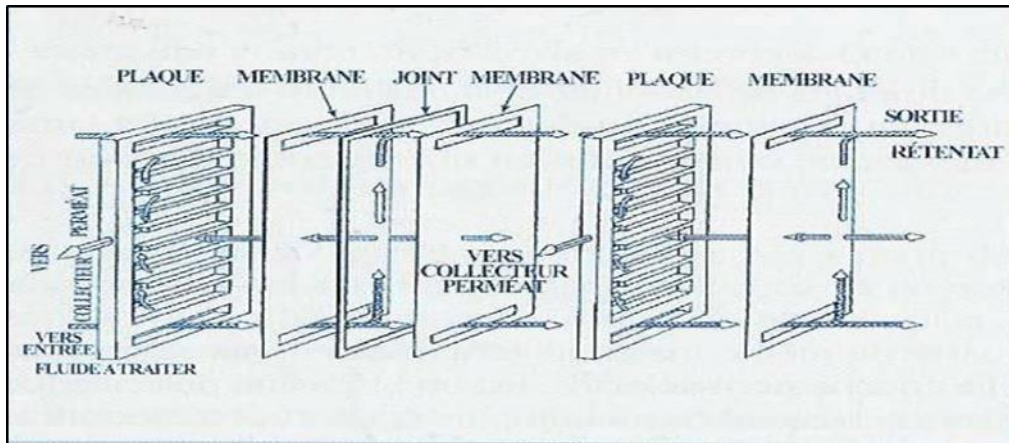


Figure n°12 : Module à plaque. [34]

❖ **Modules tubulaires :**

Ils sont constitués d'un tube poreux sur lequel la membrane est fixée. L'eau à traiter, pompée à une extrémité du tube, est forcée au travers de celui-ci et de la membrane. Le retentât est recueilli à l'autre extrémité du tube tandis que le perméat qui s'écoule à la surface extérieure de la membrane est récolté dans un tube extérieur concentrique. [32]

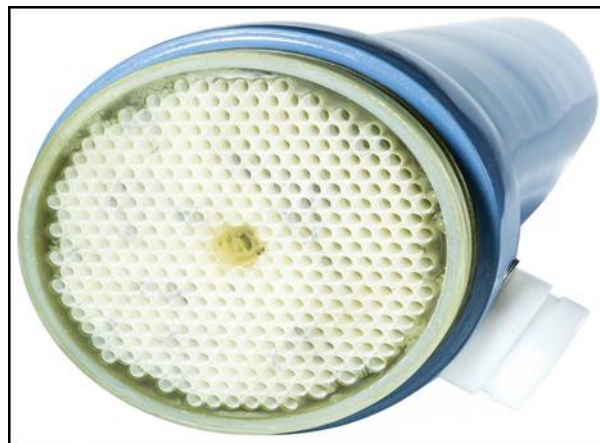
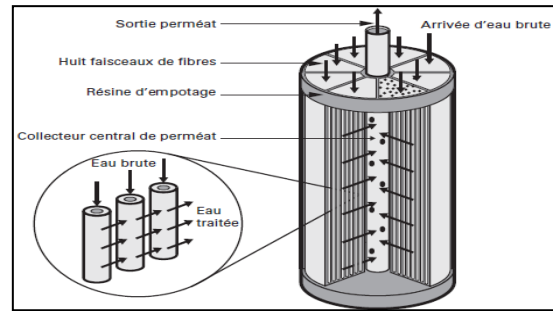


Figure n° 13 : Module tubulaire. [32]

❖ **Le module à membrane spirales :**

C'est un module particulier de membranes planes qui sont enroulées autour d'un axe creux



collecteur de perméat. L'ensemble est introduit dans une enveloppe cylindrique dont les sections donnent accès à l'entrée de l'alimentation et à la sortie du retentât. [34]

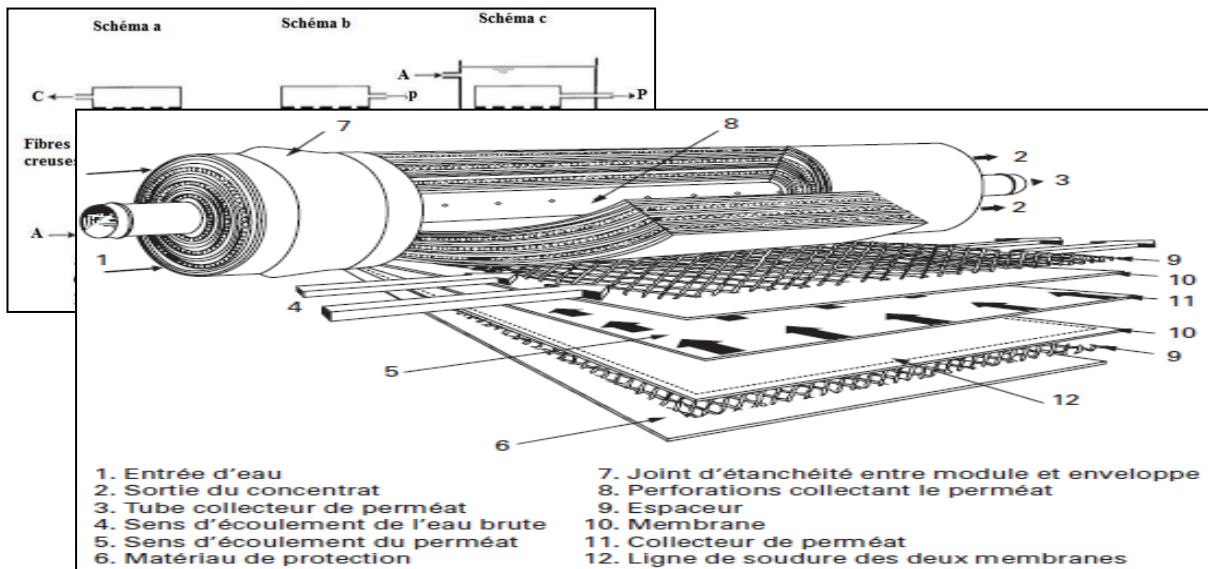


Figure n°14 : Module spirale. [27]

Figure n°15 : Module à fibres creuses. [33]

Modules à fibres creuses :

Ils contiennent plusieurs milliers de fibres dont le diamètre est de l'ordre de 1 mm Les faisceaux ainsi obtenus sont encollés aux extrémités de façon à assurer l'étanchéité entre le compartiment (perméat) et l'alimentation. L'alimentation peut se faire à l'intérieur (interne externe) ou à l'extérieur (externe-interne) des fibres creuses, selon que la peau active est à l'intérieur ou à l'extérieur de la fibre creuse. [35]

✓ **Pompe haute-pression HP et système de récupération d'énergie :**

Les pompe haute-pression d'alimentation des modules d'osmose inverse destinée au dessalement de l'eau de mer ainsi que les dispositifs de récupération de l'énergie hydraulique du concentrât qui y sont associés, représentent des postes très importants dans la conception des usines de dessalement, tant du point de vue de l'investissement, que de celui de l'énergie électrique nécessaire à leur fonctionnement. Les pompes haute-pression des membranes d'osmose doivent permettre d'assurer un débit d'eau à une pression donnée, tout en absorbant le minimum d'énergie. [36]

3.3.3. Comparaison des procédés de dessalement :

Tableau n°05 : Comparaison des procédés du dessalement. [27]

Critère	Distillation multi effets MED	Distillation par compression	Distillation multiflash	Osmose inverse
Débit eau traitée / Débit eau produite	3 à 4	2 à 3	7 à 9 (3 à 4 si on recycle)	1.5 à 2.5 selon salinité
Température de fonctionnement	40 à 70°C	60 à 70°C	60 à 120°C	Celle de l'eau à traiter
Salinité de l'eau produite	1 à 50 mg/l	1 à 50 mg/l	50 à 100 mg/l	Env 500 mg/l

Consommation énergétique	7.5 kWh/m ³	7 à 14 kWh/m ³	15 kWh/m ³	4 à 7 kWh/m ³
Echelle de capacité	10 à 25.000 m ³ /jour	< 5000 m ³ /jour	>25.000 m ³ /jour	Technologie modulaire valable pour toute capacité
Avantages	Cout de production 15 à 20% moins cher que le multi flash	Pas de vapeur Simplicité de fonctionnement	Technologie très prisée dans les pays du golfe	L'énergie consommée décroît avec la salinité à traiter
Inconvénients	Capacité plus faible que MSF	Capacité limitée	Investissement, consommation	Fragilité

3.3.4. Autres procédés de dessalement :

3.3.4.1. Nano filtration :

La nano filtration (NF) est aussi un procédé de séparation faisant intervenir la pression comme force motrice. Les membranes utilisées ont un seuil de coupure, variant de 1 à 5 nm, laissant passer les ions monovalents et molécules de diamètres équivalents. Ceux-ci contribuent à la valeur élevée de la pression osmotique de la solution. [37]

3.3.4.2. 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 8 et même 10 g/L. [38]

3.3.4.3. 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. [39]

3.3.4.4. 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 le 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. Éventuellement 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. [26]

3.4. Le post-traitement ou minéralisation :

En général, l'étape de post-traitement comporte deux phases principales ; l'ajustement du pH et la chloration.

3.4.1. L'ajustement du pH :

L'eau produite par un des procédés de dessalement est agressive, son pH est inférieur au pH de saturation. La correction de pH se fait à l'aide d'une solution alcaline, automatiquement en fonction du pH. [17]

3.4.2. Déminéralisations :

L'eau dessalée étant déminéralisée, il est nécessaire pour les usages de consommation de la remettre à l'équilibre calco carbonique, cette étape s'effectue généralement par le mélange d'une faible quantité d'eau mer ou saumâtre prétraitée et/ou l'ajout de réactifs tel que la chaux. L'OMS recommande des concentrations de 10 mg/L. en magnésium et 30 mg/L en calcium pour l'eau potable. [40]

3.4.3. La 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. [26]

Chapitre 3

PRESENTATION DE LA STATION SONAGHTER DE MOS- TAGANEM

1. Introduction :

L'Algérie a lancé ces dernières années, un programme ambitieux d'installations de stations de dessalement pour faire face à des problèmes de dessalement en stations de dessalement l'explosion démographique, le développement industriel et agricole ainsi que la sécheresse. Dans ce cadre, la station de dessalement d'eau de mer au niveau de la ville de Mostaganem fournit de l'eau pour combler le déficit en eau potable de la zone côtière.

2. Situation géographique de Mostaganem :

Le territoire de la commune de Mostaganem est situé à l'ouest de sa wilaya, à 363 km à l'ouest d'Alger, à 79 km à l'est d'Oran, à 48 km d'Arzew à 81 km au nord de Mascara.

3. Population :

Selon le recensement général de la population et de l'habitat de 2018, la population de Mostaganem est évaluée à 877 448 habitants.

4. Les données chimiques de l'eau de mer :

La salinité des eaux de mer du littoral de Mostaganem est de 35 à 36.5g/l, le pH est compris entre 7.60 et 8.24 et la conductivité est de 51 à 55 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

5. Stations de dessalement en Algérie :

L'Algérie a construit 13 usines de dessalement en 2011 un peu partout sur son territoire et projette de construire 43 usines pour 2019, dont la plus grande usine de dessalement d'eau de mer au monde (utilisant la méthode de l'osmose inverse). Le tableau 06 et 07 ci-dessous reflète une idée sur le nombre et l'échéancier des stations de dessalement :

Tableau n°06 : Grandes unités de dessalement

N°	Localisation	Capacité m3/j	Population à server	Echéancier prévisionnel
1	Kahrama (Arzew)	90 000	540 000	En Exploitation
2	Hamma (Alger)	200000	L'Algérois	En Exploitation
3	Skikda	100000	666 660	En Exploitation
4	Benisaf (Ain temouchent)	200000	1 333 320	En Exploitation
5	Mostaganem	200000	1 333 320	En Exploitation
6	Douaouda (Alger Ouest)	120000	666 660	En Exploitation
7	Cap Djenet (Alger Est)	100000	666 660	En Exploitation
8	Souk Tleta (Tlemcen)	200000	1 333 320	En Exploitation
9	Honaine (Tlemcen)	200000	1 333 320	En Exploitation
10	Mactaa (Oran)	500000	1 333 320	En Exploitation

11	El Tarf	50000	-	-
12	Ténès	200000	999 990	-
13	Oued Sebt (Tipaza)	100000	-	-

Tableau no 07: Petites stations (monoblocs)

Wilaya	Site	Commune	Capacité m3/j	Population à servir
Alger	Champ de tir	Zéralda	5000	33330
Alger	Plan Beach	Staoueli	2500	16660
Alger	La fontaine	Ain benian	5000	33330
Tlemcen	Ghazaouet	Ghazaouet	5000	33330
Tipaza	Bou Ismail	Bou Ismail	5000	33330
Skikda	L. Ben Mhidi	L. Ben Mhidi	7000	47000
Tizi-Ouzou	Tigzirt	Tigzirt	2500	16660
Oran	Bou sfer	Bou sfer	5000	33330
Oran	La dune	Ain Türk	2×2 500	33330
Ain-Temouchent	Bou zdjer	Bou zdjer	5000	33330
Ain-Temouchent	Chatt el ward	Bou zdjer	5000	33330
Boumerdes	Corso	Corso	5000	33330

6. Présentation de l'unité de désalement de l'eau de mer (Sonaghter Mostaganem) :

Le site de la station se trouve à l'extrémité du territoire de la commune de Mostaganem, à une distance de 12 Km environ de la ville, Les terrains envisagés à ce stade se trouvent au sud de la plage de l'oued Cheliff, ces terrains sont du domaine public. La station alimentera les agglomérations de la Willaya de Mostaganem.

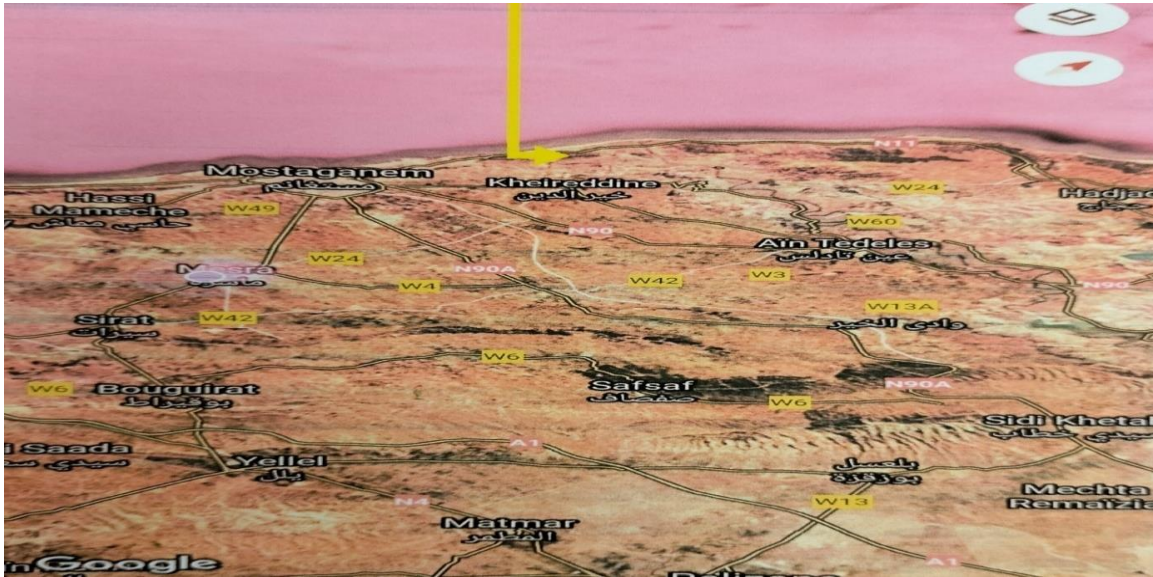


Figure n°16 : localisation de la station de déssalement de Mostaganem

7. Unité de déssalement Sonaghter de Mostaganem

7.1 Description de la station de Mostaganem :

L'usine de déssalement de Mostaganem, sise à plage de Cheliff (Mostaganem), a une capacité de production d'eau potable de 200.000m³/j.

L'usine de déssalement de Mostaganem est conçue pour fournir l'eau potable satisfaisant les exigences de qualité conformément aux prescriptions exigées et enfin avoir une consommation spécifique d'énergie électrique inférieure à la consommation spécifique d'énergie électrique garantie (3.40 kWh/m³).



Figure n°17 : Vue générale sur la station de déssalement de Mostaganem

PROCEDES DE DESSA- LEMENT DE LA STATION SONAGHTER DE MOS- TAGANEM

1. Introduction :

Les installations de dessalement par osmose inverse sont développées à partir de la fin des années 90, avec des capacités de production de plusieurs dizaines de m³/j, aboutissant à des débits pouvant atteindre 500 000 m³/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 Mostaganem. 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.

2. Fonctionnement de la station :

2.1. Captage et pompage de l'eau de mer :

Le système de captage pour un but impulser vers le prétraitement de l'eau de mer en quantité et à la pression nécessaire pour produire la quantité de l'eau potable désirée. Le système de captage comprend les sous-systèmes suivants :

2.1.1. Tours de captage et tuyauterie de captage :

Le captage de l'eau de mer se fait à travers de deux tours de prise connectées au réservoir de pompage d'eau de mer par deux tuyauteries en polyéthylène d'haute densité de 1.8 m de diamètre ou l'eau doit circuler à une vitesse d'environ 1 m/s. Les tours de prise sont submergées à une distance de la cote d'environ 2500 m et 16.5 m de profondeur. L'eau de mer passe à l'intérieur de chaque tour de prise à travers de quatre grilles en PRFV rectangulaire de 3,89 x 1,42 m et de trous de 3,54 x 1,30 cm installées pour éviter le passage de poissons, méduses, cailloux et des autres éléments de grande taille pouvant nuire le procès de traitement. Ces grilles peuvent être extraites par plongeurs pour éliminer des éventuelles incrustations.

2.1.2. Système anti-méduses :

Le système anti-méduses a été conçu pour générer un rideau d'air au tour des grilles que fasse flotter ces animaux et éléments vers la surface.

2.1.3. Système d'amorçage des pompes de l'eau de mer :

L'aspiration des pompes d'eau de mer sera normalement plus haute que le niveau d'eau du réservoir de captage. Ce système permet l'extraction de l'air des conductions d'aspiration des pompes d'eau de mer.

2.1.4. Système de pompage d'eau de mer :

Ce système a pour objet de fournir à l'eau de mer prétraitée la quantité et la pression nécessaire pour avoir la quantité d'eau produite désirée. Ces systèmes ont été conçus pour pomper un débit de 2380 m³/h à une pression de 67 m.c.e.



Figure n°18 : Salle de pompage captage

2.2. Système de prétraitement :

L'objet du système de prétraitement est de conditionner l'eau de mer du point de vu physique, biologique et chimique afin de protéger la performance du système RO et augmenter la durée de vie des membranes. Le système de prétraitement comprend sous-systèmes suivant

2.2.1. Conditionnement chimique :

Tableau n° 08 : Le conditionnement de l'eau par des réservoirs

Dosage	Capacité de traitement	Fonction
Hypochlorite de sodium	60 000 litres	La désinfection de l'eau de mer
Permanganate de potassium		L'oxydation et la désinfection de l'eau de mer.
Acide sulfurique	60 000 litres	Réduire le pH de l'eau de mer pour optimiser le rendement des procès.
Chlorure ferrique (coagulant)	40 000 litres	La coagulation de l'eau brute
Poly électrolyte (floculant)	25 000 litres	Améliorer la répartition des produits solides
Soude caustique	40 000 litres	Méta bisulfite de sodium
Inhiber le tartre dans le procès d'osmose inverse.	10 000 litres	La réduction et l'élimination des résidus de chlore dans l'eau d'entrée aux membranes.
Dispersant	2.500L	Augmenter le pH de l'eau micro-filtrée

2.3. Système de filtration :

Pour optimiser la durabilité des membranes d'osmose inverse et des cartouches des micro-filtres, il est recommandé maintenir la SDI en aval du système de filtration et en amont du système de microfiltration au-dessous de 3. Si la valeur de SDI recommandée est atteinte à la

sortie de la première étape de filtration, la deuxième pourra être dépassée.

2.3.1. Filtration de première étape :

L'usine est équipée avec deux lignes de filtration de première étape avec douze (12) filtres horizontaux à pression chacune, travaillant à une vitesse de $8,45\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^2$. Chaque filtre à une surface moyenne de filtration de $91,39\text{m}^2$ et un diamètre de $4,00\text{ m}$ d'une longueur totale $24,04\text{ m}$.



Figure n° 19 : Les filtres à sable

Tableau n° 09 : Caractéristique de la couche de filtration première étape.

Couche supérieur	
Nature	Anthracite
Granulométrie	0,8-1,6 mm
Densité apparent	$0,71 /\text{m}^3$
Densité réelle	$1,4\text{ t}/\text{m}^3$
Haut de couche	0,8 m
Volume par filtre	$73,3\text{ m}^3$
Couche inférieur	
Nature	Sable siliceux
Granulométrie	0,4-0,8 mm
Densité apparent	$1,5\text{ t}/\text{m}^3$
Densité réelle	$2,6\text{ t}/\text{m}^3$
Haut de couche	0,4 m
Volume par filtre	$36,67\text{ m}^3$

2.3.2. Filtration de deuxième étapes:

Il existe deux batteries munies de huit (8) filtres de pression horizontale chacun, travaillant à une de $12,87\text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$, Chaque filtre a une surface filtrante moyenne de $90,04\text{ m}^2$ avec les Mêmes dimensions et caractéristiques que celles des filtres à sable précédent.

Tableau n°10 : Caractéristique de la couche de filtration (deuxième étape).

Nature	Sable siliceux
Granulométrie	1-2 μm
Contenu de SiO ₂	96%
Densité apparente	1,5 t/m ³
Densité réelle	2,6 t/m ³
Haut de couche	0,45 m
Volume par filtre	94 m ³

2.3.3. Système de nettoyage des filtres :

La porosité de la masse filtrante des filtres sera réduite progressivement au fur et à mesure que les flocules et la matière suspendue soit déposés sur elle. Cette situation causera :

- Une augmentation des pertes de charge du système portant à une augmentation de la consommation électrique de l'usine.
- Une augmentation de la vitesse de l'eau de mer traversant le reste des filtres portant à une réduction de l'efficacité du procès de filtration pour cette raison les filtres doit être lavée périodiquement et dès qu'on détecte une augmentation importante du différentiel de pression et/ou diminution significative du débit traversant le filtre.

Le lavage des filtres sera fait par amélioration de la spongiosité avec air et contra-lavage de la masse filtrante avec la saumure du rejet du procès d'osmose inverse. Le système de nettoyage est doublé pour permettre le nettoyage simultané des deux filtres.

La vitesse de nettoyage maximale sera de 30 m³/m²/h.

2.4. Système de microfiltration :

La fonction du système de microfiltration sert à protéger le système d'osmose inverse en empêchant le passage des particules suspendues dans l'eau filtrée non-retenues par les filtres au système de pompage d'haute pression. La microfiltration ne permette que le passage des particules de taille <5 μm .



Figure n° 20 : les filtres à cartouches (microfiltration).

Le système de microfiltration consiste à deux lignes équipées avec neuf (9) filtres. Chaque filtre est muni de 360 cartouches de 1250 mm de longueur. Le débit unitaire par cartouche est de 2,85 m³/h.

2.5. Système d'osmose inverse :

Le système d'osmose inverse est le cœur de l'usine, il est composé des sous-systèmes suivants

2.5.1. Le système de pompage d'haute pression, pompe Booster et récupération d'énergie :

La fonction du système de pompage d'haute pression est impulser l'eau micro filtrée vers les châssis d'osmose inverse avec la pression nécessaire pour vaincre la pression osmotique en assurant la production du débit d'eau déminéralisée désirée. Approximativement le 65% du débit d'eau micro-filtrée requis sera impulsé vers les châssis par les pompes HP. Le reste du débit d'eau micro-filtrée requis sera pressurisé jusqu'à atteindre la pression d'attaque aux membranes nécessaire avec les échangeurs de pression (chambres d'isobares, et des pompes booster).



Figure n° 21 : Pompe haute pression (HP)

Dans les chambrées isobariques l'énergie hydraulique résiduelle de la saumure est transmise à l'eau micro-filtrée. Suite, les pompes boostées augmentent la pression de l'eau de mer poussée par les ERI, jusqu'à atteindre la pression d'alimentation aux châssis requis. L'eau micro-filtré pressurisée par les pompes d'haute pression et les pompes booster est impulsé vers un collecteur commun qu'alimente toutes les châssis de membranes d'osmose inverse.

2.5.2. Châssis d'osmose inverse :

Les membranes proposées sont de surface élevée de la marque FILMTEC. Elles sont fabriquées en polyamide aromatique avec une configuration spirale. Les membranes sont formées de sept unités (en série). De cette façon, l'eau brute pénètre axialement par un des extrémités de la carcasse traversant la membrane située en premier lieu.

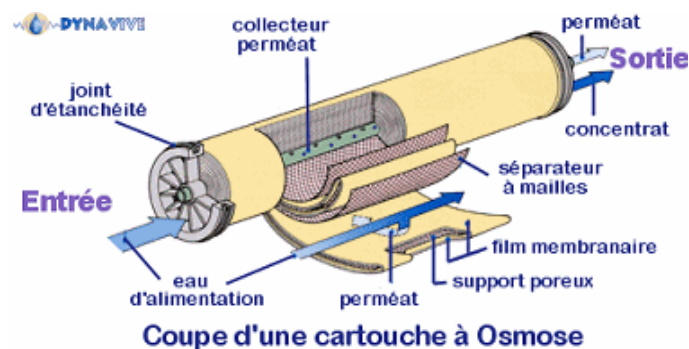


Figure n° 22 : Membrane FILMTEC

2.5.3. Nettoyage chimique :

Afin de maintenir sous contrôle les membranes d'RO contre les obstructions et les l'encrassement due aux matériaux colloïdes, aux petites précipitations on procède à un nettoyage chimique, il est nécessaire de les laver périodiquement ; lorsque :

- ▶ La perte de pression des membranes accroît de plus de 20% par rapport à la valeur initiale.
- ▶ Le passage des sels du module dépasse 30% des valeurs initiales.
- ▶ Le débit produit est inférieur à 15% du débit initial.

La fréquence des nettoyages dépend de la nature de l'eau, il est conseillé de laver les membranes une fois tous les 6 mois avec une solution pour le nettoyage qui traverse 2 filtres à cartouche jusqu'au différent châssis d'osmose inverse. Le système de nettoyage se compose d'un réservoir de 80 m³ de capacité où se prépare la solution pour le nettoyage.

2.5.4. Rejet de saumure et produits chimiques :

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

2.6. Système de Reminéralisation et conditionnement de l'eau osmose :

A la fin du procès d'osmose inverse l'eau osmotique est reminéralisée pour diminuer l'agressivité de l'eau et atteindre les valeurs d'alcalinité, dureté, pH, indice de langelier et MTD garanties. L'eau osmotique de chaque ligne d'osmose inverse est conduite vers le minéralisateur ra travers des collecteurs indépendant. Chaque collecteur transporte le débit de chaque ligne de production, soit : 100 000 m³/jour. L'eau est stockée dans un réservoir de 6 m de hauteur, à un quota suffisant pour permettre le passage de l'eau osmotique à travers les lits à calcite par l'effet de la gravité et atteindre ainsi, le réservoir de stockage de l'eau produit. Ce réservoir est divisé en deux de manière que les lignes de production restent dépendantes jusqu'à l'entrée du réservoir d'eau potable.

2.6.1. Dosage de dioxyde de carbone :

Le CO₂ sera stockée sous forme liquide, à -20 °C et 20,5 Kg/cm². Il sera ensuite évaporé jusqu'à sa forme gazeuse pour être enfin, introduit par des injecteurs dans la tuyauterie de sortie de la chambre d'eau osmotique. On dispose de deux réservoirs de stockage de 50 000 Kg chacun.

2.6.2. Lit de calcite :

Le système de reminéralisation est équipé avec deux lignes de lits calcite, chacun est composé par 30 cellules de 14 m² de surface unitaire. L'eau rentre par le bas de réservoir et elle est distribuée à travers d'un faux fond de lits. Ensuite l'eau monte depuis le bas de la couche de

filtration à carbonate calcique. Dans sa montée à travers de la couche se produit le rééquilibrage de composition chimique. Cependant, même si d'autres facteurs y participent, la consommation en calcite est reliée au contenu en CO₂. Le silo de stockage de la calcite situé dans la partie supérieure des couches permet de stocker les besoins en carbonate calcique pour plusieurs semaines. La recharge se fait à l'aide d'un pont roulant. L'eau minéralisée qui sorte des réservoirs à travers de ses creux latérales passe directement par gravitation au réservoir de stockage. Après le procès de reminéralisation la dureté et l'alcalinité de l'eau se voient augmentées. Le résidu en CO₂ en équilibre avec le HCO₃ déterminera le pH de l'eau traitée.



Figure n°23 : Lit de calcite

2.6.3. Système de lavage de lit de calcite :

Le système est composé par des soufflants et par des collecteurs qui fournissent l'air à chaque cellule de la reminéralisation. On utilise ce système afin de réduire le dé colmatage les cellules ou pour éliminer les petits contaminants du carbonate calcique.

2.7. Dosage de chlore résiduel :

Un système de chloration est prévu pour administrer une dose d'hypochlorite résiduel empêchant la décontamination de l'eau commercialisable dans le réseau de transport d'eau externe. La dose maximale prévue est 1,5 ppm. Ce réactif sera stocké dans un même réservoir cylindrique vertical fabriqué en polyester renforcé avec fibres de verre, avec une capacité de 20 000 L.

2.8. Stockage et impulsion de l'eau produite :

Ce système a pour objet de pomper l'eau produite vers le réseau de distribution à travers le réseau de transport d'eau externe géré par l'algérienne des eaux (ADE). Le système d'impulsion et de stockage d'eau produite est composé de :

- Réservoir d'eau reminéralisée.

► Système de pompage d'eau reminéralisée

► Regard de livraison.

Le réservoir d'eau reminéralisé a une capacité de 4000 m³ et il fabriqué en béton armé. Dans le pompage s'installent : un débitmètre, des transmetteurs de PH, un analyseur de chlore, un transmetteur de conductivité et un turbidimètre.

2.9. Réseau de transport de l'eau d'externe :

Le réseau de transport d'eau externe conduit l'eau commercialisable impulsée par le système de pompage d'eau produite de l'usine de dessalement Mostaganem. Ce réseau consiste à : Une conduite de refoulement en fonte de DN 1400,693 m de longueur

Chapitre 4

Contrôle de qualité

1. Introduction :

Pour faire une étude qualitative de l'eau de mer traitée après le processus de dessalement, il faut effectués des analyse montrant la potabilité de l'eau traitée. Le contrôle de qualité de l'eau douce obtenue par le dessalement de l'eau de mer de la station de Mostaganem se fait dans un laboratoire de l'unité ou sont effectués des analyses physico-chimiques.

2. L'ALGERIENNE DES EAUX (ADE)

2.1. Création de l'ADE

Sous la tutelle du ministère des ressources en eau, l'Algérienne des eaux est un établissement public national à caractère commercial et industriel doté de la personnalité moral et de l'autonomie financière. Elle a été créée à la suite de la réforme institutionnelle en gagé par les pouvoirs publics en vue d'assurer une gestion rationnelle de la ressource en eau. C'est de cette réforme institutionnelle qu'un décret exécutif N°01-101 du 27 moharrem 1422 correspondant au 21 Avril 2001 a officialisé la création de l'Algérienne des Eaux.

2.2 Laboratoire :

Le laboratoire d'analyses d'eau a pour but d'assurer la qualité d'eau destinée à la consommation en passant par le contrôle dans le réseau de distribution et réservoirs jusqu'au robinet des consommateurs. Pour cela des prélèvements des échantillons se font quotidiennement suivant un planning de sorties établie par monsieur le chef du laboratoire. La mission du control étant fini des fiches de prélèvement et réception sont remplies par le personnel désigné dans le planning du travail. Les analyses physicochimiques et bactériologiques se font le jour même de la prise d'échantillon pour avoir des résultats exacts. L'ensemble du personnel du service laboratoire ADE Mostaganem a pour missions en premier lieu la prévention et l'intervention en cas de grosse connexion. Le laboratoire d'analyses est composé de deux blocs :

- Le premiers bloc assure le contrôle les paramètres physicochimiques liées à la qualité d'eau.
- Le deuxième bloc pour la détection, identification et classification de l'ensemble des bactéries présente dans l'eau (en cas d'une mauvaise désinfection).



Figure n° 24 : différentes photos des deux blocs de Le laboratoire d'analyses

2.3 Organisation de laboratoire:

2.3.1 Personnel:

- Chef de laboratoire.
- chimiste pour les analyses physico-chimiques.
- 2 biologistes pour les analyses bactériologiques.

2.3.2 Machine et équipement :

Le laboratoire de l'ADE contient deux sales, une sale pour les analyses physico-chimiques, et l'autre pour les analyses bactériologiques. Ils existent dans ces sales le matériel suivant:

a) Laboratoire bactériologique :

-Hotte bactériologique -Réfrigérateur-Rampe de filtration-Autoclave-Milieu de culture-Pompe à vide -Bain marie.

b) Laboratoire physico-chimique :

-Etuve universelle-Distillateur-Dessiccateur-Hotte chimique -Plaque chauffante -Agitateur chauffant-Agitateur non chauffant-Conductimètre- PH mètre- turbidité mètre- balance analytique- Spectrophotomètre.

3. Matériels et méthodes

Objectif : Notre travail consiste à suivre la qualité physico-chimiques et bactériologie des eaux de mer traité par l'unité de dessalement SONACTERE de Mostaganem. Quatre échantillons ont été étudiés au niveau laboratoire d'ADE.

3.1. 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.

4. Protocole expérimentale et analyses physico-chimique

4.1. Paramètres organoleptiques

4.1.1. Test de la couleur

Le contrôle de la coloration se fait par simple observation à l'œil-nu dans des flacons en verre transparents.

4.1.2. Test de l'odeur et la saveur

L'odeur a été évaluée par sensation lors du prélèvement de l'eau et 48 h après un stockage des échantillons. La saveur est estimée par une simple dégustation six fois de suite.

4.1.3. Mesure de la turbidité

La mesure de la turbidité a été effectuée à l'aide d'un Turbidimètre (HACH, TL23) étalonné à 0,02 NTU. L'échantillon est analysé en utilisant des capsules en verre propres et sèches. Le résultat est affiché en NTU (Nephelométric Turbidity Unit).



Figure n°25 : Turbidimètre

4.2. Analyse physico-chimique :

4.2.1. Mesure de la conductivité :

La conductivité est définie comme l'habilité d'une substance à conduire le courant (présence d'ions). La mesure de la conductivité se fait à l'aide d'un appareil multi-paramètres à sonde (HACH, SensION7).

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 (ms/cm). Il faut également rincer la sonde après chaque mesure.

Conductivité typique des eaux :

- Eau ultra-pure 5.5 - 10⁻⁶ S/m.
- Eau potable 0.005 0.05 S/m.
- Eau de mer 5 S/m

4.2.2. Mesure de la température :

Pour des raisons de qualité organoleptique, l'objectif à poursuivre consiste à maintenir l'eau potable à une température égale ou inférieure à 15°C-20°C. Cette mesure de T° est effectuée sur les échantillons à l'aide d'un appareil multi-paramètres (HACH, SensION7) au niveau de laboratoire.

4.2.3. Mesure du pH :

Le PH permet de mesurer l'acidité d'une solution. Cette mesure est faite avec un autre appareil à sonde (HACH, sens ION TM+). En suivant le même mode d'opérateur que la conductivité.

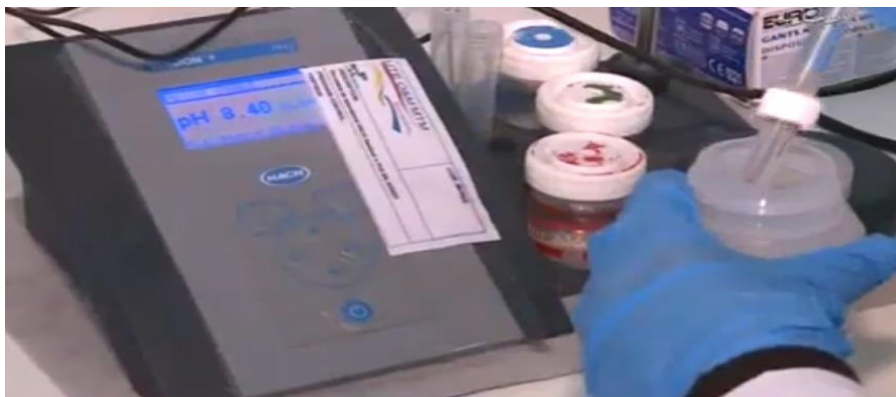


Figure n°26 : l'appareil de mesure le pH mètre (HACH, sens ION TM+).

4.2.4. Mesure la turbidité :

La turbidité est due à la présence dans l'eau de particules en suspension minérales ou organiques, vivantes ou détritiques. Ainsi, plus une eau est chargée en biomasse phytoplancton que ou en particules sédimentaires, plus elle est turbide. La mesure de la turbidité a été effectuée à l'aide d'un turbidimètre (HACH 2100Q) qui est étalonné d'avance, l'échantillon sera analysé en utilisant des capsules en verre bien nettoyées et bien séchées, remplis de l'eau à analyser et le résultat est affiché en NTU (Nephelométric turbidité unit).

- Une eau claire à une turbidité inférieure à 5 NTU, au-delà de 50 NTU l'eau est trouble.

4.2.5. 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 Palin test 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 rosâtre. L'intensité de cette couleur produite est proportionnelle à la concentration en Chlore Libre recherchée.

► Matériel et Réactif :

- cuve propre- Colorimètre- pipette graduée- Pastille DPD (chlore).

► Mode opératoire (Méthode Colorimétrique) :

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

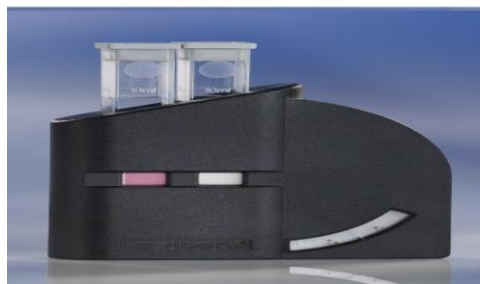


Figure n° 27 : Colorimètre

4.2.6. Mesure de la Dureté Total (TH)

Appelée aussi le titre hydrométrique (TH), détermine la concentration en sel de calcium et du magnésium dissout dans l'eau.

► Matériel et Réactif

-Erlenmeyer-Burette- d'Eriochrome T (N.E.T)- solution d'EDTA (0,02 N).- Tampon solution (pH=10)

► Mode opératoire :

Dans un Erlenmeyer de 250 ml, mettre 50 ml d'eau à analyser et ajouter 5 ml de la solution tampon et trois gouttes d'indicateur coloré Noir d'Eriochrome T (NET). La solution se colore en rouge foncé ou violet, à ce stade, une agitation avec un titrage par la solution d'EDTA jusqu'au virage au bleu permet de mesurer le TH. Les résultats sont exprimés par la formule suivante :

$$TH = (N_{EDTA} \times V_{EDTA}) \times 1000 / V_o \text{ (mg/L)}$$

N_{EDTA} : La normale de la solution EDTA V EDTA :

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

V_o : volume de l'échantillon.

4.2.7 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, auparavant le dosage se fait à un pH élevé (12-13). L'indicateur utilisé est le calcone carboxylique ou le Murixide qui est sensible aux seuls ions Ca^{+2} pour former un complexe rouge.

Matériel et Réactif :

-Erlenmeyer-Burette- Solution de NaOH (2N).- Murixide- 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 (2N) et une pincée de Murixide, puis remuer soigneusement pour homogénéiser la solution, une couleur rose se produit. Un titrage par l'EDTA (0.02N) a lieu jusqu'au virage vers le rose au mauve.

La dureté calcique est calculée par la formule suivante :

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

N_{EDTA} : La normale de la solution EDTA

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

V_o : volume de l'échantillon

Les résultats sont exprimés en mg/l, est donnés par l'expression suivante :

$$[Ca^{2+}] = Tca^{2+} * 4.008$$

Avec : 40.08 g/mol= c'est la masse molaire du calcium.



Figure n° 28 : le titrage (Calcium)

4.2.8. Détermination le Dosage du Magnésium (Mg^{2+}) :

La concentration en magnésium, exprimée en mg/l, est donnée par la relation suivante :

$$[Mg^{2+}] = TH - T_{Ca^{2+}} * 2,43$$

4.2.9. Titre alcalimétrique simple (TA) et Titre alcalimétrique complet (TAC) :

- Le titre alcalimétrique ou TA mesure la teneur de l'eau en alcalis libres et en carbonates alcalins caustique.
- Le titre alcalimétrique complet ou TAC correspond à la teneur de l'eau en alcalis libres, carbonates et bicarbonates.

► Matériel et Réactif

-Erlenmeyer-Burette-Solution d'acide sulfurique H_2SO_4 (N/50)-Solution de phénophtaléine 0.5%. - Solution de méthylorange à 0.5%.

► Mode opératoire :

Dans un erlenmeyer on introduit 50 ml d'échantillon 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 H_2SO_4 de 0.01N jusqu'à décoloration complète de la solution, dans le cas contraire le TA est nul, mixte.

$$TA = (N_{H_2SO_4} \times V_{H_2SO_4}) \times 1000 / V_o \text{ (mg/L)}$$

- $N_{H_2SO_4}$: normalité de H_2SO_4
- $V_{H_2SO_4}$: volume de H_2SO_4
- V_o : volume de l'échantillon

Utiliser l'échantillon traité précédemment ou le prélèvement primitif s'il n'y a pas eu de coloration. Ajouter 2 gouttes de solution méthylorange et titrer de nouveau avec le même acide jusqu'au virage du jaune au jaune orangé (pH4.3).

$$\text{TAC} = (N_{H_2SO_4} \times V_{H_2SO_4}) \times 1000 / V_o \text{ (mg/L)}$$

4.2.10. Détermination le Dosage de l'hydrogénocarbonate HCO_3^-

La concentration en hydrogénocarbonate, exprimée en mg/l, est donnée par la relation suivante :

Si TA = 0 :

Si TA \neq 0 :

$$[HCO_3^-] = \text{TAC} * 12.2$$

$$[HCO_3^-] = 0.2 \times [\text{TAC} - (2 * \text{TA})] * 12.2$$

Avec :

La masse molaire de $HCO_3^- = 61$ donc $61 * 0.2 = 12.2$

4.2.11. Détermination du carbonate de calcium ($CaCO_3^-$)

Pour déterminer la concentration en carbonate de calcium qui exprimé en mg/l est donnée par la relation suivante :

Si TA = 0 :

$$[CaCO_3^-] = \text{TAC} * 10$$

Si TA \neq 0 :

$$[CaCO_3^-] = (\text{TAC} - 2\text{TA}) * 10$$

4.2.12. Mesure de TDS

Les sels dissous totaux représentent une évaluation totale des sels minéraux contenus dans l'échantillon d'eau. Elle représente le rapport de la conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et de la concentration ionique (ppm). Son expression est : La conductivité en $\mu\text{s}/\text{cm} = K * \text{TDS}$ en **ppm** (partie par million)

- Pour l'eau **produite** **K = 0,5**

- Pour l'eau **de mer** **K = 0,61**

➤ Matériels et réactifs

- Un Becher-conductimètre

➤ Mode opératoire

- On mettre 100mL d'eau à analyser dans un bécher.

- On plonge l'électrode du conductimètre dans le bécher

- On lire le résultat directement (en mg/L).

4.2.13. Détermination des résidus secs R.S :

Elle est réalisée par élimination de l'eau par évaporation suivie de la pesée du résidu qui subsiste. Ainsi on peut simplement évaluer la teneur en matières dissoutes et 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 $105\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ ou $180\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$.
- 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.
- Sécher par passage à l'étuve à 180 °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 $180\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, se fait selon l'équation suivante :

$$RS = \frac{(M1 - M0) * 1000}{V}$$

Avec :

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

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

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

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

4.2.14. Mesure de la MTD :

Les matières dissoutes totales (MTD) sont les sels inorganiques et les petites quantités de matières organiques qui sont dissous dans l'eau. Leur principaux constituants sont habituellement les cations calcium, magnésium, sodium et potassium et les anions carbonates,

bicarbonates, chlorure, sulfate. La concentration plus grande du MTD peut rendre l'eau plus dure, lui donner un mauvais goût et entraîner des dépôts minéraux et de la corrosion.

► **Matériel et Réactif :**

- Bol de céramique- J'étais-Balance analytique.

► **Mode opératoire :**

Dans un bécher 100ml d'eau à analyser. Cette dernière est placée dans une étuve à 180°C pendant 24 heures. Le bécher est ensuite mis dans un dessiccateur qui permet de protéger l'eau contre l'humidité, peser le contenu immédiatement.

Remarque : Il faut peser le bécher vide avant l'expérience. La masse obtenue est alors la différence entre la masse du bécher remplie d'eau m_1 , et le bécher vide m_0 .

La méthode de calcul MTD :

$$MTD=(m_1-m_0) \times (1000/100).$$

4.2.15. Mesure de l'indice de Langelier ou pH de saturation (LSI) :

Le LSI est un calcul qui nous indique l'état corrosive ou incrustant de l'eau. L'indice de saturation ou indice de Langelier permettant de déterminer la stabilité du carbonate de calcium dans l'eau il indique si l'eau va précipiter, dissoudre ou être en équilibre avec le carbonate de calcium. Dans le laboratoire de la station de dessalement de Mostaganem, le calcul de l'indice de saturation est basé sur les valeurs de l'alcalinité, pH, T°, et la dureté ; qui se fait à l'aide d'un calcul informatique (intégrateur).

Cette indice devra se situer entre (0 et 0.4)

Si le ; $LSI = 0 \rightarrow$ l'eau est en l'équilibre chimique.

Si le ; $LSI < 0 \rightarrow$ l'eau a une tendance corrosive.

Si le ; $LSI > 0 \rightarrow$ l'eau a une tendance incrustante.

4.3. Paramètres chimiques :

Ces paramètres sont obtenus avec deux méthodes :

- **Le dosage par spectrophotomètre DR 5000.**

Les paramètres mesurés sont le nitrite, les nitrates, l'ammonium, les chlorures, le fer, les sulfates et l'ortho phosphore. L'appareil utilisé est du type DR 5000 doté d'un support pour les tests en cuve. Un laser identifie la cuve insérée grâce à son code-barres (IBR = Integrated Barcode Reading System). Le DR 5000 commence la mesure automatiquement et affiche le résultat en mg/l.

Tableau n°11 : 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
Sulfate	LCK353	150 – 900

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 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 réaction



Spectrophotomètre DR 5000



Boite LCK et le mode opératoire

Figure n°29 : spectrophotomètre et pack LCK

- **Dosage par photométrie de la flamme**

Le dosage par spectrophotométrie à flamme est un procédé rapide utilisé pour le dosage des éléments alcalins et alcalinoterreux. Les éléments à analyser (sodium, potassium, calcium... etc.) sont sous forme de sels. L'analyse est réalisée sur leurs solutions.

Le résultat est donné par lecture directe en mg/l.



Figure n°30 : photométrie de la flamme

4.4. Protocole expérimentale des Analyses bactériologique

Après la réception des échantillons, les analyses se font immédiatement pour la recherche et le dénombrement des germes suivants :

4.4.1. Germe totaux

Le dénombrement des Germe totaux se fait par la méthode de filtration membranaire de filtre d'un volume d'échantillon de 100 ml d'eau à analyser est filtré à travers une membrane du filtre de 0.22µm qui retient les micro-organismes. La membrane est ensuite placée sur le milieu du TGEA.



Lecture

Après incubation à 37°C durant 24h, des colonies blanches se forment à la surface de la membrane

4.4.2. Coliformes totaux :

Le dénombrement des *coliformes totaux* se fait par la même méthode du germe total sauf qu'ils sont placés sur le milieu du TTC tergitol.



Lecture

Après incubation à 37°C durant 24h, des colonies jaune orange se forment à la surface de la membrane.

➤ Test confirmatif

Pour effectuer une confirmation les colonies formées à la surface de la membrane sont repiquées dans un autre milieu liquide (VBL), les tubes de VBL seront ainsi incubés à 37°C durant 24h. Dans le cas positif de présence des *coliformes totaux*, on aura une présence du gaz (1/10) du volume avec un trouble.

4.4.3. Escherichia Coli :

Escherichia Coli fait partie du groupe des coliformes totaux et consiste le seul membre de ce groupe que l'on trouve spécialement dans les matières fécales des humaines et des animaux. Leur présence dans l'eau indique en présence de matières fécales. Elle est capable de fermenter le lactose à 44°C.



Technique

Le principe de dénombrement s'effectue de même manière que la recherche des coliformes fécaux sauf la température d'incubation dans ce cas est de 44°C/24 heure.



er lecture : Après 24 heures, on observe des colonies jaunes.

On va faire le test confirmatif c'est-à-dire le repiquage sur un milieu liquide de Schubert muni d'une cloche de durham et incubé à 44°C/24 heure.



eme lecture : On observe un anneau rouge sur la surface de milieu avec une production de gaz dans la cloche de durham. Donc on peut dire qu'il existe d'*E. Coli* dans l'eau.

4.4.4. Streptocoques fécaux:



technique

- Filtrer 100 ml d'échantillon sur une membrane de 0.22 µm de diamètre
- Placer la membrane sur une boîte de pétri contenant du milieu slanetz et bartley préalablement coulé et refroidi.
- Le milieu slanetz et bartley et un support nutritif contenant des substances inhibitrices qui laissent se développer préférentiellement colonies de streptocoques fécaux.
- Incuber les boîtes à 37 °C pendant 24 heures.

➤ **Lecture**

Après 24 heures on compte les colonies rouge violettes.

➤ **Test confirmatif**

On transfère la membrane de la boîte contenant le milieu slanetz à la boîte pétri contenant milieu BEA (Bile Esculine Agar)

On incube à 37 °C pendant quelque heure présence des points noirs.

4.4.5. Clostridium:



technique

- Chauffer l'échantillon à 80°C pendant 10 min pour la destruction des formes végétatives (formation des spores).
- Filtrer 100 ml d'échantillon sur membrane de 0.22µm de porosité pour permettre de retenir les spores des bactéries.
- Placer la membrane à l'envers sur la boîte de pétri.

- Couler au dessus la gélose viande foie.
- Incuber à 37 °C les Clostridium pousse dans des conditions en anaérobiose.

➤ **Lecture**

On procède à une lecture des 24heures considérer comme résultant d'une spore de bactérie anaérobie tout colonie noir entourée d'un halo noir exprimer le résultat en nombre de spores par 100 ml.

5. Résultats et discussion :

5.1. Paramètre physico-chimique :

Tableau n° 12 : Les concentrations des paramètres physico-chimiques des échantillons analysés de l'eau produite pendant 5 jours.

Chlore libre	Mg/l	0.2	0.2	0.2	0.2	0.15	0.19	≤5
TAC	Ppm	38.8	65.6	65	65	65.6	60	50 à 60
Calcium	Mg/l	21	20.6	18.6	24.6	21.24	21.20	≤75
Dureté	Mg/l(CaCo3)	96.9	73	81.4	111	70	86.46	≥65
Total des solides	Ppm	254	260	260	245	265	256.8	150≤TDS≤500
Conduct	µs/cm	508	520	520	490	530	513.6	1500
Temp	°C	23.7	24.9	24.5	24.1	22.8	24	
PH		8.2	8.2	7.8	7.9	8.2	8.06	6,5 à 8,5
Elément	Unité	03/06/2024	04/06/2024	05/06/2024	06/06/2024	07/06/2024	Moyenne	Normes

5.1.1. Potentiel 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 7.8 et 8.2 avec une valeur moyenne de 8,06. 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.

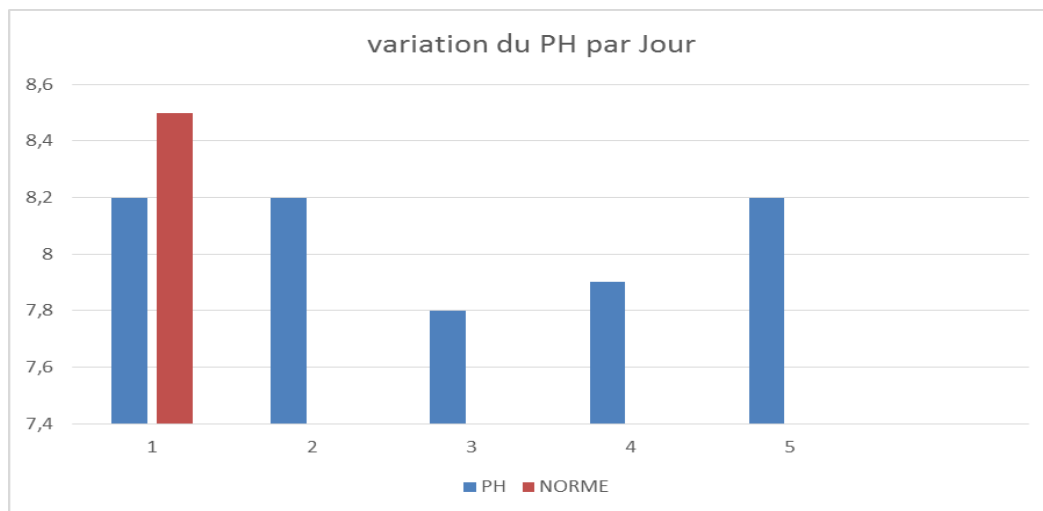


Figure n°31 : Variations quotidiennes du potentiel hydrogène

5.2. 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.

5.3. 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.

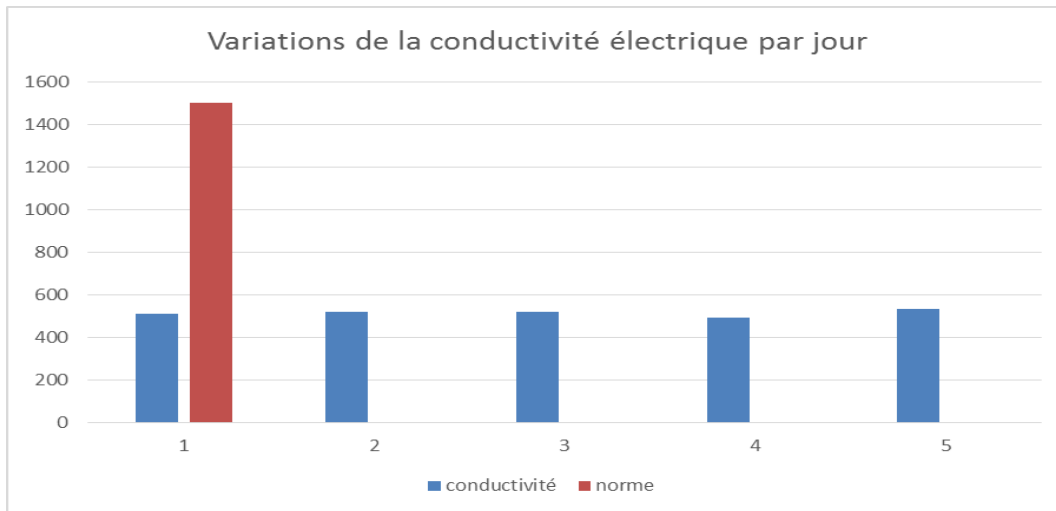


Figure n° 32 : Variations quotidienne de la Conductivité électrique.

5.4. 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 254 et 265 ppm, soit une valeur moyenne de 256.8 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.

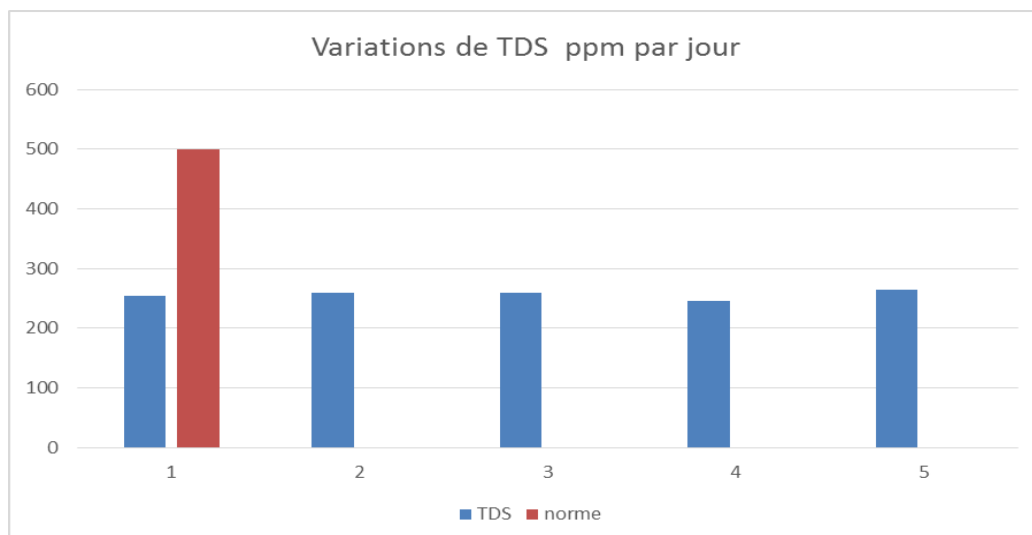


Figure n°33 : Variations quotidienne du Total des solides dissous

5.5. 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, cet élément présente une dureté allant de 70 à 111 mg/l en CaCO₃ avec une valeur moyenne de 86.46 mg/l. Les valeurs enregistrées s'avèrent inférieures à la valeur minimale admissible recommandée par les normes de l'OMS qui est 500mg/l. La présence des ions Ca² dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO₃), soit la dissolution de formations gypseuses (CaSO₄).

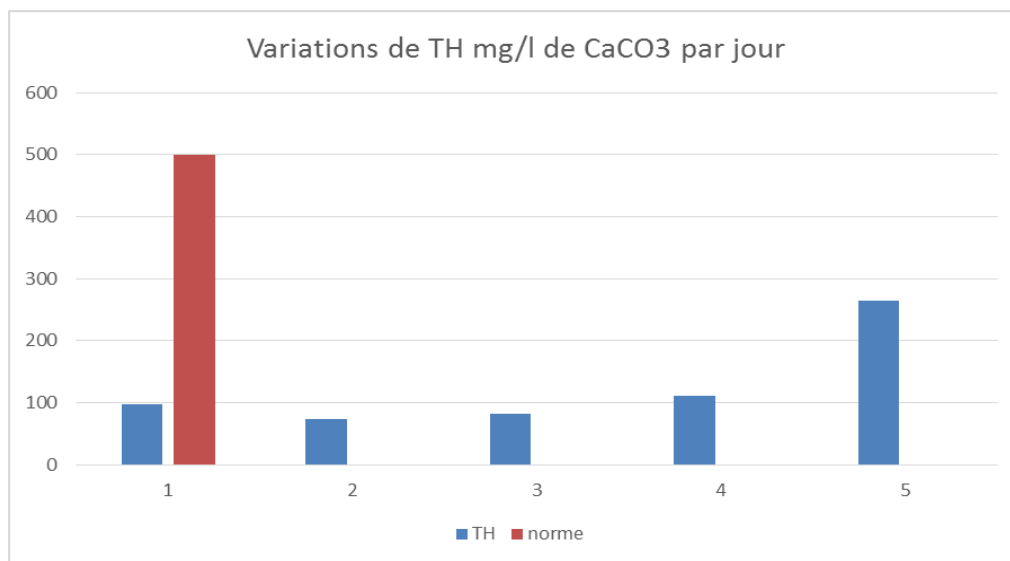


Figure n °34 : Variations quotidienne du titre hydrotimétrique

5.6. 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 18.6 et 24.6 mg/l CaCO₃ avec une valeur moyenne de 21.20 mg/l CaCO₃. Ces valeurs sont également conformes aux normes de l'OMS dont les concentrations maximales admissibles sont inférieures à 200 mg/l.

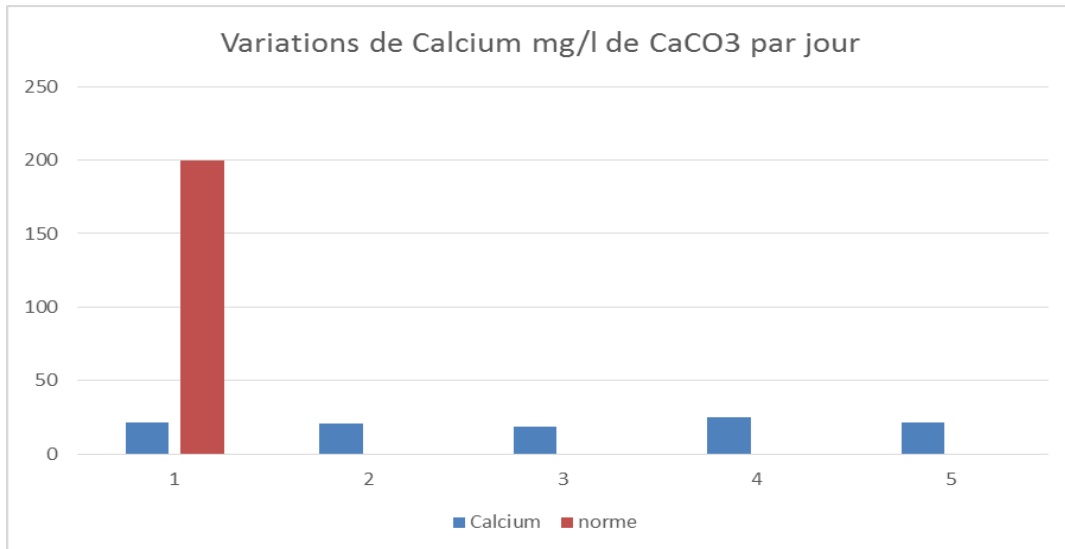


Figure n°35 : Variations quotidienne de la dureté calcique.

5.8. 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 38.8 et 65.6 ppm (Figure 44) avec une valeur moyenne de 60ppm. 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 $CaCO_3$

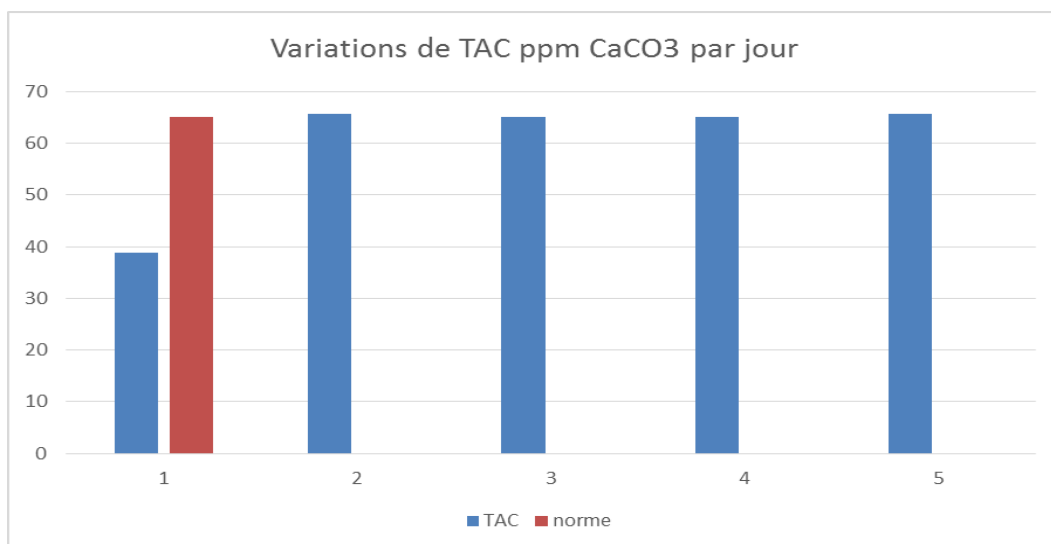


Figure n°36 : Variations quotidienne du Titre alcalimétrique complet.

5.10. 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 0,15 et 0,20 ppm (Figure...), avec une valeur moyenne de 0,19 ppm. Cette valeur est largement inférieure à la valeur préconisée par l'OMS qui est de 5ppm

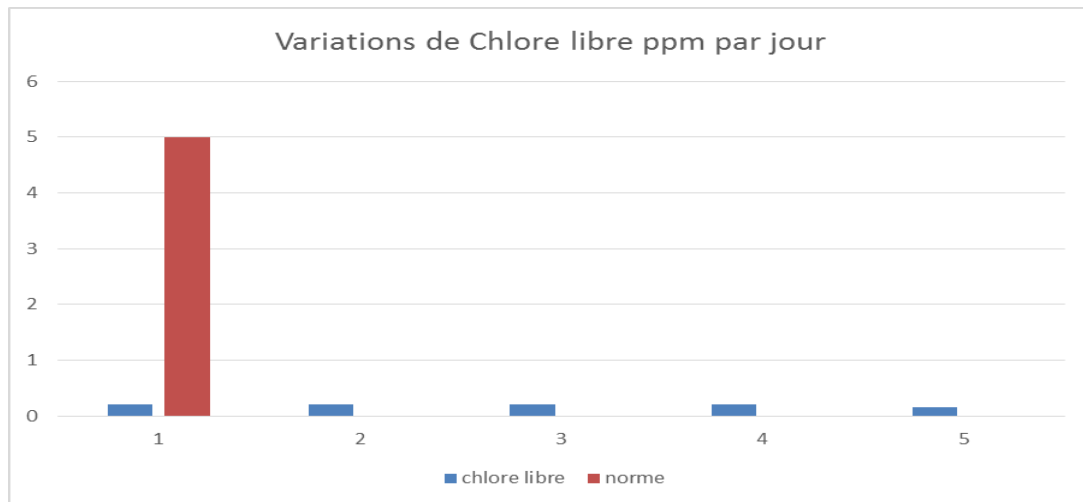


Figure n°37 : Variations quotidienne de la teneur en Chlore libre.

Résidus secs (R.S) :

Le paramètre R.S présente des valeurs convenables pour une eau de consommation humaine, selon l'OMS.

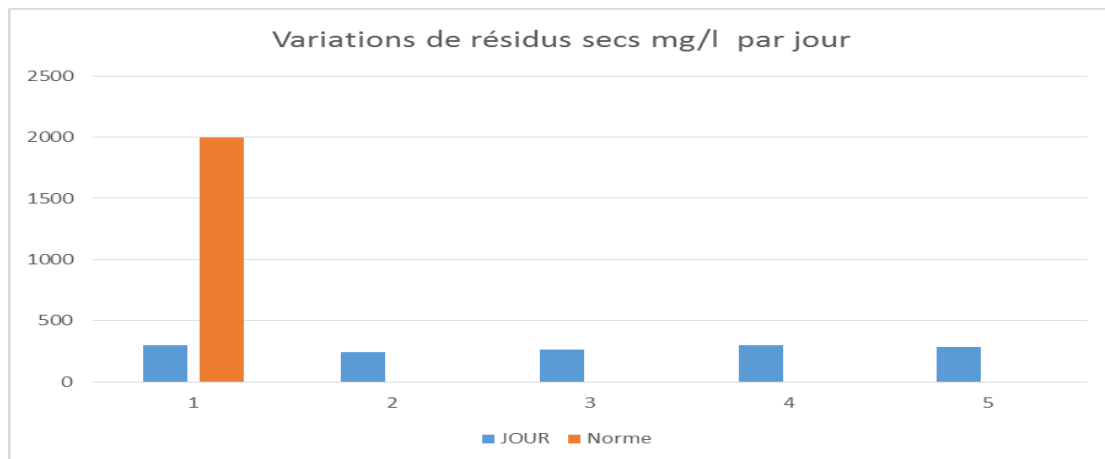


Figure n°38 : Variations quotidienne de résidus secs.

5.2. Paramètre bactériologique :

Tableau n°13 : Résultats bactériologiques

paramètre	Echantillon				Norme
	1	2	3	4	
Germes totaux	0	4	3	0	10
Coliformes totaux	0	1	0	2	0
Escherichia. Coli	0	0	0	0	0
Streptocoques fécaux	0	0	1	0	0
Clostridium	0	0	0	0	0

Germes totaux : montrent une absence totale des Germes totaux dans l'eau de l'échantillon 1, 4 de l'échantillon 2, 3 de +l'échantillon 3 et 0 de l'échantillon 4 qui est identifier avec les normes d'OMS et Algérienne.

Coliformes totaux : absence des coliformes totaux dans é1et 3 avec 1 dans l'échantillon 2 et 2dans l'échantillon 4

E. coli : montrent que une absence totale de *E. coli* dans l'eau analysé 1, 2, 3 et 4ce qui répond aux normes d'OMS et Algériennes.

Streptocoques fécaux : montrent une absence totale de *Streptocoque* dans toutes les échantillons exception le 3ème échantillon 1, et ça identifié aux normes d'OMS et Algérienne

Clostridium : montrent que une absence totale de Clostridium dans les quatre échantillons ce qui répond aux normes d'OMS et Algériennes.

5.3. Paramètre organoleptique :

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.

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.

Saveur

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

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, ce qui veut dire que l'eau n'est pas turbide

5.4. Paramètre chimique :

Tableau n° 14 : Les concentrations des paramètres chimiques des échantillons analysés de l'eau produite pendant 5 jours.

Paramètre	unité	1 jour	2 jours	3 jours	4 jours	5 jours	Les normes OMS
Chlorure	Mg/l	128	128,12	120	124,11	131	≤600
Ammonium	Mg/l	0,01	00	0,01	0,04	0,02	0,2-0,3
Nitrite	Mg/l	00	00	00	0,019	00	≤0,1
Nitrate	Mg/l	00	1,40	1,20	1,30	0,3	≤50
Sulfate	Mg/l	00	00	2,40	2,62	00	≤400
Ortho phosphore	Mg/l	00	00	00	00	00	/
Fer	Mg/l	0,12	0,11	0,12	0,10	0,03	≤0,3
potassium	Mg/l	4,1	4,5	4,3	7,8	5,9	≤15
Sodium	Mg/l	30	90	85,1	65,9	46	≤250
Magnésium	Mg/l	0,91	0,48	0,48	0,53	0,71	≤150

Chlorure (Cl⁻):

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 600 mg/l (norme OMS). Nos résultats d'analyses montrent une présence d'une teneur en chlorure qui varie entre 120 et 131 mg/l, Cette variation est due à l'étape de poste chloration qui enrichie également cette eau en chlorures.

Ammonium (NH₄⁺) :

Nos résultats d'analyses montrent une présence faible d'ammonium qui varie entre 00 et 0.04 mg/l, Ces valeurs sont également conformes aux normes de l'OMS.

Nitrites (NO_2^-) :

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 0.0 à 0.019 mg/l, valeurs qui restent relativement inférieures à la valeur recommandée en nitrites selon l'OMS (0.1 mg/l).

Nitrates (NO_3^-) :

Les nitrates transformés en nitrites, 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. La norme de potabilité pour l'eau est 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 minimal de 0.0 mg/l et un maximal de 1.40 mg/l et qui restent d'ailleurs inférieures à la valeur admissible de la norme de l'OMS 50 mg/l.

Sulfates (SO_4^{2-}) :

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 400 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. Cette eau à une teneur en sulfate qui varie entre 0.0 et 2.62 mg/l. 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.

Ortho phosphore :

Nos résultats montrent une absence totale de la concentration d'ortho phosphore dans l'eau des échantillons étudiée.

Fer (Fe^{2+}) :

Les concentrations des eaux traitées en Fer varient de 0,03 à 0,12 mg/l . Ces valeurs sont inférieures à la norme algérienne de potabilité de l'eau qui est de 0.3mg/l.

Potassium (K⁺) :

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. La mesure des teneurs en potassium montre des valeurs variant de 4.1 à 7.8 mg/l .Ces valeurs restent relativement inférieures à la valeur recommandée selon l'OMS, fixée à 15 mg/l.

Sodium Na⁺ :

L'OMS fixe une norme de ([Na⁺] = 150 à 200 mg/l) pour une eau convenable à la consommation humaine, et les normes Algériennes de la potabilité des eaux à (250 mg/l).

Magnésium Mg⁺² :

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 0.48 et 0.91 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

6. Conclusion :

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, se sont révélées très faibles. 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'hypertension, l'arythmie cardiaque et la possibilité de diabètes 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 et bactériologiques de l'eau produite par la station de Mostaganem sont conformes aux normes de l'OMS à la norme Algérienne et peuvent répondre aux besoins des consommateurs. 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 membrane

(Membrane, 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 membrane, une eau idéale ne devrait pas dépasser 25 mg/l. 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 Mostaganem 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 SONACTER.

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.

Les références :

- [1].**FITAS Falla**. Le dessalement de l'eau de mer, promotion :(2018-2021)
- [2].**CLEMENT 1990**. (Larousse agricole) Edition Larousse (p48).
- [3].Wikipédia <https://fr.wikipedia.org> > wiki > W...Wikipédia
- [4].**BOUKELLAL. I, HANANE .A**, mémoire fin d'étude, ETUDE DU PROCEDE DE DESSALEMENT DE LEAU DE MER ET DE LA QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DE LEAU DESSALEE DE LA STATION DE CAP DJINET DE LA WILAYA DE BOUMERDES. Université Abderrahmane MIRA de Bejaia 2015.
- BAKALOWICZ.M**, Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques, Agence de l'eau Rhône-Méditerranée, Corse, 1999
- [5].**HENRI. L, KAMEL. F**, Dessalement de l'eau de mer et des saumâtres par Osmose Inverse, Middle East Désaliénation Research Center en collaboration avec L'université Saad Dahlab de Blida, Algérie, Janvier 2008.
- [6].**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
- [7].**MONIK .H**. les eaux naturelles et les eaux de consommation, saint Laurent, 1991
- [8].**SAVARY P**. (2010) Guide des analyses de la qualité de l'eau .territorial édition
- [9]. **LE CALVÉ, O.**, Propriétés Physiques du Milieu Marin, Institut des Sciences de l'Ingénieur de Toulon et du Var, France, 40pages, mai 2002.
- [10].**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 Arbaoui Abdallah ,100 pages 2013.
- [11]. <https://www.marimer.fr/eau-de-mer>.
- [12]. **HERVE.M.**, Composition et Salinité de l'eau de mer, pp. 1-8, mars 2014.
- [13].**HENRI, L., KAMEL, KAMEL, F.**, Dessalement de l'eau de mer et des saumâtres par Osmose Inverse, Middle East Désaliénation Research Center en collaboration avec L'université Saad Dahlab de Blida, Algérie, Janvier 2008.
- [14]. **RODIER J**. (2009). L'analyse de l'eau 9eme édition Dunod, Paris, 2009. ISBN 978-2-10-054179-9.(1526p).
- [15].**MOULIN. B**, Le kayak et la mer, édition le Canotier, 2004.

- [16].**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.
- [17].**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.
- [18].**HADJALI, Y.**, Impact des stations de dessalement de l'Eau de mer sur le littoral cas de la station plage El Hillel Ain Ti mouchent, Mémoire de fin d'études, Master, Université Bou Bekr Belkaid Tlemcen, (91 pages, 2012).
- [19]. **James D. Birkett**, L'histoire du dessalement avant son utilisation à grande échelle, dans Histoire du dessalement et des ressources en eau, développement et gestion des ressources en eau, Volis. (2012) Paris : Unesco. pp.381-4341 (Encyclopédie des systèmes de survie).
- [20]. **PASTOR Jean**, Pauli Anne-Marie (1995). Dialyse. Chromatographie et techniques séparatives. Paris : Techniques de l'Ingénieur (p 1525).
- [21].**BOUMATI REZKI ET SADOK FATEH**, Prétraitement des eaux de mer par coagulation floculation. Mémoire de master spécialité chimie de l'environnement, université Mouloud Mammeri Tizi ousou, (p8,2017).
- [22]. **MAUREL, A.**, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, 2eme édition, TEC &doc.286p, 2006.
- [23]. **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
- [24].**BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES (BRGM).**, Quelles techniques pour quels traitement- analyse coûts, bénéfiques, Rapport BRGM/RP-58609-FR, Orléans, France, Juin 2010.
- [25].**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.
- [26].**BOUKELLAL Imane et HANANE Abdelghani.** Étude du processus de dessalement de l'eau de mer et de la qualité physico- chimique de l'eau dessalée de la station de Cap Djenet de la wilaya de Boumerdes. (2015)
- [27]. **DANIS, P.**, Dessalement de l'eau de mer, Technique de l'ingénieur, Traité génie des procédés référence ; J 2700-18, 2003.
- [28]. **UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP)**, Impacts

- environnementaux du dessalement d'eau de mer, Posté par Jean-Luc Dothee, 17 février 2003.
- [29]. **RENAUDIN Viviane**. Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres [Revue]. - Nancy Brabois : Educsol, 18 novembre 2003
- [30]. **Jean-Pierre Méricq**. Approche intégrée du dessalement d'eau de mer : Distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilités de couplage avec l'énergie solaire, doctorat de l'université de Toulouse, (p36, 2009).
- [31]. **MOUDJEBER Djamel-Eddine**, pour obtenir le grade de DOCTEUR ès SCIENCES en Génie Mécanique (2014/2015)
- [32]. **fethallah Tajeddine BOUMEHDI**. Contribution à l'étude du colmatage des membranes d'osmose inverse cas de TMM EI MAGTAA MASTER ACADEMIQUE (2018/2019).
- [33]. **Berland Jean-Marc et Jury Catherine**. Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau, Document technique n°14 du Direction de l'Espace Rural et de la Forêt (Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales- France), 2002.
- [34]. **CHABANE Mustapha**. Doctorat en chimie (2015).
- [35]. **EL KHABBAZE H.** (2008) Traitement des solutions modèles du lait par des membranes de nano filtration et d'osmose inverse chimie. Thèse de d
- [36]. **CORSIN P., CEDRIC M. (2003)**. Les pompes hautes pression adaptées aux usines de dessalement d'eau de mer par osmose inverse, le thème du mois : les pompes, La revue l'eau, l'industrie, les nuisances, n°265, doctorat. Université Mohamed v AGDAL faculté des sciences rabat, Maroc.
- [37]. **NORREDINE NORA**. Diplôme de magister, étude d'impact des rejets des eaux de la station de déminéralisation de Brédéah sur l'environnement (2008).
- [38]. **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.
- [39]. **MANDRI, Y.** Etude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froid, Thèse de doctorat, génie des procédés, université Claude bernard lyoul, d'ordre: CT12, 2011.
- [40]. <http://www.seor.dz/metiers-de-leau/traitement-de-leau/>