

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Faculté De Technologie
Département D'hydraulique

Projet de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme de Master en Hydraulique
Option : Technologies de Traitement Des Eaux

Thème

**Etude de l'influence de différents matériaux filtrants sur le prétraitement des eaux de mer :
application sur les eaux de la station de dessalement de Honaine**

Par : M^r BENALLOUDA Mohammed Ali

Devant les membres du jury

M^r Z. DEBBAL
M^r T. TORKI HSSAINE
M^r A. CHIBOUB FELLAH
M^r M. BOUMEDIENE

Président
Examineur
Examineur
Encadreur

Année Universitaire : 2012-2013

REMERCIEMENT

Avant tout, je remercie ALLAH, Dieu tout puissant le Miséricordieux l'unique, de m'avoir donné le courage, la patience et l'énergie pour terminer ce travail en bonne et du forme.

Je tiens à exprimer mon profond remerciement et ma sincère reconnaissance à mon encadreur M^r M. BOUMEDIENE qui m'a accordé le temps de diriger et orienter mon travail, et qui a été disponible tout au long de l'élaboration de ce mémoire de fin d'étude.

Je tiens aussi à remercier Monsieur le président de jury M^r Z.DEBBAL ainsi que les examinateurs M^{rs} A.CHIBOUB FELLAH et T.TORKI HSSAINE qui me font l'honneur de juger ce travail.

J'adresse aussi mes sincères gratitude à M^r Le chef de la station de dessalement de la ville de HONAIN qui m'a accepté au sein de son usine comme stagiaire et surtout M^{me} W.BELACHOUI la responsable du laboratoire et toute l'équipe de la station de dessalement qui m'ont fournis leurs savoir faire ;

Mes salutations les plus distingué à toute personne ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail je site par cela tout mes amis & collègues ainsi que toute l'équipe pédagogique de notre université.

DÉDICACES

Avec l'aide et la protection de DIEU s'est faite la réalisation de
ce modeste travail.

Je dédie ce travail à :

Ma très chère mère qui m'a toujours apportée son amour et son
affection

Toute ma famille et belle famille

Mes camarades de promo d'hydraulique

Option : Technologie et Traitement des Eaux (TTE)

2010/2013

Et tous se qui ont connu Mohammed Ali

Résumé

Les membranes d'osmose inverse sont souvent exposées au phénomène de colmatage. En effet, les eaux de mer contiennent des particules solides, des bactéries, des algues, etc.... Si le prétraitement de l'eau est insuffisant, les membranes risquent de se détériorer rapidement. L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de différents matériaux filtrants à savoir : le sable, l'antracite et le gravier sur l'efficacité du prétraitement des eaux de mer de la station de dessalement de Honaine (wilaya de Tlemcen). Plusieurs paramètres de l'eau relatifs à cet effet ont été analysés avant et après filtration. Ceci inclut: la turbidité, les matières en suspension, la salinité, la conductivité et le pH. Les résultats ont montré l'efficacité de ces matériaux pour le prétraitement des eaux de mer. La teneur des matières en suspension (MES) et de la turbidité dans l'eau prétraitée par les filtres sont presque nulle et la salinité de l'eau de mer n'a pas été modifiée.

Mots clés : dessalement, membrane, osmose inverse, eaux de mer, prétraitement

Abstract :

Membranes of reverse osmosis are often exposed to the phenomenon of fouling. seawaters contain some strong particles, bacteria, algae, etc.... If the pretreatment of seawater is not sufficient, membranes risk to be deteriorate quickly. The aim of this work is to study the effect of different médiums of filtration: sand, anthracite and gravel on their efficiency for the pretreatment of the seawaters for the desalination plant of Honaine (Tlemcen). The effect of several parameters of water have been analyzed before and after filtration. these includes: turbidity, suspended matters, saltiness, conductivity and pH. The results showed the efficiency of these materials for the pretreatment for the seawaters. The content of suspended matters and the turbidity values in water pretreated by filters is nearly hopeless and the saltiness of the seawaters has not been modified.

Key words : desalination, membrane, reverse osmosis, seawaters, pretreatment

LISTE DES MATIÈRES

Remerciement	
Dédicace	
Résumé	
Liste des matières	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction générale	1
Chapitre I: Généralités sur le dessalement de l'eau	
I.1. Introduction	3
I.2- Procédés de dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres:	4
I.2-1- La distillation:	4
I.2-2- La congélation:	7
I.2-3- Les procédés membranaires :	7
I.2-3-1- L'électrodialyse :	7
I. 2-3-2- L'osmose inverse:	8
I.2-4- L'échange d'ions (procédés agissant sur les liaisons chimiques):	13
I.2-4-1- Définition:	13
I.2-4-2- Les résines échangeuses d'ions:	13
I.2-4-3- Application de l'échange d'ions :	15
I.3- Conclusion	18
Chapitre II: Procédés de prétraitement des eaux de mer	
II.1. Introduction :	19
II.2- Le prétraitement conventionnel	19
II.2-1- La préfiltration grossière	19
II.2-2- La chloration	19
II.2-3- L'ajustement du pH	20
II.2-4- La Coagulation - floculation -décantation	20
II.2-5- La filtration sur sable mono ou multicouche	23
II.2-6- La déchloration et antitartre	25
II.2-7- La filtration à cartouche	25
II.3- Le prétraitement par membranes :	26
II.3-1- La microfiltration	26

II.3-2- L'ultrafiltration	26
II.4-Conclusion :	29
Chapitre III: Présentation et description de la station de dessalement de Honaine	
III.1. Présentation de la station de la ville de Honaine :	30
III.2-Description des étapes de traitement :	32
III.2.1-Phase de Captation d'eau de mer et de pompage:	34
III.2.2- Phase de prétraitement de l'eau:	41
III.2.3- Phase d'osmose inverse: Bâtis de membranes, pompes à haute pression, pompe de recirculation et système d'échange de pression:	43
III.2.4- Phase de reminéralisations de l'eau (Post-traitement):	44
III.2.5. Pompage de l'eau dessalée :	44
Chapitre IV: Matériel et méthodes	
IV-1. Introduction	45
IV-2- Matériel et Méthodes d'analyses	45
IV-2-1- Température :	45
IV-2-2- pH :	45
IV-2-3- Conductivité/salinité:	46
IV-2-4- Turbidité :	47
IV-2-5-Matières en suspension (MES) :	47
Chapitre V: Résultats et Interprétations	
V.1. Introduction	49
V.2. Résultats et interprétations	49
V.2.1. Le pH	49
V.2.2. La conductivité électrique	50
V.2.3. Les matières en suspension (MES)	50
V.2.4. La salinité	51
V.2.5. La turbidité :	52
V.3. Conclusion	52
Conclusion générale	54
Bibliographique	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Avantages et inconvénients des différents types de membranes	13
Tableau III.1: Principales caractéristiques de fonctionnement de la station de dessalement de Honaine	31

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Procédés de dessalement des eaux	4
Figure I.2: Procédé de dessalement par distillation multi flash MSF	5
Figure I.3: Procédé de dessalement par distillation à multiples effets (MED)	6
Figure I.4: Procédé de dessalement par compression de vapeur	6
Figure I.5: Schéma d'une unité d'électrodialyse alimentée en parallèles	7
Figure I.6 : Principe de l'osmose et l'osmose inverse	8
Figure I.7: Schéma d'une installation d'Osмосe Inverse	9
Figure I.8: Membrane en acétate de cellulose	11
Figure I.9: Membrane en polyamide	11
Figure I.10: Membrane en poly sulfone	12
Figure I.11: Représentation schématique de billes de résines échangeuses de cations et d'anions	14
Figure I.12: Adoucissement (échange sodium) dans une bille de résine	15
Figure I.13: Déca ionisation (tous les cations sont remplacés par H ⁺).	16
Figure I.14: Les billes de résine sont saturées.	17
Figure II.1: Particule colloïdale et double couches	21
Figure II.2: Prétraitements conventionnels à l'osmosse inverse	25
Figure II.3: Domaine d'application des membranes de filtration	27
Figure III.1: Photo de la station de dessalement de Honaine	30
Figure III.2 : Schéma des étapes de traitement à la station de dessalement de Honaine	32
Figure III.3: Photo du poste de pompage d'eau de mer	33
Figure III.4 : Photo du bloc de pompes de captation	33
Figure III.5 : Photo d'une citerne de stockage d'hypochlorite de Sodium	35
-Figure III.6 : photo de la citerne de stockage de chlorure ferrique	35
Figure III.7: Photo des citernes de stockage du métabisulfite de sodium	36
Figure III.8: Schéma de l'étape de filtration	38
Figure III.9: photo des filtres multicouches	39
Figure III.10: Photo d'un filtre à cartouche (microfiltration)	40
Figure III.11: Photo du bloc d'osmosse inverse	41
Figure III.12: Schéma du système de récupération d'énergie PX	43
Figure IV.1: Photo du pH mètre portable pH 25	46
Figure IV.2 : Photo du conductimètre portable CM 35	46

Figure IV.3 : photo du turbidimètre HACH	47
Figure V.1: Variation journalière du pH de l'eau de mer avant (entrée) et après filtration (sortie)	49
Figure V.2: Variation journalière de la conductivité de l'eau de mer avant (entrée) et après filtration (sortie)	50
Figure V.3: Variation journalière de la concentration des matières en suspension (MES) dans l'eau de mer avant (entrée) et après filtration (sortie)	51
Figure V.4: Variation journalière de la salinité de l'eau de mer avant (entrée) et après passage à travers les filtres (sortie)	51
Figure V.5: Variation journalier de la turbidité de l'eau de mer avant (entrée) et après passage à travers les filtres (sortie)	52

INTRODUCTION

Introduction générale

L'eau est une des ressources les plus importantes de la planète. Par contre, l'alimentation en eau potable peut être limitée en quantité et/ou en qualité. La limitation du point de vue qualitatif est illustrée par le fait que 97 % de l'eau de la terre est contenue dans des océans et a une teneur en sels d'approximativement 35g/l ce qui limite énormément l'utilisation de cette immense quantité d'eau comme source d'eau potable.

La raréfaction des ressources en eau douce devient préoccupante. En effet, près d'un individu sur six dans le monde n'a pas accès à une eau potable sûre et abordable, et près de deux sur six ne disposent pas d'installations sanitaires. L'eau douce n'est pas uniformément distribuée à la surface de la terre. Certaines régions dans le monde affectées par des pénuries chroniques en cet élément vital. Avec ce déficit aussi conséquent, le recours au dessalement des eaux de mer ou les eaux saumâtres en vue d'un usage destiné exclusivement à l'alimentation de la population en eau potable est indispensable.

Dans la pratique, il existe plusieurs méthodes de dessalement des eaux. On distingue : la distillation thermique (simple ou à multiples effet), l'échange d'ions et les procédés membranaires (électrodialyse, osmose inverse). En raison de sa consommation faible en énergie, l'osmose inverse occupe une place importante dans les installations de dessalement d'eau. En Algérie, un nombre important en usines utilise ce procédé.

Cependant les membranes utilisées dans l'osmose inverse sont très sensibles au colmatage. Si un prétraitement de l'eau de mer s'avère insuffisant, les membranes risquent facilement de se détériorer sous l'effet de l'accumulation progressive de particules, de bactéries, etc.... près de leurs surfaces. Pour ce fait, un bon prétraitement de l'eau de mer, avant admission sur les membranes, est toujours nécessaire. Celui-ci a pour but de prolonger la durée de vie des membranes et à réduire le colmatage.

Il existe différent types de prétraitements des eaux de mer. On y trouve les prétraitements chimiques et les prétraitements physiques. Les premiers reposent sur l'utilisation de procédés physico-chimiques tel que : la coagulation-floculation-décantation, la filtration mono ou multicouche, la microfiltration ou encore l'ultrafiltration. L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence de certains matériaux filtrants (sable, anthracite, gravier) utilisés dans la station de dessalement de Honaine (wilaya de Tlemcen) sur l'efficacité du prétraitement des eaux de mer.

Ainsi, nous avons décomposé le présent travail en deux parties:

- Une partie bibliographique dans laquelle on a présenté au premier chapitre des généralités sur le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. Les procédés de prétraitement des eaux de mer (procédés physiques, procédés chimiques) sont exposés dans le deuxième chapitre ;
- Une partie expérimentale regroupant trois chapitres: le troisième chapitre donne une présentation et une description de la station de dessalement de Honaine, le quatrième chapitre présente, avec plus de détail, le matériel ainsi que les méthodes d'analyse des paramètres de l'eau étudiés. Le cinquième chapitre a été réservé aux résultats expérimentaux trouvés ainsi qu'à leurs interprétations.

Au terme de cette étude, une conclusion générale est donnée. ^[1]

PARTIE I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LE DESSALEMENT
DE L'EAU

Chapitre I: Généralités sur le dessalement de l'eau

I.1- Introduction:

L'eau de mer est composée d'une soixantaine d'éléments dont : chlore, sodium, magnésium, calcium, potassium, brome, strontium, bore et fluor ainsi que des sulfates. Plus de 99,99 % des espèces dissoutes dans l'eau de mer sont des sels.

La concentration totale en sels dissous est appelée la salinité. La salinité totale des mers ouvertes sur les masses océaniques (Atlantique, Manche, Mer du Nord, Pacifique) est de l'ordre de 35 g.L^{-1} . Elle peut néanmoins subir des variations plus ou moins importantes suivant la position géographique, la profondeur et la température. Pour les mers fermées ou peu ouvertes, les valeurs de salinité peuvent être très différentes: 7 g.L^{-1} en Mer Baltique, 13 g.L^{-1} dans la Mer Caspienne, 20 g.L^{-1} en Mer Noire, 36 à 39 g.L^{-1} en Mer Méditerranée, 40 g.L^{-1} dans la Mer Rouge, 40 à 70 g.L^{-1} dans le Golfe arabe et jusqu'à 270 g.L^{-1} dans la Mer Morte. La composition relative d'une eau de mer 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 plus de 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 qui sont des sources potentielles de colmatage lors d'un procédé de dessalement.

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 1 g.L^{-1} et la teneur en chlorure doit être inférieure ou égale à $0,25 \text{ g.L}^{-1}$. En prenant comme référence l'eau de mer standard, cela équivaut à une élimination de 97,1 % pour les sels totaux et de 98,7 % pour les chlorures.

La présence de sels dans l'eau modifie fortement certaines propriétés (densité, compressibilité, point de congélation, coefficient d'activité) tandis que d'autres sont moins influencées (viscosité, absorption de la lumière). D'autres propriétés dépendent essentiellement de la quantité de sel dans l'eau (conductivité, pression osmotique).^[2]

I.2- Procédés de dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtres:

Divers procédés existent pour dessaler l'eau de mer et les eaux saumâtres. On distingue:

- les procédés avec changement de phase (distillation, congélation, etc.....)
- les procédés avec utilisation de membranes (électrodialyse, osmose inverse, procédé osmo-ionique...)
- les procédés agissant sur les liaisons chimiques (échange d'ions, extraction par solvants sélectifs...)

La figure I.1 suivante présente les procédés de dessalement les plus utilisés:

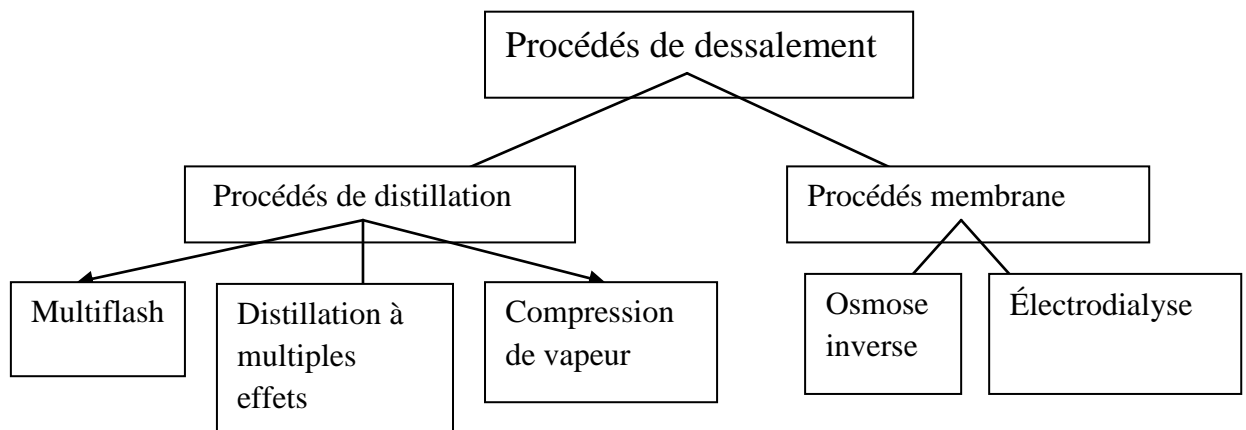


Figure I.1: Procédés de dessalement des eaux

Il existe donc des procédés conventionnels (distillation thermique, osmose inverse, électrodialyse,...) et d'autres procédés qui sont non conventionnels (distillation solaire, congélation, cristallisation, ...).^[2]

I.2-1- La distillation:

Les procédés de séparation par distillation consistent en un simple changement de phase d'une solution d'eau salée qui passe, de l'état liquide à l'état gazeux en agissant sur l'élévation de la température et/ou la diminution de la pression. L'eau chauffée s'évapore, les sels vont précipiter, puis par une condensation de cette vapeur d'eau et un recueillement avec des organes spéciaux on obtient de l'eau douce. La séparation par distillation repose donc sur la technique de vaporisation.

Trois procédés se partagent le marché du dessalement thermique: La distillation à détente étagée (MSF), la distillation à multiples effets (Multi-Effet Distillation MED) et la distillation par compression de vapeur.^[3]

A- La distillation à détente étagée:

Ce procédé dit multi 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. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus réduite. 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. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle. [3]

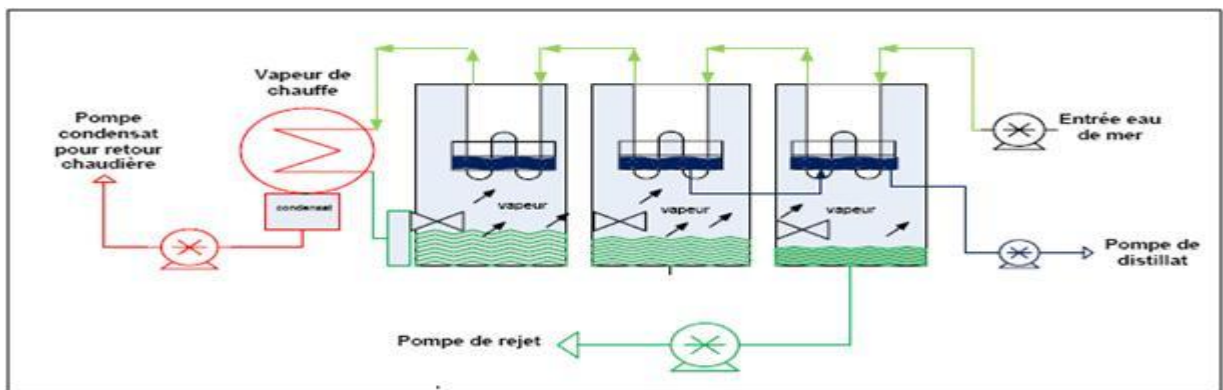


Figure I.2: Procédé de dessalement par distillation multi flash MSF

B- La distillation à multi effets:

La distillation à multiples effets consiste simplement à la juxtaposition de plusieurs cellules fonctionnant selon le principe de l'effet simple. Le fluide caloporteur porte à l'ébullition l'eau de mer admise dans la première cellule où règne la température la plus haute. La vapeur émise par l'ébullition de l'eau de mer est transférée dans la cellule voisine où une pression légèrement inférieure est maintenue. La température d'ébullition diminuant avec la pression, l'eau de mer présente dans la deuxième cellule est alors vaporisée grâce à la vapeur issue du premier effet. Il s'agit du deuxième effet. L'opération peut être répétée plusieurs fois. Ce procédé permet d'obtenir une production de 10 000 à 25 000 m³.j⁻¹ avec une salinité de 1 à 50 mg/L pour une consommation énergétique de 1 à 2 kWh.m⁻³ d'eau produite. [3]

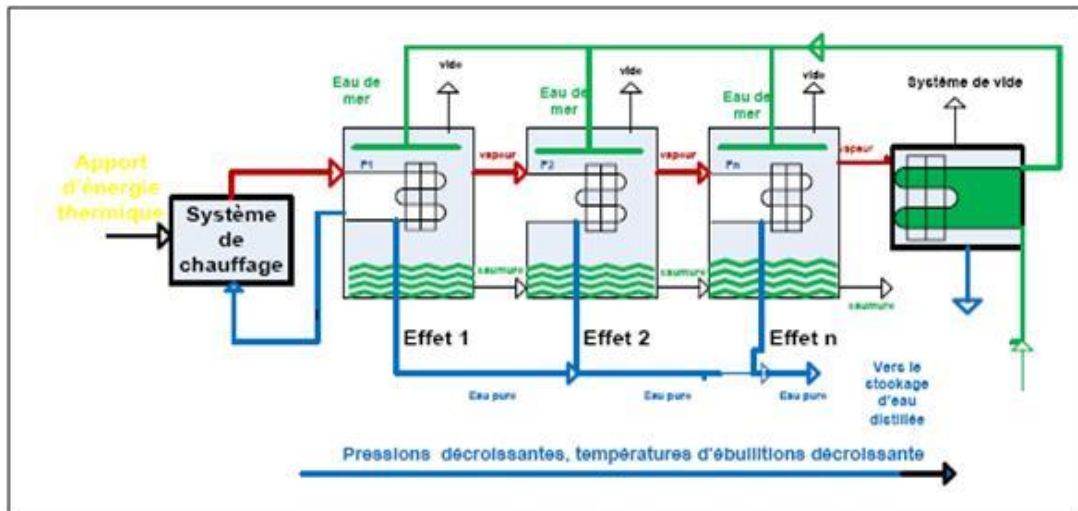


Figure I.3: Procédé de dessalement par distillation à multiples effets (MED)

C- La distillation par compression de vapeur:

Le dessalement par compression de vapeur consiste à mettre sous pression la vapeur d'eau de mer, pour la réchauffer, avant de la réintroduire dans la même enceinte pour la condenser en faisant évaporer une autre quantité d'eau de mer.

La compression peut être obtenue par de la vapeur issue d'un générateur de vapeur en utilisant un éjecteur (thermo-compression), ou bien en utilisant un compresseur et on fait alors du dessalement par compression mécanique de vapeur. La condensation de la vapeur provoque le réchauffement de l'eau salée qui se vaporise sous l'effet d'une diminution de pression. Ce procédé permet d'obtenir une production maximum $5000 \text{ m}^3 \cdot \text{j}^{-1}$ avec une salinité de 1 à $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ pour une consommation énergétique de 12 à $17 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ d'eau produite. ^[3]

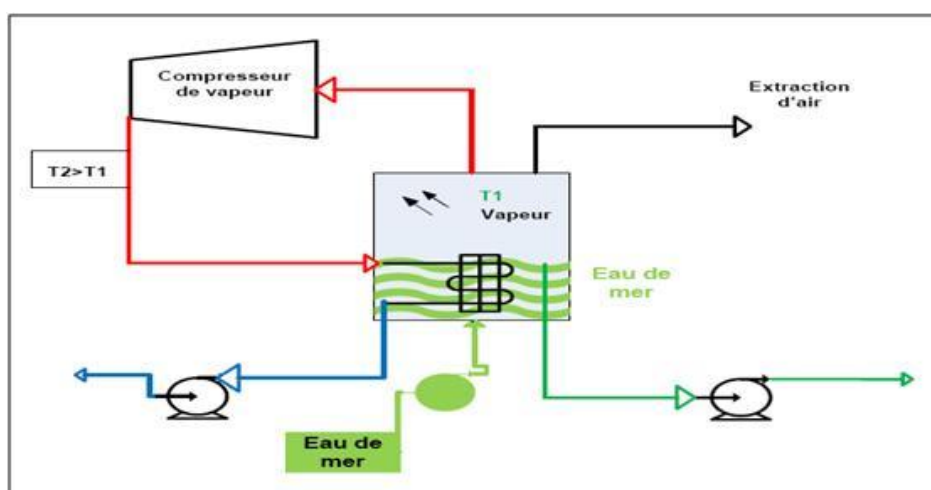


Figure I.4: Procédé de dessalement par compression de vapeur

I.2-2- La congélation:

Lorsqu'on refroidit une eau de mer jusqu'à environ $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, il y a formation de cristaux de glace constitués d'eau douce. L'eau de mer étant alors plus concentrée, elle résiste mieux à la congélation. Si on fait baisser davantage la température, la production de glace augmente, le sulfate de sodium a tendance à précipiter à $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pour produire de l'eau pure, il est donc préférable de ne pas refroidir l'eau au dessous de cette température. ^[22]

I.2-3- Les procédés membranaires :

I.2-3-1- L'électrodialyse :

Le principe de l'électrodialyse est bien connu. Les ions d'un sel dissous dans l'eau, comme le chlorure de sodium par exemple, déplace sous l'action d'un champ électrique créé par deux électrodes trempant dans le liquide. Les ions positifs ou cation (Na^+) sont attirés par l'électrode négative tandis que les ions négatifs (Cl^-) sont attirés par l'électrode positive [1]. Dans l'électrodialyse, on intercale alternativement les membranes semi-perméables; soit imperméables aux anions et perméable aux cations, soit imperméables aux cations et perméables aux anions. On obtient ainsi une série de compartiments à forte concentration de sels et d'autres à faible concentration comme l'indique la figure I.5 suivante.

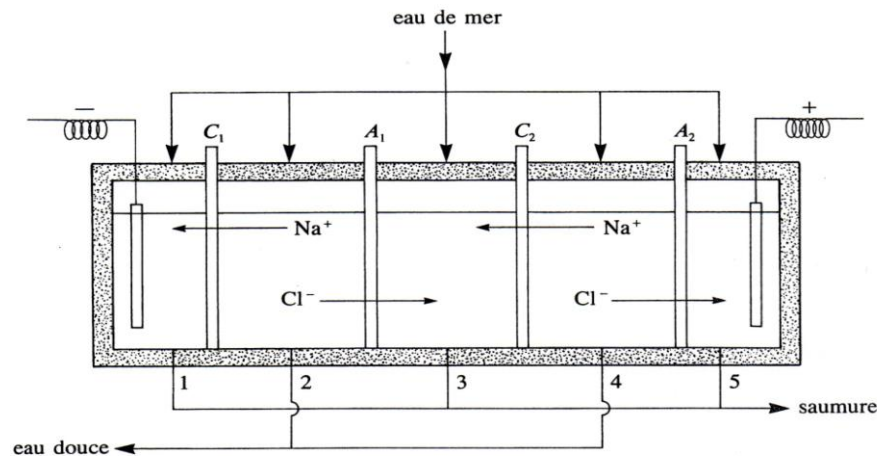


Figure I.5: Schéma d'une unité d'électrodialyse alimentée en parallèles

En raison de sa consommation électrique, l'électrodialyse n'est pas compétitive face à l'osmose inverse et donc il n'est utilisé que pour le traitement des eaux saumâtres de concentration inférieure à 3 g.l^{-1} . ^[2]

I. 2-3-2- L'osmose inverse:

L'osmose inverse (figure I.6) est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action de la pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer). Ce procédé fonctionne à température ambiante et n'implique pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées laissent passer les molécules d'eau et ne laissent pas passer les particules, les sels dissous, les molécules organiques de 10^{-7} mm de taille. ^[3]

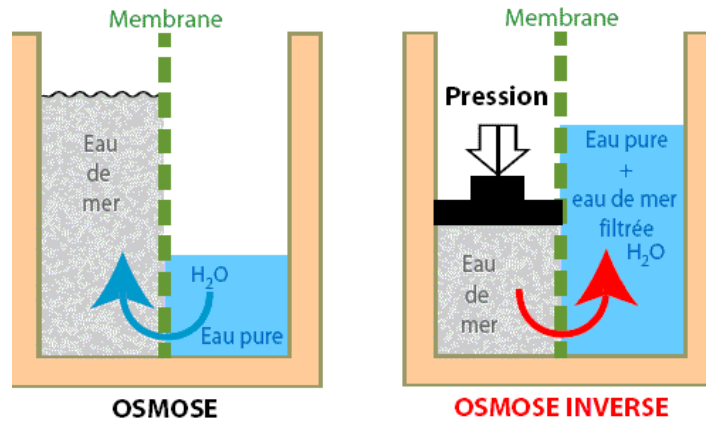


Figure I.6 : Principe de l'osmose et l'osmose inverse

L'osmose inverse (OI) a lieu lorsqu'une pression supérieure à la pression osmotique est appliquée sur la solution la plus concentrée (eau de mer dans ce cas). Sous l'action de cette pression, l'eau du compartiment contenant l'eau de mer traverse la membrane vers le compartiment contenant l'eau pure. Les membranes d'OI sont des membranes denses et peuvent rejeter jusqu'aux ions monovalents. L'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement celle électrique consommée principalement par les pompes haute pression. La teneur en sels de l'eau osmosée est de l'ordre de $0,5 \text{ g.L}^{-1}$. ^[3]

A)- Pression osmotique:

Si on applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Avec une pression suffisamment forte, le flux d'eau va même s'annuler: cette pression est nommée la pression osmotique P (en faisant l'hypothèse que la solution diluée est de l'eau pure). Si on dépasse la valeur de la pression osmotique, on observe un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique: c'est le phénomène d'osmose inverse. ^[4]

$$\Pi = I.C.R.T \quad (1)$$

Avec : Π : pression osmotique (bar)

I : nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte

C : concentration molaire de la solution (mol/l),

R : constante des gaz parfaits (0,082 l.bar/mol.K)

T : température de la solution (°K)

B- Schéma général d'une installation d'osmose inverse:

Une installation de dessalement d'eau par osmose inverse (fig I.7) comporte en général les postes suivants:

- une prise d'eau de mer ;
- un poste de prétraitement ;
- une pompe haute pression
- les modules d'osmose inverse où sont regroupées les membranes
- un post-traitement. ^[4]

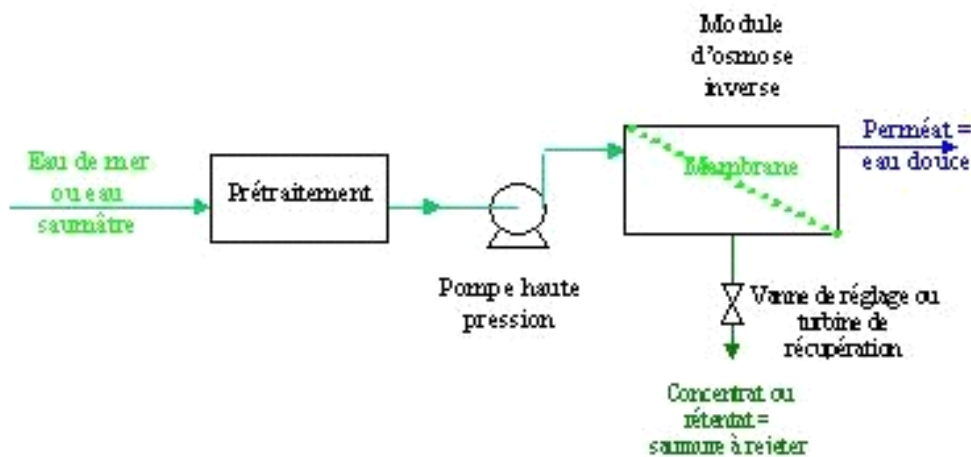


Figure I.7: Schéma d'une installation d'Osмосe Inverse

L'écoulement de l'eau à filtrer est continu et tangentiel. La solution à traiter se divise au niveau de la membrane en (02) parties de concentrations différentes:

- une partie qui passe à travers la membrane ou perméat (eau douce) ;
- une partie qui ne passe pas à travers la membrane appelée concentrat ou rétentat et qui contient les ions, molécules ou particules retenues par la membrane.

C- Caractéristiques principales d'une unité d'osmose inverse:

* **Taux de convention:** Le taux de conversion (y) est, par définition, la fraction du débit du liquide qui traverse la membrane. ^[5]

$$Y = \frac{Q_p}{Q_0} \quad (2)$$

Avec : Q_p : débit du perméat (m^3/h)

Q_0 : débit de la solution a traité (m³/h)

* **Sélectivité** : La sélectivité d'une membrane est en général définie par le taux de rétention ou le taux du rejet de l'espèce (sel, macromolécule, particule) que la membrane est censée retenir. [5]

$$TR = \frac{C_o - C_p}{C_o} = 1 - \frac{C_p}{C_o} \quad (3)$$

C_o : concentration de l'espèce à retenir dans la solution

C_p : concentration de la même espèce dans le perméat

* **Débits spécifiques**: Pour une sélectivité donnée, le débit par unité de surface doit être le plus élevé possible de manière à minimiser la surface de membrane à mettre en œuvre et par la même l'investissement. [5]

D- Phénomènes de polarisation:

Les membranes utilisées ayant la propriété d'effectuer des séparations à l'échelle moléculaire, entraînent une accumulation progressive des espèces arrêtées à la surface de la membrane. C'est le phénomène de polarisation de concentration. Les conséquences de ce phénomène sont les suivants :

- Diminution du flux de perméat,
- Diminution de la sélectivité
- Colmatage dû à des précipitations. [6]

E- Phénomènes de compactage:

Même en absence de dépôt, le débit d'une unité d'osmose inverse diminue progressivement au court du temps. Cette diminution de la perméabilité des membranes au court du temps est due à l'action de la pression sur le polymère membranaire. Ce phénomène qui s'apparente à un fluage est appelé compactage. [6]

F- Types de membranes d'osmose inverse: Dans la pratique, on trouve :

* **Les membranes en acétate de cellulose**: Ce type de polymère est le plus ancien .c'est en effet vers 1957 qu'une équipe de chercheurs de l'université de Californie à los Angeles, qui a étudié la semi-perméabilité de film organique vis-à-vis de solution aqueuses de chlorure de sodium, découvrit qu'un film d'acétate de cellulose non traité, permettait d'obtenir avec une solution aqueuses de chlorure de sodium à 3.72 % , sous une pression de 85.8 bar , un taux de rejet de 94.4 % et un débit d'eau à travers la membrane de 1.22 l/m²/jour. [6]

L'étape suivante, en 1960 fut la réalisation par LOEB et SOURIRAJAN d'une membrane d'acétate de cellulose par la méthode d'inversement de phase, permettant d'obtenir un débit d'eau potable de 5 l/h /m² à 20 l/h /m² sous une pression de fonctionnement de 103 à 137 bar, à partir d'eau de mer concentrée, contenant 5.25 % de sel dissous. [6]

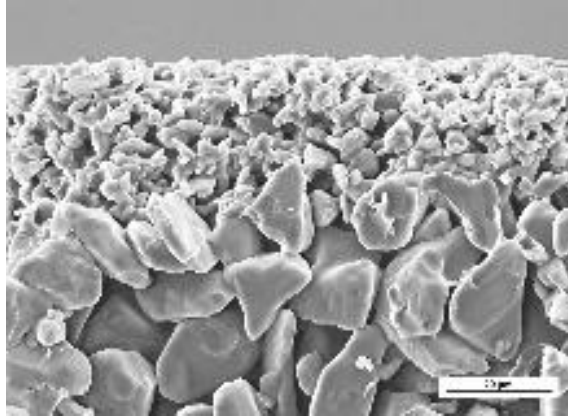


Figure I.8: Membrane en acétate de cellulose^[9]

* **Les membranes en polyamide:** Compte tenu des inconvénients de l'acétate de cellulose, des membranes de types polyamide/poly imide ont été développées .il existe plusieurs types de polymères caractérisées par une liaison amide dans la chaîne.

Les membranes en polyamide les plus répandues étaient commercialisées par DUPONT de NEMOURS sous forme de fibre creuse. Les fibres creuses sont fabriquées en continu selon la technique de séparation de phase. [6]

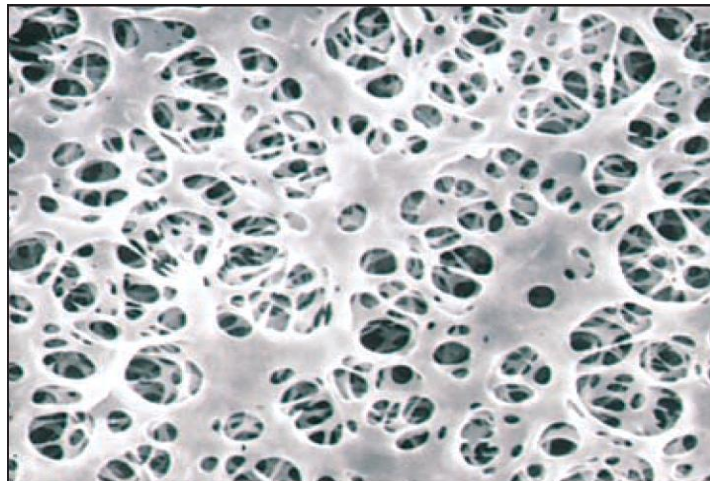


Figure I.9: Membrane en polyamide^[10]

* **Les membranes en poly sulfone:** Les premières membranes à base de poly sulfone sont apparues au milieu des années 1970. Elles sont caractérisées par un groupement $-SO_2^-$ relativement stable relié à deux noyaux benzéniques. [6]



Figure I.10: Membrane en poly sulfone ^[11]

* **Les membranes composites:** Les membranes composites sont apparues entre 1970 et 1980 et constituent un net progrès par rapport aux membranes asymétriques classiques. Ce sont en effet des membranes asymétriques dont l'épaisseur de la peau est nettement plus fine que celle des membranes classiques. Elles sont constituées de deux couches de polymères qui sont presque toujours de deux composés chimiques différents. Les membranes composites les plus répandues sont :

a- La membrane FILMTEC: Qui a été mise sur le marché en 1978. Elle est constituée par une couche de polyamide de 0.20 μm déposée sur un support de poly sulfone de 40 μm , l'ensemble étant soutenu par un tissu de 120 μm . ^[6]

b- La membrane TORAY: constituée de 4 couches superposées comprenant, dans l'ordre, une trame support, une couche microporeuse de poly sulfone, un enduit actif de polyester légèrement réticulé et une peau protectrice. Elle est caractérisée par un taux de rejet élevé, mais elle est toutefois très sensible à la présence d'oxygène dissous. ^[6]

G- Avantages et inconvénients des différents types de membranes :

Les avantages et les inconvénients des différents types de membranes utilisées dans le dessalement de l'eau sont indiquées sur le tableau I.1 suivant :

Tableau I.1: Avantages et inconvénients des différents types de membranes

Type des membranes	Avantages	inconvénients
Membrane en acétate de cellulose	-Perméabilité et sélectivité très élevées -Moins chère que les autres polymères	-Sensibilité à la température 30°C -Sensibilité au PH entre 5 et 6 -Sensibilité au chlore 50mg /l -Sensibilité aux micro-organismes -Sensibilité au compactage
Membrane en polyamide	-Bonne stabilité chimique -Bonne stabilité thermique -Bonne résistance mécanique	-Très grande sensibilité aux oxydants -Faible perméabilité -Problèmes d'adsorption
Membrane en poly sulfone	-Bonne stabilité thermique entre 75 et 125°C -Bonne tenue en pH entre 1 et 13 -Bonne résistance au chlore	-Sensibilité au compactage -Problèmes d'absorption en particulier de protéines
Membrane composite	-Très bonne caractéristique - perméabilité/sélectivité -Stable dans une gamme de PH élevé entre 2 et 11 -Bonne tenue en température entre 40 et 60 °C	-Mauvaise tenue au chlore

I.2-4- L'échange d'ions (procédés agissant sur les liaisons chimiques):

I.2-4-1- Définition:

L'échange d'ions est un procédé dans lequel les ions contenus dans une solution (par exemple des cations) sont éliminés de cette solution par fixation sur un des résines, pour être remplacés par une quantité équivalente d'autres ions de même charge émis par cette résine.^[7]

I.2-4-2- Les résines échangeuses d'ions:

Les résines échangeuses d'ions (ou échangeurs d'ions) sont des substances granulaires insolubles dans l'eau, comportant dans leur structure moléculaire des radicaux acides ou

basiques susceptibles de permuter, sans modification apparente de leur aspect physique, et sans altération ou solubilisation, certains de leurs ions (ions positifs ou négatifs), fixés sur ces radicaux, contre des ions de même signe se trouvant en solution dans le liquide à leur contact. Cette permutation appelée échange d'ions, permet de modifier la composition ionique du liquide objet du traitement, sans modification du nombre total de charges existantes dans ce liquide avant l'échange. ^[7]

Les résines échangeuses d'ions sont des minuscules billes de plastique, d'un diamètre d'environ 0,6 mm. Ces billes sont poreuses et contiennent de l'eau, invisible et inamovible. La structure de la résine est un polymère (comme tous les plastiques) sur lequel un ion a été fixé de façon permanente. Cet ion ne peut pas être enlevé ou remplacé : il fait partie de la structure. Pour préserver la neutralité électrique de la résine, chacun de ces ions fixes doit être neutralisé par un contre-ion de charge opposée. Ce contre-ion est mobile et peut sortir de la résine ou y entrer. La figure I.11 représente schématiquement des billes échangeuses de cations et d'anions. ^[7]

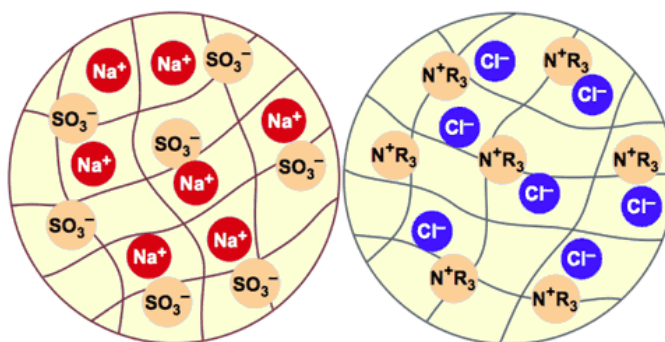


Figure I.11: Représentation schématique de billes de résines échangeuses de cations et d'anions

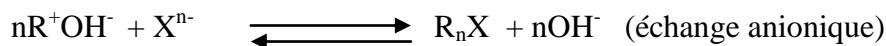
Les lignes grises représentent le squelette polymère de la résine : il est poreux et contient de l'eau. Les ions fixes de la bille échangeuse de cations sont des sulfonates (SO_3^-) attachés au squelette. Dans cette image, les ions mobiles sont des cations sodium (Na^+). Les résines échangeuses de cations, comme l'Amberjet 1000, sont souvent livrées sous forme sodium. ^[3]

La bille échangeuse d'anions a un squelette très semblable. Les groupes fonctionnels sont ici des ammoniums quaternaires, donc des cations, représentés par la formule N^+R_3 ; une formule plus précise serait $\text{CH}_2\text{-N}^+(\text{CH}_3)_3$. Les ions mobiles présents dans la bille d'échangeur d'anions sont ici des anions chlorure (Cl^-). La forme chlorure est également la forme de livraison de beaucoup d'échangeurs d'anions. Tout ion pénétrant dans la résine produit la sortie d'un ion de même charge pour préserver l'électroneutralité. C'est ce que l'on appelle l'échange d'ions. Seuls les ions de même signe sont échangés. On ne peut pas produire

une résine qui échangerait à la fois les cations et les anions, car les cations fixes à l'intérieur de la bille neutraliseraient les anions fixes, et aucun échange avec le monde extérieur ne serait possible. Il faut donc fabriquer séparément les résines échangeuses de cations et les résines échangeuses d'anions.^[3]

Réactions de l'échange ionique :

Les réactions d'échange peuvent être schématisées par les équations chimiques suivantes :



Avec : R : représente le radical de la résine (partie insoluble)

Les réactions sont limitées aux substances ioniques.

- Le cation remplace l'ion hydrogène (H^+) ;
- L'anion remplace l'ion hydroxyde (OH^-)

I.2-4-3- Application de l'échange d'ions :

A) Adoucissement de l'eau :

Parmi les substances dissoutes dans l'eau, on trouve très fréquemment la dureté. La dureté est une expression qui représente principalement les sels de calcium et de magnésium présents dans l'eau. Dans certaines conditions, ces ions peuvent précipiter et former des dépôts, le "tartre" dans les bouilloires et qui peut obstruer les conduites d'eau chaude et encrasser les chaudières.^[7]

L'adoucissement de l'eau est l'élimination de cette dureté. Les ions entartrants (Ca^{++} et Mg^{++}) sont échangés contre des ions qui ne forment pas de tartre, car ils sont beaucoup plus solubles tel que les ions sodium Na^+ . La réaction d'échange peut s'écrire :



La figure I.12 montre cette réaction.

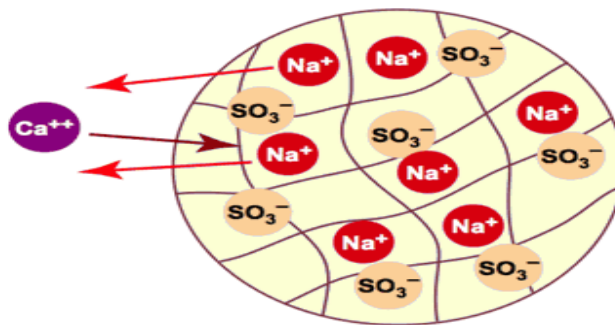


Figure I .12: Adoucissement (échange sodium) dans une bille de résine

L'échange d'ions est limité. Après un certain temps, la résine sera saturée et il faut remplacer la résine par une charge neuve, ou la régénérer.^[7]

B) Déminéralisation de l'eau:

Les échangeurs d'ions sont souvent utilisés pour la déminéralisation des eaux (élimination totale des ions). Le processus de déminéralisation consiste à remplacer tous les cations dissous dans l'eau par des ions H^+ et tous les anions par des ions OH^- . Pour y parvenir, l'eau traverse successivement une résine échangeuse de cations sous la forme H^+ (régénérée à l'acide) et une résine échangeuse d'anions sous la forme OH^- (régénérée à la soude). Au cours de cette opération, tous les cations et anions de l'eau seront échangés, et le résultat net est une disparition complète des contaminants ionisés. La réaction d'échange de cations sera :



Dans ces équations, R' représente la résine échangeuse de cations. L'échange est illustré dans la figure I.13. La résine est initialement sous forme hydrogène (H^+).^[7]

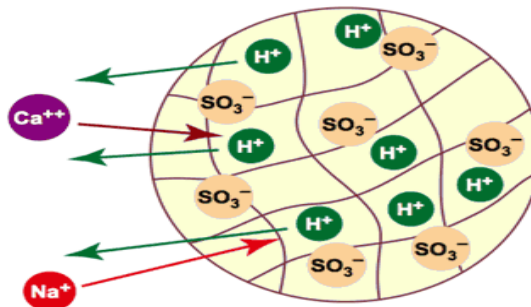


Figure I.13: Décationisation (tous les cations sont remplacés par H^+).

Un ion calcium Ca^{++} pénétrant dans la résine cause la sortie de deux ions H^+ , tandis qu'un ion Na^+ est échangé contre un ion H^+ .^[7]

De la même façon, une résine échangeuse d'anions sous forme OH^- peut éliminer tous les anions :



Où R'' représente la résine échangeuse d'anions. Tous les anions sont remplacés par des ions hydroxyde (OH^-).^[7]

À la fin du processus d'échange, les billes de résine vont fixer tous les cations et les anions présents dans l'eau et les remplacer par des ions H^+ et OH^- ions (fig. I.14). Les résines sont entièrement saturées. [7]

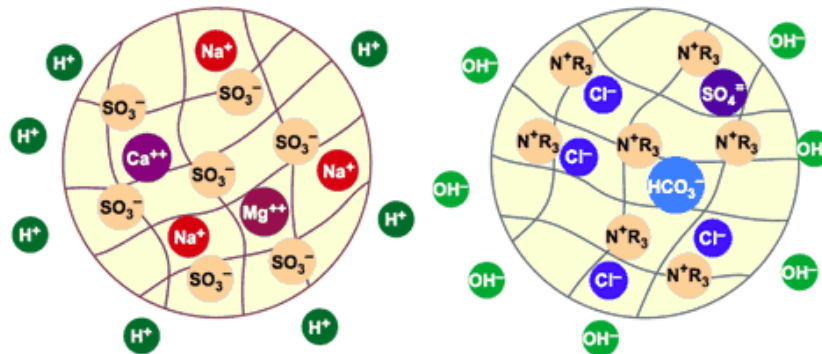


Figure I.14: Les billes de résine sont saturées.

Les contaminants ionisés sont fixés sur les deux résines (Na, Ca et Mg sur l'échangeur de cations, Cl, SO_4 et HCO_3 sur l'échangeur d'anions) et l'eau sera complètement déminéralisée. Sa salinité est complètement réduite. Quelques ions peuvent s'échapper des colonnes de résine, et que l'on appelle fuite ionique. Les ions H^+ et OH^- se recombinent instantanément pour créer de nouvelles molécules d'eau:



Une fois les résines saturées, on peut les remettre sous leur forme initiale et renouveler l'opération d'échange. L'échange d'ions est donc un procédé cyclique, et non continu. La régénération des résines se fait selon des réactions inverses de celles montrées précédemment. [7]

* Régénération d'un adoucisseur :

La résine d'adoucissement est régénérée avec des ions sodium (Na^+) fournis par une solution de chlorure de sodium ($NaCl$, ou sel commun). La réaction de régénération est :



La régénération ne peut se faire que quand la concentration du régénérant est élevée, typiquement 1000 fois plus haute que la concentration dans de l'eau normale. Par exemple, le sel est utilisé dans une saumure à une concentration de 10 % (environ 100 g/L) pour régénérer un adoucisseur. [7]

* Régénération d'un déminéralisateur :

Pour la déminéralisation, des acides forts comme l'acide chlorhydrique (HCl) ou l'acide sulfurique (H_2SO_4) sont entièrement dissociés en solution et peuvent fournir les ions H^+ nécessaires au remplacement des ions fixés pendant l'épuisement de la résine et qui sont maintenant dans celle-ci :



En pratique, on utilise toujours la soude caustique NaOH pouvant fournir les ions OH^- pour remplacer les anions fixés sur la résine :



Remarque: La régénération des résines produit des effluents salins. C'est le principal inconvénient de l'échange d'ions. ^[7]

I.3- Conclusion

L'échange d'ions est une technologie puissamment efficace pour l'élimination d'impuretés dans l'eau et dans des solutions diverses. De nombreuses industries ne peuvent se passer de l'échange d'ions pour produire de l'eau d'une extrême pureté :

- Centrales électriques nucléaires et thermiques
- Semi-conducteurs, puces informatiques et écrans plats et
- Élimination sélective de contaminants dans l'eau potable. ^[7]

CHAPITRE II
PROCEDES DE PRETRAITEMENT DES EAUX
DE MER

Chapitre II: Procédés de prétraitement des eaux de mer

II.1- Introduction :

Avant l'opération d'osmose inverse, l'eau de mer devra subir une série multitude de prétraitements visant à prolonger la durée de vie des membranes et à réduire le colmatage.

Dans la pratique, il existe deux types de prétraitements qui ont globalement la même efficacité mais diffèrent principalement par leur encombrement. On distingue:

- Le prétraitement conventionnel et
- Le prétraitement par membranes.

II.2- Le prétraitement conventionnel

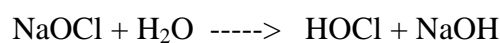
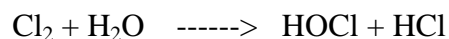
Majoritairement utilisé dans les usines de dessalement. Cette filière comporte les éléments suivants :

II.2-1- La préfiltration grossière

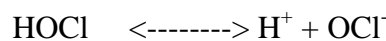
Elle sert à éliminer les gros matériaux qui peuvent endommager les installations et diminuer l'efficacité globale du procédé de traitement. Elle peut se faire en utilisant des appareils mécaniques tels que les tamis rotatifs. ^[24]

II.2-2- La chloration

La chloration a pour objectif l'inactivation des microorganismes (bactéries principalement) mais aussi micro-algues, champignons, qui, outre le fait que certains peuvent être pathogènes, sont à l'origine d'un colmatage important des membranes appelé biofouling. Le chlore est ajouté sous forme d'hypochlorite de sodium (NaOCl) ou de gaz dichlore (Cl₂) qui est hydrolysé sous forme d'acide hypochloreux (HOCl)



Dans l'eau, l'acide hypochloreux est dissocié en ions hydrogène (H⁺) et hypochlorite (OCl⁻)



La somme des composés Cl₂, NaOCl, HOCl et OCl⁻ constitue le chlore résiduel libre. Une concentration en chlore résiduel libre comprise entre 0.5 à 1 mg/L doit être maintenue constante le long de la filière de prétraitement pour empêcher le colmatage de la membrane.

Néanmoins, il faut signaler que l'expérience acquise sur plusieurs unités de dessalement par osmose inverse a montré qu'une chloration permanente à faible dose favorisait plutôt le biofouling. Ceci s'explique par le fait que certaines bactéries résistantes à l'action du chlore ont une activité biologique intense à l'intérieur du module d'osmose inverse par suite d'abondance de nourriture constituée par les composés organiques assimilables

résultant de l'oxydation de la matière organique par le chlore (acides humiques). Compte tenu de cette expérience, il faut prévoir seulement un traitement choc comme par exemple 5 à 20 mg/l de chlore pendant 1 heure toutes les semaines. ^[24]

II.2-3- L'ajustement du pH

De l'acide comme l'acide sulfurique (H_2SO_4) est ajouté à l'eau pour empêcher l'entartrage des canalisations par le carbonate de calcium ($CaCO_3$). ^[24]

II.2-4- La Coagulation - floculation -décantation

La turbidité et la couleur d'une eau sont principalement causées par des particules très petits, dites particules colloïdales. Ces particules, qui peuvent rester en suspensions dans l'eau durant de très longues périodes, peuvent même traverser un filtre très fin. Par ailleurs, puisque leur concentration est très, ces particules n'ont pas tendance à s'accrocher les unes aux autres. Pour éliminer ces particules, on a recours aux procédés de coagulation et de floculation. ^[22]

A) La coagulation :

La coagulation a pour but principal de déstabiliser les particules en suspension, chargées négativement le plus souvent, par des composés de deux métaux lourds Al^{3+} et Fe^{3+} . Ce procédé est caractérisé par l'injection et la dispersion rapides de produits chimiques appelés coagulants. Ces derniers sont ajoutés pour permettre l'agglomération des particules colloïdales. Les sels les plus utilisés sont :

- ✓ Chlorure ferrique $FeCl_3$;
- ✓ Sulfate ferrique $Fe(SO_4)_3$;
- ✓ Sulfate d'aluminium $Al_2(SO_4)_3$

En effet, la charge électrique (figure II.1) et la couche d'eau qui entourent les particules hydrophiles tendent à éloigner les particules les unes des autres et, par conséquent, à les stabiliser dans la solution. ^[15]

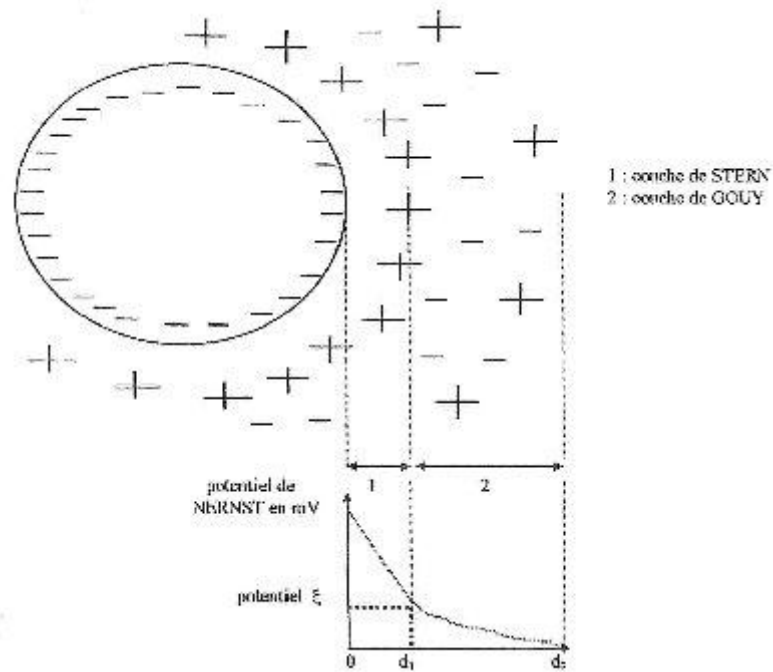


Figure II.1: Particule colloïdale et double couches

La déstabilisation des particules est obtenue par :

- compression de la double couche ;
- adsorption et neutralisation des charges ;
- emprisonnement des particules dans un précipité ;
- adsorption et pontage. ^[15]

B) La floculation :

Après avoir été déstabilisé, les particules colloïdales ont tendance à s'agglomérer lorsqu'elles entrent en contact les unes avec les autres. Le taux d'agglomération des particules dépend de la probabilité des contacts et de l'efficacité de ces derniers. La floculation a pour objectif de favoriser, à l'aide d'un mélange lent, les contacts entre les particules déstabilisées.

La floculation a justement pour but d'augmenter la probabilité des contacts entre les particules, lesquels sont provoqués par la différence de vitesse entre ces particules. Cette différence de vitesse peut être imputable :

- a)-au mouvement brownien des particules (floculation péricinétique) ;
- b)-au déplacement d'une partie du fluide (floculation orthocinétique).

Les particules agglutinées forment des flocs qu'on peut facilement éliminer par les procédés de décantation et de filtration.

La floculation est réalisée par ajout d'agents floculants comme des polymères cationiques ou anioniques tel que les polyélectrolytes. ^[16]

Enfin, il est important que les procédés de coagulation et de floculation soient utilisés correctement. En effet, la production d'un floc trop petit ou trop léger entraîne une décantation insuffisante. Lorsque les eaux arrivent sur les filtres, elles contiennent une grande quantité de particules de floc, qui encrassent rapidement ces filtres, ce qui nécessite des lavages fréquents. Par ailleurs, lorsque le floc est fragile, il se brise en petites particules qui peuvent traverser le filtre et altérer la quantité de l'eau produite. ^[16]

C) La décantation:

La décantation est un procédé qu'on utilise dans pratiquement toutes les usines d'épuration et de traitement des eaux. Elle a pour but d'éliminer les particules en suspension dont la densité est supérieure à celle de l'eau. Ces particules sont généralement des particules de floc ou des particules résultant d'une précipitation chimique (adoucissement ou élimination de fer et de manganèse). Des particules s'accumulent au fond du bassin de décantation qu'il faut les extraire périodiquement. L'eau clarifiée, située près de la surface, est dirigée vers l'étape de filtration.

Compte tenu de l'importance de la surface au sol nécessaire à cette opération, on utilise souvent des décanteurs lamellaires avec une charge hydraulique allant de 8 à 12 m/h par m² de surface plane et recyclage des boues pour améliorer la décantation. ^[22]

*** Types de décantation:**

Selon la concentration en solides et la nature des particules (densité et forme), on distingue quatre types de décantation :

- la décantation de particules discrètes ;
- la décantation de particules floculantes ;
- la décantation freinée et
- la décantation en compression de boue. ^[17]

*** *Décantation de particules discrètes:***

Ce type de décantation (dite discrètes ou individuelle) est caractérisé par le fait que les particules conservent leurs propriétés physiques initiales (forme, dimension et densité) au cours de leur chute. La vitesse de chute est indépendante de la concentration en solides ; c'est pourquoi les lois classiques de Newton et de Stokes s'appliquent ici. On retrouve ce type de décantation dans les dessableurs. ^[22]

*** *Décantation de particules floculantes:***

Ce type de décantation caractérisé par l'agglomération des particules au cours de leur chute. Les propriétés physiques des particules (forme, dimension, densité et vitesse de chute) sont donc modifiées pendant le processus. On retrouve ce type de décantation dans les

décanteurs des usines de traitement des eaux et dans les décanteurs secondaires des usines d'épuration. [22]

** Décantation freinée:*

Ce type de décantation est caractérisé par une concentration élevée de particules, ce qui entraîne la formation d'une couche de particules et, par conséquent, l'apparition d'une démarcation nette entre les solides décantés et le liquide surnageant. On retrouve ce type de décantation dans la partie profonde des décanteurs. [22]

** Décantation en compression de boue:*

Dans ce type de décantation, les particules entrent en contact les unes avec les autres et se reposent sur les couches inférieures. Dans cette zone, les phénomènes de consolidation sont relativement lents. On retrouve ce type de décantation dans les épaisseurs de boues par gravité. [22]

II.2-5- La filtration sur sable mono ou multicouche

La filtration est un procédé physique destiné à clarifier l'eau qui contient des matières solides en suspension en la faisant passer à travers un milieu poreux. Les solides en suspension ainsi retenus par les milieux poreux s'y accumulent; il faut donc nettoyer ce milieu de façon intermittente.

La filtration, habituellement précédée par des traitements de coagulation- floculation et de décantation, permet d'obtenir une bonne élimination des bactéries, de la couleur, de la turbidité et, indirectement, de certains goûts et odeurs. [17]

** Matériaux des filtres :*

Selon le type de filtre adopté, on recourt à divers matériaux filtrants ; on utilise ainsi :

- a) Des tissus de fibres, des toiles métalliques ou des pierres poreuses à interstices très fins. Ces matériaux retiennent les solides en surface; on les utilise rarement pour traiter des quantités d'eau importantes. [17]
- b) Des granules libres qui n'adhèrent pas les unes aux autres. Ces matériaux sont insolubles et inattaquables par le liquide filtré ou par les solides qui s'y déposent. La filtration a lieu soit en surface, soit en profondeur, selon les caractéristiques granulométriques du matériau filtrant et selon la grosseur et la cohésion des solides en suspension. Le sable, l'antracite et l'ilménite sont couramment utilisées dans les usines de traitement des eaux. [17]

En dessalement de l'eau de mer, la filtration sur sable bicouche est suffisante pour atteindre une eau de qualité à l'alimentation des osmoseurs. [17]

***Caractéristiques d'un matériau filtrant:**

Les principales caractéristiques d'un matériau filtrant sont: le diamètre effectif, le coefficient d'uniformité, la densité relative, la masse unitaire sèche et la porosité. Il existe d'autres caractéristiques beaucoup plus difficiles à mesurer comme la forme de grains et la surface spécifique. ^[22]

***Types de filtres :**

Pour le traitement des eaux potables, on utilise principalement :

- a) Des filtres à sables rapides ;
- b) Des filtres à sables lents ;
- c) Des filtres sous pression ;
- d) Des filtres à terre rapides ;

En pratique les filtres à sable rapides sont les plus utilisés pour le traitement des eaux. Les filtres à sable lents, de construction et de fonctionnement simples, nécessitent des grandes superficies; c'est pourquoi on les utilise surtout dans les pays en voie de développement où le climat est moins rigoureux, et lorsqu'on n'est pas limité par l'espace. ^[22]

En raison de l'emprise du sol moins importante, les filtres sous pression et les filtres à terre diatomée sont surtout utilisés pour traiter les eaux de piscine et dessaler les eaux de mer des installations de petites capacités. ^[22]

*** Les filtres sous pression :**

Les filtres sous pression fonctionnent selon les mêmes principes que les filtres à sable rapides, sauf que leurs couches de sable et de gravier, ainsi que leur réseau de drainage, sont des cylindres horizontaux ou verticaux, les quelles sont conçus pour supporter des pressions de l'ordre de 1000 kpa. On peut ainsi filtrer de l'eau sous pression et la distribuer sans recourir au double pompage. Cependant, il faut citer certains inconvénients de cette technique:

- On ne peut pas observer l'eau et la couche de sable lors de la filtration, ni l'efficacité des lavages et le degré d'agitation du milieu filtrant.
- La forme des filtres sous pression ne facilite pas l'installation de canalisation d'eau de lavage bien conçues, qui pourraient garantir que les matières éliminées du sable soient bien rejetées (et non refoulées dans d'autres parties du milieu filtrant).
- Il est difficile d'examiner de nettoyer et de remplacer le sable, le gravier et les drains inférieurs des filtres sous pression. ^[22]

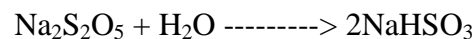
- Le fonctionnement des filtres sous pression favorise l'aspiration ou l'injection d'eau dans le milieu filtrant à vitesse excessive.

Néanmoins, les avantages des filtres sous pression sont cependant suffisants pour qu'on continue de les utiliser dans les petits postes de prétraitement car leur installation est aisée du fait qu'on peut les monter entièrement en usine.^[22]

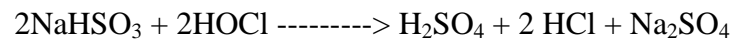
II.2-6- La déchloration et antitartre

La déchloration peut être effectuée avant l'étape d'osmose inverse car le chlore résiduel peut détériorer les membranes d'osmose inverse. Les fournisseurs de membranes observent une dégradation de la membrane après des temps de contact compris entre 200 à 1000 heures avec une concentration en chlore résiduel libre de 1mg/L pour des membranes composites. La dégradation sera plus rapide dans le cas de solutions alcalines et de températures élevées.

On utilise en principe le métabisulfite de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) pour éliminer le chlore pour son efficacité et son faible coût. Il réagit avec l'eau pour donner du bisulfite de sodium :



Le bisulfite de sodium réduit l'acide hypochloreux comme suit :



En théorie, il est nécessaire d'en utiliser 1,34 mg pour 1 mg de chlore résiduel. Cependant, en pratique il faut en ajouter 3 mg.^[22]

II.2-7- La filtration à cartouche

C'est l'ultime étape du prétraitement conventionnel. Il va rester des particules d'un diamètre supérieur à 5 μm qui présentent le risque d'endommager le module d'osmose inverse. On doit donc réaliser une filtration plus fine. La taille de maille choisie sera de 5 à 10 microns. La figure II.2 illustre l'ensemble des étapes du prétraitement conventionnel utilisé dans les installations de dessalement de l'eau de mer.^[22]

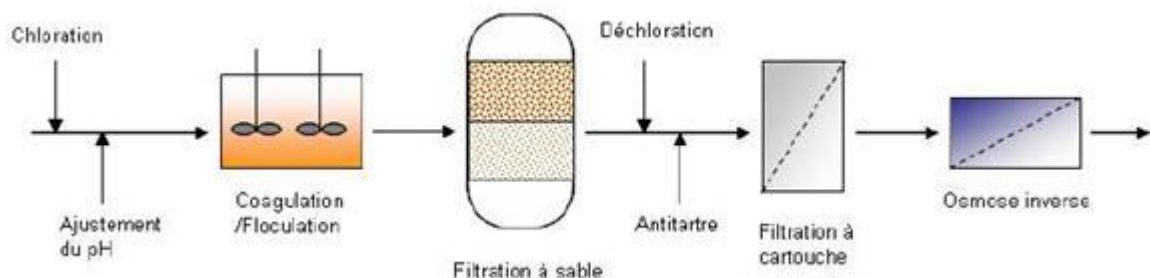


Figure II.2: Prétraitements conventionnels à l'osmose inverse

II.3- Le prétraitement par membranes :

A cause des limitations du prétraitement conventionnel, un intérêt croissant a été porté ces dernières années sur l'utilisation des procédés membranaires basse pression tels que la microfiltration (MF) et l'ultrafiltration (UF).^[23]

II.3-1- La microfiltration

La microfiltration est un domaine particulier de la filtration qui exploite un principe de séparation physique. Ainsi la quantité de solides dissous éliminée est induite par la taille des pores des membranes filtrantes.

Les substances plus grosses que les pores sont entièrement arrêtées, stoppées alors que les substances plus petites que le diamètre de la membrane sont partiellement éliminées en fonction de la constitution de la couche de détritrus sur la membrane qui crée un filtre supplémentaire après un certain laps de temps d'utilisation.

Ces membranes n'altèrent plus à la composition de la solution. Seuls les matières en suspension, colloïdes ou bactéries sont rejetés (ou filtrés).^[23]

II.3-2- L'ultrafiltration

L'ultrafiltration utilise des membranes de porosité plus fine que celles de la microfiltration. Elles permettent de séparer jusqu'à des grosses molécules comme les protéines et également les bactéries et les virus. Elles sont caractérisées par leur point de coupure qui est la taille de la macro molécule de protéine de la plus petite que la membrane peut séparer.^[24]

Les membranes d'ultrafiltration ont des points de coupure de $20 \cdot 10^3$ à 10^5 daltons (figure II.3). Il faut remarquer que cette caractérisation est imprécise du fait de la variation de configuration moléculaire de protéines de même poids moléculaires ainsi que de la nature de solvant de sa salinité et de son pH.^[24]

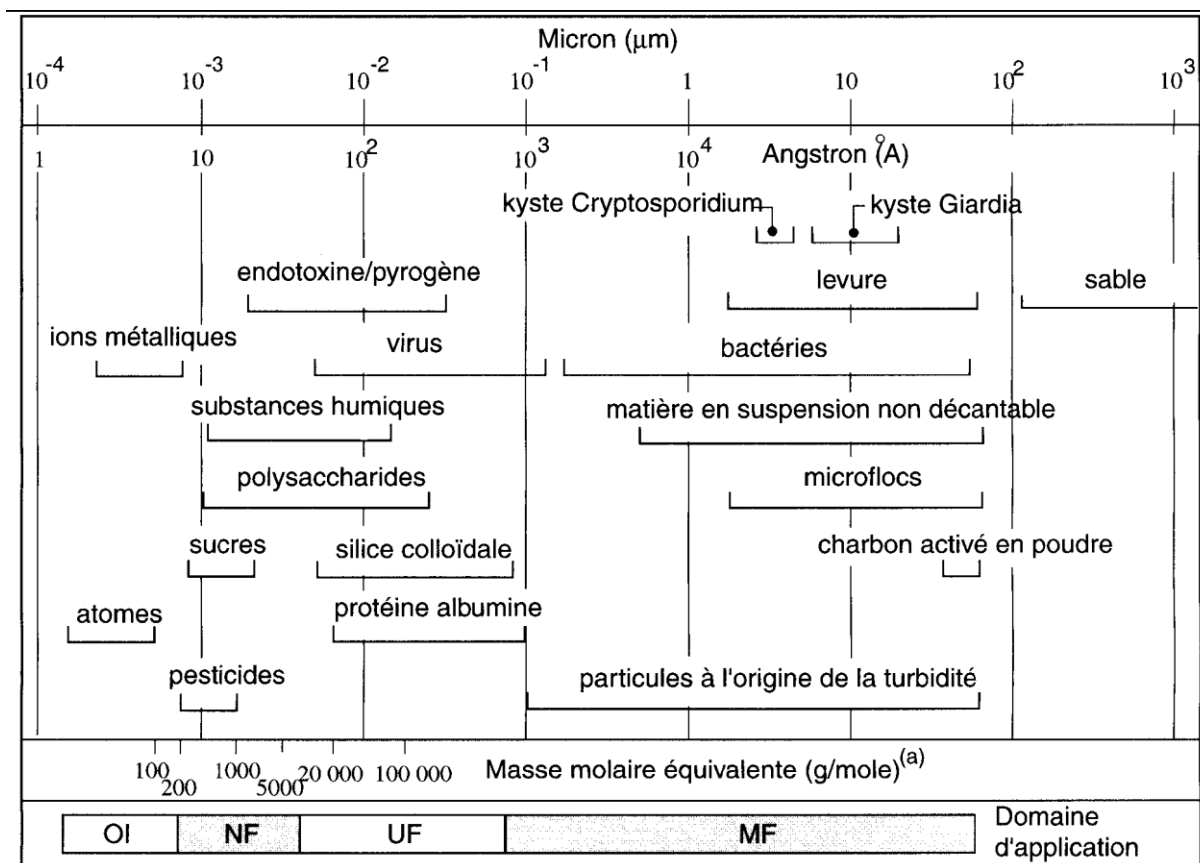


Figure II.3: Domaine d'application des membranes de filtration

L'ultrafiltration permet d'atteindre 3 objectifs :

- 1- Concentration de solution macromoléculaire (enzymes, protéines, virus, polymères variés, poly saccharides) ;
- 2- Rétention de macro solutés plus ou moins nocifs, présents notamment dans les effluents industriels, ou simplement dans l'eau destinée à un usage médicale.
- 3- Fractionnement par élimination des petits solutés ; récupération des protéines à partir du lactosérum, de l'alcool polyvinylique dans les eaux mères de l'industrie textile, de pigments présent dans les bains d'électrophorèse, de substances huileuses en émulsion dans l'eau. ^[24]

a) Domaines d'utilisation de l'ultrafiltration :

- Clarification de l'eau: L'ultrafiltration assure l'élimination des matières en suspension ; particules minérales, particules vivantes, turbidité, SDI jusqu'aux colloïdes.
- Désinfection de l'eau: La Microfiltration élimine tous les micro-organismes (bactéries, algues ...) et les gros pathogènes comme Cryptospridium et Giardia. L'ultrafiltration élimine en plus les virus. La clarification et la désinfection sont assurées en une seule étape. ^[24]

b) Applications de l'ultrafiltration :

- Production d'eau potable ;
- Production et recyclage d'eaux de procédés ;
- Traitement des eaux usées en bioréacteur à membranes ou en traitement tertiaire (recyclage ou réutilisation) ;
- Pré traitement avant déminéralisation ou dessalement ;
- Traitement des eaux de piscines ;
- Sécurisation d'eau de réseau. ^[24]

c) Principaux avantages de l'ultrafiltration:

* **Compacité** : l'encombrement des blocs de membranes est nettement inférieur à celui d'une chaîne classique avec coagulation-décantation – filtration – de plus la modularité du système permet d'ajouter éventuellement des modules de membranes ou de les remplacer facilement. Les membranes sont intégrables dans une chaîne de traitement existant.

* **Fiabilité** : les deux extrémités des modules sont scellées par une résine (empotage) afin de maximiser l'étanchéité entre l'eau brute et l'eau traitée. ^[24]

* **Performance de traitements** : supérieurs aux exigences réglementaires actuelles. Une turbidité d'eau ultrafiltration de 0,1 NTU.

* **Respect de l'environnement**: l'utilisation des produits chimiques est réduite notamment pour le chlore ; la protection des sous –produits résultants de l'action du chlore sur les matières organiques est réduite.

d) Polarisation et colmatage des membranes d'ultrafiltration :

Les débits unitaires annoncés pour les membranes d'U.F se situent entre 0,1 et 1 m³/h.m².bar pour de l'eau propre mais diminuent considérablement en présence de colloïdes pour deux raisons essentielles: la polarisation de concentration et le colmatage. ^[24]

a- Polarisation de concentration :

La surconcentration des solutés près de la membrane provoque en effet une augmentation sensible de la pression osmotique. Les valeurs du flux sont souvent de l'ordre de quelques dizaines de litres par min, soit 10 à 100 fois inférieures au flux avec eau propre. Le seul moyen dont on dispose pour augmenter le flux est de travailler à plus forte vitesse tangentielle ce qui entraîne des consommations énergétiques importantes. ^[24]

b- Colmatage:

Le colmatage se traduit, à concentration constante, par une baisse du flux au cours du temps, pouvant aller jusqu'à un blocage complet de la membrane. Ce colmatage est dû à la formation d'un dépôt de colloïdes à la surface de la membrane mais aussi à l'adsorption de

solutés variés et des colloïdes les plus fins dans les pores. Le premier phénomène est facilement réversible par rétro-lavage (décollement du gâteau et transfert) mais le second est très souvent insensible au rétro-lavage, à une augmentation de vitesse de balayage, etc.; seul un traitement chimique approprié permet de "nettoyer" la membrane. ^[24]

II.4-Conclusion :

Les procédés membranaires tels que la microfiltration (MF), et l'ultrafiltration (UF) sont de plus en plus utilisés pour le prétraitement d'eau de mer avant osmose inverse. La membrane agit comme une barrière physique retenant toutes particules colloïdales ou matières organiques. Elle permet ainsi de réduire le colmatage des membranes d'osmose inverse et de produire une eau de qualité quelles que soient les variations de l'eau brute.

CHAPITRE III
PRESENTATION ET DESCRIPTION DE LA STATION
DE DESSALEMENT DE HONAINE

Chapitre III: Présentation et description de la station de dessalement de Honaine

III.1- Présentation de la station de la ville de Honaine :

Située à mi-distance entre Ghazaouet et Béni-Saf, la commune de Honaine se trouve à 69 kilomètres au nord de Tlemcen chef-lieu de wilaya. Entamés en 2006 par le groupement espagnol Geida (composé des sociétés Cobra, sadyt, Befesa and Codesa), les travaux de réalisation de la station de dessalement de l'eau de mer, dans le commune de Honaine (plage de Tafout) ont été achevée 2011. Cette usine assure l'eau potable pour 23 communes ainsi que les agglomérations urbaines du grand Tlemcen (Tlemcen, Mansourah et Chetouane), soit une population d'environ 555.000 habitants. La capacité de l'usine de dessalement est de 200.000 m³ jour d'eau potable qui est produite par la filtration à sable/osmose inverse. Cette importante station (figure III.1) est gérée par des actionnaires qui sont Algerian Energy company (AEC) à hauteur de 49 % et Geida (Espagne) à hauteur de 51 %. Les eaux produites sont ensuite transférées à l'algérienne des eaux (ADE).^[1]



Figure III.1: Photo de la station de dessalement de Honaine

La station de dessalement de Honaine comporte deux principaux systèmes dont l'un est réservé à la mobilisation et au pompage de l'eau de mer et l'autre pour le rejet de la

Chapitre III Présentation et description de la station de dessalement de Honaine

saumure. Le système de mobilisation de l'eau de mer, renforcé par une conduite sous-marine allant jusqu'à 1.500 m dans la mer et une station de pompage à proximité de la ligne de rivage, permet de pomper l'eau de la mer vers le site de la station de dessalement, qui se trouve environ 500 m de la cote. Le système de rejet de la saumure vers la mer est consolidé par un émissaire marin pénétrant jusqu'à 1000 m dans la mer, dans le but d'assurer une meilleure dilution et atténuer en conséquence les impacts environnementaux. ^[1]

Le principe de l'opération de dessalement consiste à favoriser le passage d'une salinité de 40 g/l, celle de l'eau de la mer, à moins de 0,5 g/l, soit de l'eau complètement dessalée. Cette eau sera partiellement (reminéralisée) avec l'ajout d'une faible proportion d'eau saumâtre (riche en oligo-éléments), pour produire finalement une eau potable dont la salinité est située à environs 1,5 g/l conformément aux normes de l'organisation mondiale de la Santé (OMS) [11]. Les principales caractéristiques de fonctionnement de la station sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.1: Principales caractéristiques de fonctionnement de la station de dessalement de Honaine

Désignation	Unités	Valeurs
Production Continue Prévue	m ³ /j	203 .000
Nombre total d'unité installée	U	10
Température de travail minimum prévue	°C	18
Température de travail maximum prévue	°C	24
Type de membrane		A enroulement en spirale
Matériau de la couche active		Polyamide aromatique
Rejet minimum en sel	%	99.45
Nombre de membrane par cuve sous pression	U	07
Nombre d'étages	U	01
Débit spécifique maximum	l/m ² /h	13.96
Pression d'entrée dans les membranes	Bars	62
Pression de sortie des membranes	Bars	64.5
Pas N°1		
Nombre de membrane dans le premier étage /unité	U	1820
Nombre de Cuve sous pression dans le premier étage /unité	U	260
Modèle de membrane		SWC5
Châssis		
Nombre de tubes de pression /Colonne	U	12
Nombre de colonne	U	24
Nombre de vides pour tube de pression en réserve	U	28
Tuyaux de distribution dans le châssis		
Nombre de collecteurs verticaux de distribution	U	2

La Station est constituée de 10 lignes (ou Racks) ayant chacune une production nominale de 20.300 m³/j. Le facteur de conversion de la station est de 47 %. ^[1]

III.2-Description des étapes de traitement :

Le processus de traitement au niveau de la station de dessalement d'eau de mer de Honaine (figure III.2) se décompose de quatre phases principales :

- 1- Phase de captation (prise d'eau de mer) et de pompage
- 2- Phase de filtration (prétraitement)
- 3- Phase d'osmose inverse (chassis RO)
- 4- Phase de reminéralisations (post traitement)

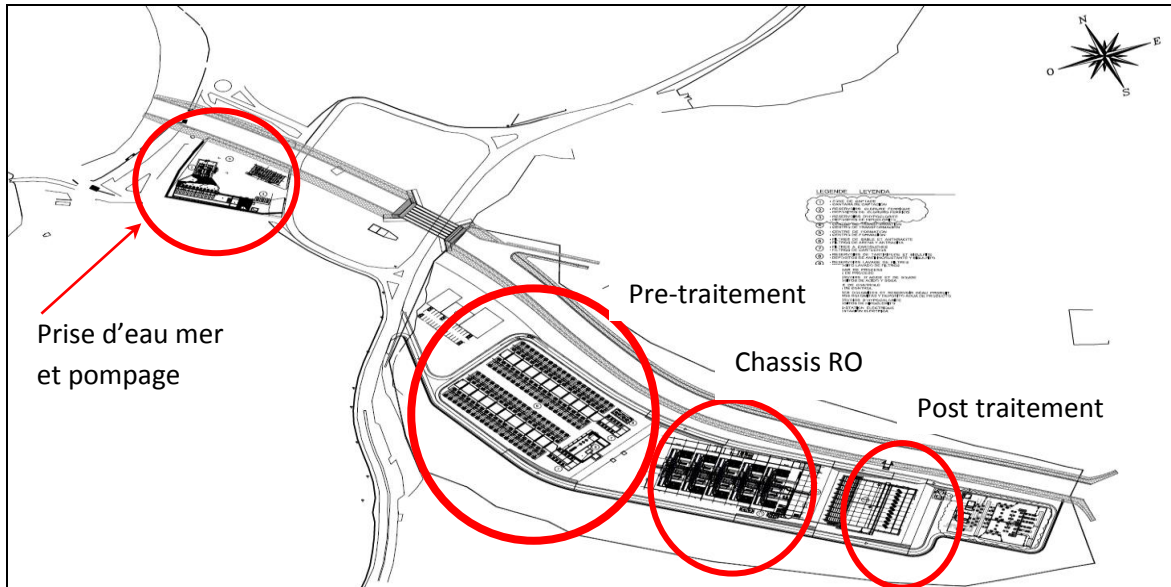


Figure III.2 : Schéma des étapes de traitement à la station de dessalement de Honaine^[1]

III.2.1-Phase de Captation d'eau de mer et de pompage:

Cette phase a pour objectif de capter l'eau et d'éliminer les particules grossières et de préparer l'eau pour la phase de filtration. Le captage d'eau de mer s'effectue par une prise d'eau ouverte au moyen d'une tour de captage située à une distance de 1200 m à partir de la plage. Faite en béton armé de 9 mètres de hauteur par rapport au fond marin, cette tour est dotée de six fenêtres pour l'entrée de l'eau de mer. Ces fenêtres sont situées à 7 m au dessus du fond. La tour de captage est dotée d'un système de pré filtration comprenant des grilles grossières et des tamis auto nettoyants.

La colonne de captage a été conçue afin de capter l'eau brute nécessaire pour une production de 200.000 m³/jour. L'eau de mer est envoyé à travers l'émissaire de captage au réservoir d'eau de mer où elle est préfiltré des éléments grossiers à travers à travers des grilles grossières et des tamis autonettoyants. Le débit total du groupe de pompage de la tour de captage est de 18.934 m³/h. Il est légèrement supérieur au débit de l'usine car il doit assurer également l'eau nécessaire au lavage des tamis. ^[25]



Figure III.3: Photo du poste de pompage d'eau de mer

Le groupe de pompage d'eau de mer est composé de 11 pompes (10+1), chacune d'une capacité de pompage de $1.893 \text{ m}^3/\text{h}$. Les onze pompes d'eau de mer sont installées en parallèle, l'une d'elles étant de réserve. Cette pompe de réserve peut être utilisée de façon intermittente lors de l'étape de lavage de la première et seconde étape de filtration, si c'est nécessaire. Les pompes refoulent l'eau de mer depuis le réservoir jusqu'aux pompes à haute pression. Les pompes d'eau de mer (figure III.4) sont de type à aspiration à vide, il est donc installé un groupe de vide pour l'amorçage de ces pompes. ^[1]



Figure III.4 : Photo du bloc de pompes de captation

Lors de l'aspiration des pompes d'eau de mer, il est possible d'effectuer un dosage d'hypochlorite de sodium pour la désinfection en continu ou pour une désinfection de choc. Il faut effectuer un dosage de chlorure ferrique comme coagulant au début du collecteur de refoulement vers les filtres à pression, si c'est nécessaire pour atteindre $\text{SDI} < 4$ à l'entrée des membranes. ^[1]

Chapitre III Présentation et description de la station de dessalement de Honaine

III.2.2- Phase de prétraitement de l'eau:

L'eau qui va se dessaler contient une série de composants organiques qui doivent être contrôlés pour qu'elle puisse être appliquée directement à des éléments aussi sensibles que les membranes sans qu'elles en soient détériorées. Le prétraitement de l'eau de mer est une étape essentielle. Elle consiste le plus souvent à débarrasser de l'eau : des solides en suspension, des matières organiques, des bactéries, des algues, etc.... Elle est nécessaire pour éviter

- L'incrustation
- L'encrassement
- Et l'attaque bactérienne des membranes d'osmose

L'eau doit donc être conditionnée en la soumettant à une série de traitement qui répond globalement à deux types :

- Physique, destinés à éliminer fondamentalement les éléments solides, les algues et les matières organiques.
- Chimique, pour éviter des attaques à la membrane ou des précipités de sels sur cette dernière. ^[25]

A) Prétraitement chimique:

- Dosage d'Hypochlorite de sodium :

L'utilisation de différents dérivés chlorés, normalement l'hypochlorite sodique (NaOCl), comme produits désinfectants pour combattre le salissement biologique des membranes est une pratique habituelle dans les usines d'osmose inverse. La base du processus de désinfection est la formation d'acide hypochloreux (OHCL) qui possède une action biocide. Il ne contrôle pas seulement le processus de croissance des bactéries en pénétrant dans les cellules de paroi et en les tuant mais il évite aussi la production des enzymes qui nécessaires à la prolifération débits microorganisme. ^[1]

Il a été prévu d'effectuer une injection d'hypochlorite de sodium au niveau de l'aspiration des pompes d'eau de mer afin de pouvoir travailler avec un traitement de choc ou en continu. Cette injection s'effectue à l'aide de cinq pompes doseuses (4+1) de débit nominal d'environ 200 l/h chacune. L'une des pompes servant de réserve. Deux réservoirs d'hypochlorite de sodium de 140 m³ de capacité chacun sont ainsi installés. Pour le remplissage des réservoirs, une pompe de transfert de 33 m³/h de débit est installée. L'ajout du produit s'effectue au sein du refoulement de l'eau de mer. ^[1]



Figure III.5 : Photo d'une citerne de stockage d'hypochlorite de Sodium

- Dosage du chlorure ferrique :

Un dosage de chlorure ferrique est effectué pour l'élimination de la matière en suspension et des colloïdes présents au sein de l'eau de mer et ceci pour atteindre un SDI < à 4 à l'entrée des membranes. ^[1]

L'ajout du produit se fait en continu après le refoulement des pompes d'eau de mer. L'injection du produit s'effectue à l'aide de 5 pompes de dosage (4+1) pompes, l'une d'elles étant de réserve). Le débit nominal de chacune d'elle est de 100 l/h. Une pompe centrifuge de 33 m³/h de débit est installée pour le transvasement du chlorure ferrique depuis le moyen de transport jusqu'aux réservoirs de stockage. Ce dernier est assuré par deux réservoirs d'accumulation (figure III.6) de 70 m³ de capacité chacun qui sont ainsi disposés. ^[1]



Figure III.6 : photo de la citerne de stockage de chlorure ferrique

- Dosage du métabisulfite de sodium :

Un équipement de dosage de métabisulfite de sodium est installé au niveau de la station dans le but de réduire le chlore résiduel au sein de l'eau de mer avant les membranes. Le métabisulfite de sodium est une substance qui réagit au chlore et au reste des oxydants contenus dans l'eau de mer tels que l'oxygène dissout, en évitant qu'ils ne parviennent aux

Chapitre III Présentation et description de la station de dessalement de Honaine

membranes et qu'ils ne les détériorent. Ce dosage est utilisé en cas de dosage de l'hypochlorite en continu. ^[1]

Cinq pompes de dosage sont ainsi prévues dont l'une d'elles étant de réserve. L'ajout du produit s'effectue avant la première étape de filtration et avant les filtres à cartouche afin de permettre une durée maximale de contact possible. Pour le stockage de ce produit, deux citernes d'accumulation de 13 m³ de capacité chacune sont ainsi installées (figure III.7). ^[1]



Figure III.7: Photo des citernes de stockage du métabisulfite de sodium

L'injection du métabisulfite de sodium est réalisée pour réduire le chlore avant l'introduction de l'eau dans les membranes d'osmose. ^[1]

- Dosage du dispersant :

Afin d'éviter la précipitation des sels de sulfate de calcium, sulfate de strontium, fluorure de calcium et autres sels, un dosage de dispersant est réalisé. L'équipement est composé de deux réservoirs d'accumulation dissolution de 10 m³ de capacité chacun. Cinq pompes de dosage sont installées dont l'une d'elles étant de réserve. L'ajout du produit se fait en ligne et avant les filtres à cartouche. ^[1]

B)- Prétraitement physique :

Ce traitement est destiné à éliminer fondamentalement les éléments solides, les algues et la matière organique. Cette opération comporte :

- L'ébauchage :

L'ébauchage a deux objectifs :

- Protéger la station de l'arrivée possible et intempestive de grands objets capables de provoquer des obstructions dans les différentes unités de l'installation.

Chapitre III Présentation et description de la station de dessalement de Honaine

- Séparer et évacuer facilement les matières volumineuses entraînées par l'eau brute qui pourrait diminuer l'efficacité des traitements suivants ou compliquer leur réalisation. [25]

L'opération peut être plus ou moins efficace selon la séparation entre les barreaux des grilles. On peut distinguer :

- Ebauchage fin, avec une séparation de 3 à 10 mm,
- Ebauchage moyen, avec une séparation de 50 à 25 mm,
- Pré-ébauchage, avec une séparation de 50 à 100 mm. [25]

Les grilles mécaniques sont protégées par une pré-grille aux barreaux plus espacés (séparation de 50 à 100 mm), prévue, généralement, pour un nettoyage manuel mais qui devra être également automatique dans le cas des installations importantes ou si l'eau brute arrive chargée de grosses matières. [25]

***Grilles manuelles :**

Elles sont constituées de barreaux droits, en acier, parfois verticaux et parfois inclinés à un angle de 60° à 80° sur le horizontale. [25]

***Grilles mécaniques de nettoyage du côté de l'arrivée**

Des grilles de nettoyage alternative : la zone grillagée est faite avec des barreaux de section rectangulaire ou trapézoïdal (qui réduit le risque d'obstruction des matières solides), et généralement inclinée environ 80° sur l'horizontal se détenant un peu au dessus du niveau liquide maximal et se prolongeant par un panneau.

Des grilles de nettoyage continu : ce type de grille s'utilise dans un ébauchage fin et il doit être employé avec de l'eau peu chargée en grosses matières (ou bien qu'elle ait été soumise au préalable à un ébauchage moyen. [25]

***Des grilles mécaniques et nettoyage du côté de la sortie**

Ce type de grille s'utilise généralement avec des eaux résiduelles et elle est capable d'éliminer de grandes quantités de matières solides à l'aide de petits râpeaux peignes qui bougent grâce à un mécanisme de chaînes interminables montant de l'eau en bas du champ de grille. Le champ de grille, vertical ou incliné (60° à 80° sur l'horizontal). [25]

- La Filtration :

La filtration consiste à faire passer l'eau de mer à travers des filtres. L'eau salée entre par la partie supérieure du filtre et descend à travers le lit filtrant (Figure III.8). Le filtrage de l'eau se réalise au fur et à mesure que les particules solides sont absorbées tout au long du lit filtrant. Quand l'eau arrive à la partie inférieure, elle est recueillie dans un collecteur de sortie.

Chapitre III Présentation et description de la station de dessalement de Honaine

Les particules solides sont retenues dans le lit et la saleté retenue augmente la perte de charge du filtre. [25]

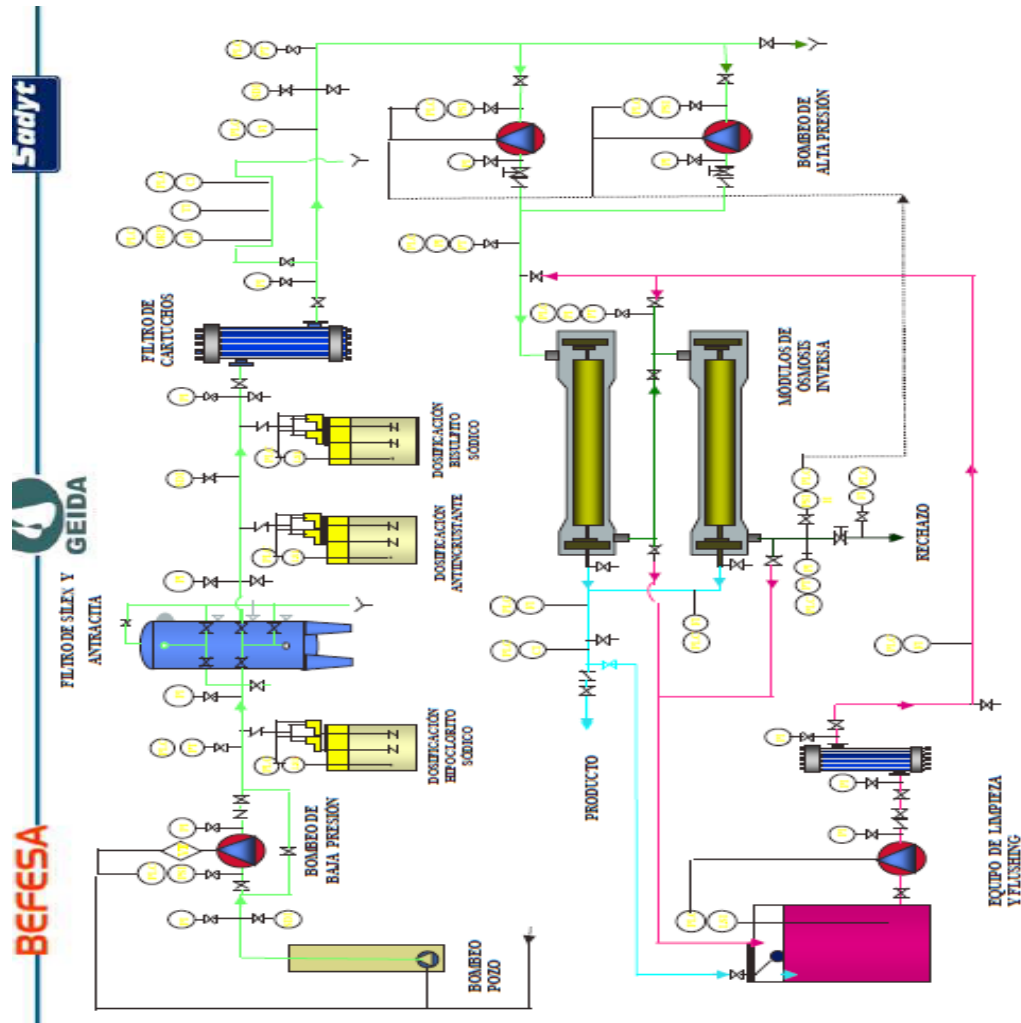


Figure III.8: Schéma de l'étape de filtration

La filtration de l'eau s'effectue sur différents types de filtres qui sont :

- Un système de filtre à sable, anthracite et gravier ;
- Un système de filtre à cartouches. [1]

a) Système de filtration à sable et anthracite : Ce système est constitué de 80 filtres répartis en 48 pour la première phase et 32 pour la seconde phase. Chaque filtre a une surface active de filtration de 40,31 m², une hauteur de 11 m et un diamètre de 3.7 m. Chaque filtre héberge en son intérieur une plaque support équipée des buses correspondantes, plaque sur laquelle est situé le lit filtrant.

La disposition des filtres est cylindrique horizontale avec des fonds de type Korboggen. Les filtres sont de 3,7 m. de diamètre et de 11 m de longueur cylindrique. La vitesse de filtration en fonctionnement normal lors de la première étape est de 8,8 m/h et lors de la seconde étape de 13,2 m/h. Les filtres sont équipés de regards de visite nécessaire en vue

Chapitre III Présentation et description de la station de dessalement de Honaine

de leur inspection et de leur maintenance. Ils comportent également des drainages, ainsi que l'instrumentation correspondante, et le jeu de vannes automatiques nécessaires pour effectuer les opérations de lavage et de mise en service d'une façon totalement automatique. [25]



Figure III.9: photo des filtres multicouches

Lors de la première phase de filtration, il est installé:

- Dans la couche supérieure: 600 mm de hauteur de lit d'anthracite d'une taille effective de 0,4-1,6 mm et avec 1,3 de coefficient d'uniformité ;
- Dans la couche intermédiaire: 400 mm de hauteur de lit de sable d'une taille effective de 0,4-0,8 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité ;
- Dans la couche suivante: 100 mm de hauteur de lit de gravier d'une taille effective de 1,4- 2,5 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité et
- Dans la couche inférieure: 100 mm de hauteur de lit de gravier d'une taille effective de 4,0-8,0 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité.

Lors de la seconde phase de filtration, il est installé:

- Dans la couche supérieure: 700 mm de hauteur de lit de sable d'une taille effective de 0,4 - 0,8 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité ;
- Dans la couche suivante: 200 mm de hauteur de lit de grenat d'une taille effective de 0,3 - 0,6 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité ;
- Dans la couche suivante: 100 mm de hauteur de lit de grenat d'une taille effective de 1,4 - 2,5 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité ;

Chapitre III Présentation et description de la station de dessalement de Honaine

- Dans la couche suivante: 100 mm de hauteur de lit de gravier d'une taille effective de 4 – 8 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité et
- Dans la couche inférieure: 100 mm de hauteur de lit de gravier d'une taille effective de 8 -16 mm et avec 1,4 de coefficient d'uniformité. [25]

* **Lavage des filtres:** Quand la perte de charge dans le filtre augmente, on doit procéder à son lavage. Ce nettoyage se réalise par inversion du flux d'eau, en la faisant circuler de bas en haut (contre-lavage). Le lavage s'effectue avec 3 pompes et 2 soufflantes dont une en réserve avec de la saumure.

Avec le contre-lavage, l'eau entraîne la saleté accumulée dans le filtre. L'eau, chargée de crasse, sort à travers la vanne de drainage vers l'extérieur. Le processus de nettoyage peut s'automatiser par le biais des vannes de contre-lavage et celui programmé de lavage de filtres. On laisse le filtre complètement vide d'eau quand il ne va pas être utilisé pendant de longues périodes de temps. [1]

b)- Filtre à cartouche :

La filtration par cartouches est la technique de filtration la plus conseillée pour les applications dont les exigences en ce qui concerne la qualité et la sécurité sont les plus élevées. On les utilise dans les installations pour pouvoir garantir un niveau de filtration de microns minimal exigé par le fabricant de membranes. Les cartouches sont formées d'une âme et d'un essieu creux, avec des perforations latérales, sur lequel s'enroule un fil qui est celui qui garantit la taille de pore conforme aux caractéristiques de séparation du filtre.

Les cartouches filtrants sont logées dans des porte-cartouches spéciaux, fabriqués en différentes matières selon l'application (acier inox. 316, acier au carbone, polyéthylène, etc.), avec différentes finitions de fabrication (poli, poncé, époxy, etc.) et de différentes tailles (selon le débit à traiter). Au contraire des filtres à sable et anthracite, les filtres à cartouche ne se nettoient pas mais on remplace périodiquement les cartouches filtrant. [25]



Figure III.10: Photo d'un filtre à cartouche (microfiltration)

Chapitre III Présentation et description de la station de dessalement de Honaine

L'eau filtrée des filtres à pression est envoyée au processus de microfiltration par les filtres à cartouche. Il est installé à la station un point de dosage de métabisulfite de sodium et de dispersant avant l'entrée de l'eau filtrée aux filtres à cartouche. Les filtres à cartouche sont équipés de cartouches de polypropylène de filtration en profondeur avec un seuil de séparation de 15 microns absolus et une efficacité dans le brassage de particules de 99,6 %.

Avant et après les filtres à cartouche, des prélèvements d'échantillon sont installés pour la mesure du SDI de l'eau afin de déterminer l'efficacité de la filtration ainsi que la qualité de l'eau avant son entrée au sein des membranes. Le changement de cartouches des filtres se fait manuellement. [25]

III.2.3- Phase d'osmose inverse: Bâties de membranes, pompes à haute pression, pompe de recirculation et système d'échange de pression:

La phase d'osmose inverse est la partie principale de la station Elle est constituée par 10 lignes dénommées Rack. Chaque ligne est composé de :

- 1- Châssis à membranes.
- 2- Une pompe à haute pression.
- 3- Pompe de recirculation.
- 4- Système d'Echange de Pression.

La capacité de production nominale de chacune unité est de 20300 m³/jour. Chaque unité comprend 222 modules à 7 éléments du type SWC5 Max de Hydranautics. [1]



Figure III.11: Photo du bloc d'osmose inverse

Chapitre III Présentation et description de la station de dessalement de Honaine

Le système d'osmose inverse a été conçu pour pouvoir travailler selon une pression constante et un débit constant. Les pompes à haute pression présentent un débit de 866 m³/h. Les pompes de recirculation présentent un débit de 937 m³/h. Les pompes de recirculation ont été mises pour augmenter la pression de l'eau de mer provenant du système de récupération d'énergie. Cette augmentation est nécessaire pour compenser les pertes de charge produites dans les membranes. ^[1]

*** Nettoyage chimique des lignes :** Il est nécessaire d'effectuer le lavage des membranes pour éviter les dépôts au niveau de la membrane.

Le nettoyage chimique est utilisé lorsqu'un état d'encrassement appréciable est atteint au sein des membranes ou lorsqu'un nettoyage dû à un type de pollution spécifique s'avère nécessaire. Pour le nettoyage chimique, on dispose de deux citernes de stockage de produits chimiques de nettoyage, ainsi que d'un réservoir intermédiaire d'eau traitée. L'opérateur devra initialement sélectionner la ou les citernes de nettoyage chimique qu'il souhaite utiliser pour les opérations de nettoyage. Les produits chimiques utilisés dans le nettoyage des membranes dépendront du type de saleté produit. Le lavage est fait par la soude ou l'acide citrique qui sont dosés par des pompes doseuses. Le débit des pompes doseuses du nettoyage chimique est de 1008 m³/h. ^[1]

La dissolution de réactif traversera deux filtres à cartouches afin d'éliminer les petites particules de réactif présentes. Ces filtres sont du même type que ceux utilisés dans le prétraitement de l'eau de mer. Les cartouches filtrantes sont parfaitement échangeables avec celles du prétraitement. La dissolution est introduite au sein de la tuyauterie d'alimentation du bâti correspondant, juste après la vanne d'isolation. Elle traverse les modules en les lavant à faible pression, ce qui permet que la plupart de l'eau de la dissolution sorte par le rejet des modules conjointement avec les précipités dissouts et les petites particules qu'elle entraînera et qui constituaient la saleté des membranes. L'eau de sortie est de nouveau envoyée au réservoir de nettoyage, en établissant une recirculation de la dissolution du produit chimique.

Les produits chimiques utilisés dans le nettoyage des membranes sont divers et dépendront du type de saleté produit. ^[1]

Après chaque arrêt prolongé de l'une des lignes d'osmose inverse, un rinçage à l'eau filtrée des pompes à haute pression, des pompes de recirculation, des chambres d'échange de pression ainsi que les tuyauteries et les modules de membranes est mené. L'eau osmosé destinée à ce processus est prélevée au sein du réservoir de déplacement de 400 m³. La taille de ce réservoir permet le déplacement d'une ligne complète. L'injection d'eau de rinçage dans

Chapitre III Présentation et description de la station de dessalement de Honaine

les lignes de traitement lors du déplacement est effectuée au niveau de l'aspiration des pompes à haute pression et de l'entrée des systèmes d'échange de pression. ^[1]

* **Récupération de l'énergie avec échangeur de pression :** Pour la récupération de l'énergie de la saumure, des systèmes d'échange de pression sont utilisés. Il a été installé 22 PX au sein de chacune des lignes de l'Usine. Une représentation schématique du dispositif de récupération d'énergie PX est donnée à la Figure III.12. ^[1]

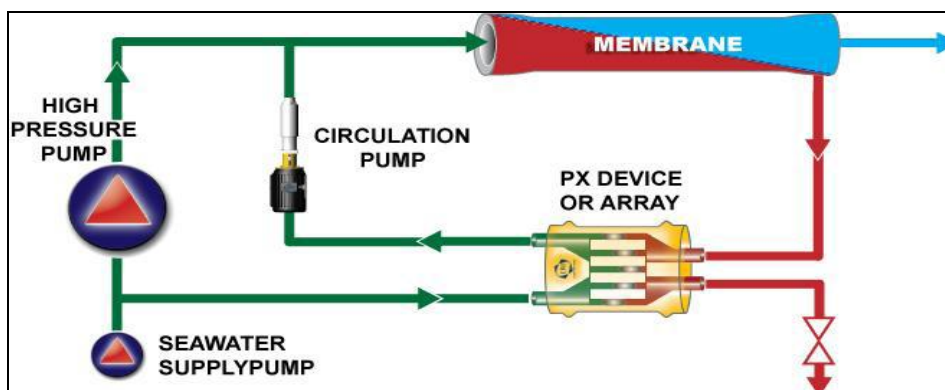


Figure III.12: Schéma du système de récupération d'énergie PX

Le principe de cette technique est le suivant : L'eau de mer fournie par la pompe d'alimentation en eau de mer circule dans un conduit de rotor sur le côté gauche à basse pression. Ce flux expulse la saumure du conduit sur le côté droit. Une fois que le rotor tourne après une zone scellée, la saumure à haute pression circule dans le côté droit du conduit, comprimant et expulsant l'eau de mer. L'eau de mer pressurisée ressort alors vers la pompe de surpression. ^[1]

III.2.4- Phase de reminéralisation de l'eau (Post-traitement):

L'eau osmosée provenant des bâtis des membranes est traitée avec de l'anhydride carbonique (CO_2) et des tours de calcite. Le CO_2 est emmagasiné sous forme liquide dans des tanks isolés, à $-20\text{ }^\circ\text{C}$. À partir d'un tank, le CO_2 est vaporisé par quatre évaporateurs électriques. Deux pompes de $100\text{ m}^3/\text{h}$ effectuent une aspiration du collecteur d'eau du perméat, à la sortie des racks d'osmose inverse. Les pompes refoulent l'eau à travers des réservoirs de mélange, dans les réservoirs de mélange de CO_2 vaporisé. Après ajustement du pH de l'eau avec du CO_2 , l'eau est amenée à les colonnes de calcites. ^[1]

La composition de la calcite est du carbonate de calcite. Dans la station de dessalement de Honaine, il est installé un total de dix (10) colonnes de calcites. À l'intérieur de chaque colonne, il y'a un faux fond avec des buses de distribution, sur lequel est disposé le lit de calcites d'une hauteur de 3 m. En passant par le lit de calcites, l'eau est

Chapitre III Présentation et description de la station de dessalement de Honaine

automatiquement équilibrée et l'eau atteint un indice de Langelier proche de zéro. Les colonnes de calcites sont atmosphériques. L'eau entre dans les colonnes par la partie inférieure de celles-ci et sort par la partie supérieure. ^[1]

Afin d'ajuster l'indice de Langelier à plus de 0, il faut effectuer un dosage d'hydroxyde de sodium (soude). La soude est dosé après le passage de l'eau osmosée à travers les colonnes de calcites. Pour assurer le mélange d'hydroxyde de sodium avec de l'eau, le dosage de l'hydroxyde de sodium est effectué dans l'aspiration des pompes d'eau produit.

Deux réservoirs de soude de 8 m³ de capacité chacun sont ainsi installés. L'injection de soude est effectuée au moyen de 5 pompes de dosage, l'une d'elles étant de réserve. Le remplissage des réservoirs se fait par une pompe de transfert de 33 m³/h de débit. ^[1]

Pour le dosage de l'hypochlorite, deux réservoirs de 30 m³ de capacité chacun sont prévus. L'injection de l'hypochlorite est effectuée au moyen de (2+1) pompes de dosage, l'une d'elles étant de réserve. Pour le remplissage des réservoirs, une pompe de transfert de 33 m³/h de débit est installée. L'ajout du produit s'effectue dans l'aspiration des pompes d'eau produite. ^[1]

III.2.5. Pompage de l'eau dessalée :

Il est utilisé 11 pompes pour refouler l'eau de mer dessalée à partir du réservoir d'un réservoir de stockage de 5000 m³ existant dans la station. Onze pompes de refoulement, dont une est en réserve, et d'une capacité de pompage de 833 m³/h chacune sont installées. Les pompes effectuent leur aspiration au sein du réservoir de stockage. ^[1]

PARTIE II

ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE IV
MATERIEL ET METHODES

Chapitre IV: Matériel et méthodes

IV-1- Introduction

L'objectif de cette étude est d'étudier l'influence de différents matériaux filtrants sur l'efficacité du prétraitement des eaux de mer de la station de dessalement de Honaine. L'essai expérimental sur ces matériaux, effectué au niveau de cette station, s'est étalé du 28/02/2013 au 27/03/201, soit une durée d'environ 1 mois.

Plusieurs paramètres de l'eau permettant d'évaluer le degré d'efficacité de ces matériaux quant au prétraitement de l'eau de mer ont été analysés. Ces paramètres sont: la turbidité, les matières en suspension et la salinité de l'eau. Parallèlement nous avons procédé à la mesure du pH et de la conductivité de l'eau. Les prélèvements des échantillons ont été effectués avant et après passage de l'eau à travers les filtres. Les analyses ont été menées au niveau du laboratoire de la station qui disposera de l'équipement et des instruments nécessaires à cet égard.

IV-2- Matériel et Méthodes d'analyses

IV-2-1- Température :

La température est un paramètre physique de l'eau. Elle dépend largement de la source d'eau brute et de sa profondeur d'enfouissement. La mesure de la température de l'eau a été effectuée en utilisant une sonde thermométrique qui est plongée soigneusement dans la prise d'essai. La lecture est faite après stabilisation du thermomètre.

IV-2-2- pH :

C'est le potentiel d'hydrogène qui consiste à mesurer la concentration en ions H^+ dans l'eau afin de déterminer l'acidité ou l'alcalinité de cette eau. Ce paramètre a été mesuré au moyen d'un pH mètre portable pH 25 (Figure IV.1) qui peut fonctionner comme un pH-mètre ou un thermomètre. Utilisé comme thermomètre, cet appareil permet de mesurer des températures comprise entre $-200^{\circ}C$ et $600^{\circ}C$.



Figure IV.1: Photo du pH mètre portable pH 25

Avant chaque mesure, il est effectué un étalonnage de l'appareil au moyen de solutions tampon. Cela permet de compenser les déviations du potentiel d'asymétrie et de pente de l'électrode avec le temps. Nous avons utilisé comme premier tampon celui du pH 7, et comme deuxième tampon, celui du pH 4 ou 9, selon que la zone de travail est acide ou alcaline.

IV-2-3- Conductivité/salinité:

La conductivité est la mesure de la capacité d'une eau à conduire un courant électrique. Exprimée en ms/cm , sa valeur varie en fonction de la température. Pour mesurer ce paramètre ainsi que celui de la salinité, on a utilisé un conductimètre/salinomètre portable CM 35 (Figure IV.2). Il permet de mesurer la conductivité (ou la salinité) de l'eau selon le choix du mode la mesure. La sonde employée est de type Pt 1000.



Figure IV.2 : Photo du conductimètre portable CM 35

Comme le pH –mètre, cet instrument a fait l’objet d’étalonnage avant chaque mesure. L’étalonnage consiste à régler les valeurs lues par l’appareil en fonction des valeurs de solutions étalon. Cette opération est très importante, car il permet d’obtenir des lectures très exactes. Pour la zone de faibles conductivités, les étalons choisis sont 147 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$, et ceux correspondant à la zone de la haute conductivité sont 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 12,88 mS/cm . L’étalon le plus utilisé est 1431 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

IV-2-4- Turbidité :

La turbidité est une caractéristique optique de l’eau, à savoir sa capacité à diffuser ou absorber la lumière incidente. La turbidité est donc un des facteurs de la couleur de l’eau. La turbidité est due à la présence dans l’eau de particules en suspension minérales ou organiques.

Les conséquences de la turbidité concernent la pénétration de la lumière et des ultraviolets dans l’eau, et donc la photosynthèse et le développement des bactéries.

Ce paramètre a été mesuré au moyen d’un turbidimètre de paillasse de marque HACH (Figure IV. 3).



Figure IV.3 : photo du turbidimètre HACH

IV-2-5-Matières en suspension (MES) :

Sont des matières fines organiques ou minérales insolubles visibles à l’œil nu et qui sont à l’origine de la turbidité de l’eau. Elles limitent la pénétration de la lumière dans l’eau, diminuent la teneur en oxygène dissous et nuisent au développement de la vie aquatique.

Après centrifugation des échantillons, les matières en suspension ont été mesurées par pondération en utilisant l’équation suivante :

$$\text{MES (g/l)} = (P_1 - P_0) / V$$

Avec : MES : matière en suspension (g/l)

P_1 : poids du filtre après séchage (g)

P_0 : poids de filtre vide (g)

V : volume d'eau filtré (l)

Les pesées ont été effectuées en utilisant d'une balance électronique.

CHAPITRE V
RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Chapitre V: Résultats et Interprétations

V.1. Introduction

Comme cité précédemment dans le chapitre matériel et méthodes, et afin d'étudier l'influence de différents matériaux filtrants sur l'efficacité du prétraitement des eaux de mer de la station de dessalement de Honaine, une série de mesures sur les paramètres de l'eau, permettant d'évaluer le degré d'efficacité de ces matériaux, ont été effectuées, avant et après prétraitement par les filtres, soit sur l'eau à l'entrée des filtres et l'eau de sortie. Les paramètres analysés sont : le pH, la conductivité électrique, les matières en suspension (MES), la salinité et la turbidité. Le travail expérimental s'est étalé du 28/02/2013 jusqu'au 26/03/2013. Les résultats expérimentaux trouvés sont présentés ci-après.

V.2. Résultats et interprétations

V.2.1. Le pH

La figure V.1 montre la variation du pH de l'eau de mer de la station avant (entrée) et après passage à travers les filtres.

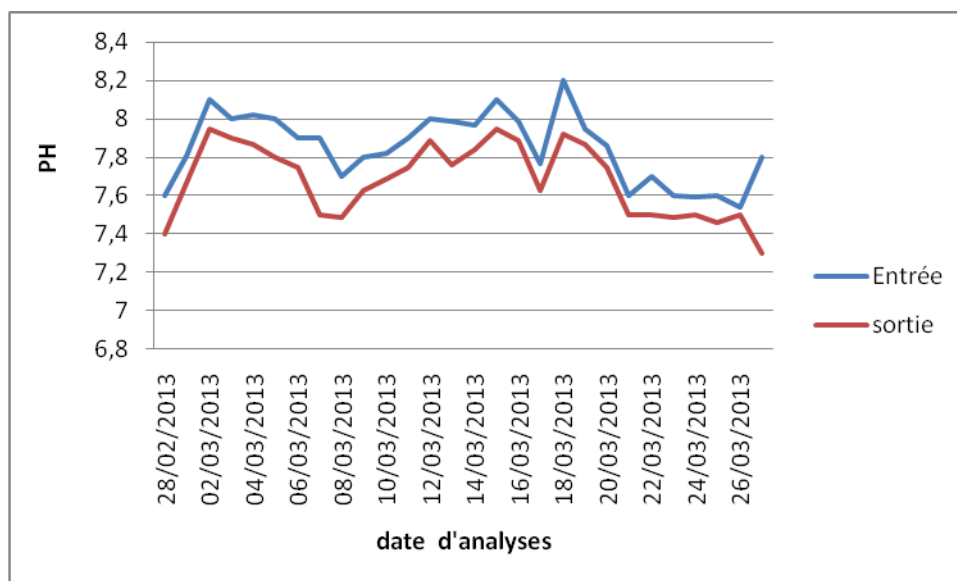


Figure V.1: Variation journalière du pH de l'eau de mer avant (entrée) et après filtration (sortie)

Selon la figure V.1, on constate que les valeurs du pH de l'eau sont proches de la neutralité que ce soit avant ou après prétraitement. Elles varient de 7,3 à 7,95 et ne représentent aucun danger pour les membranes. Une baisse d'environ 0,2 unités par rapport à l'eau d'entrée est observée dans l'eau après filtration. Signalons que le pH dans l'eau de mer est généralement proche de 7 et varie entre 7,6 jusqu'à 8,2.

V.2.2. La conductivité électrique

La figure V.2 donne la variation de la conductivité électrique des eaux avant et après passage à travers les filtres.

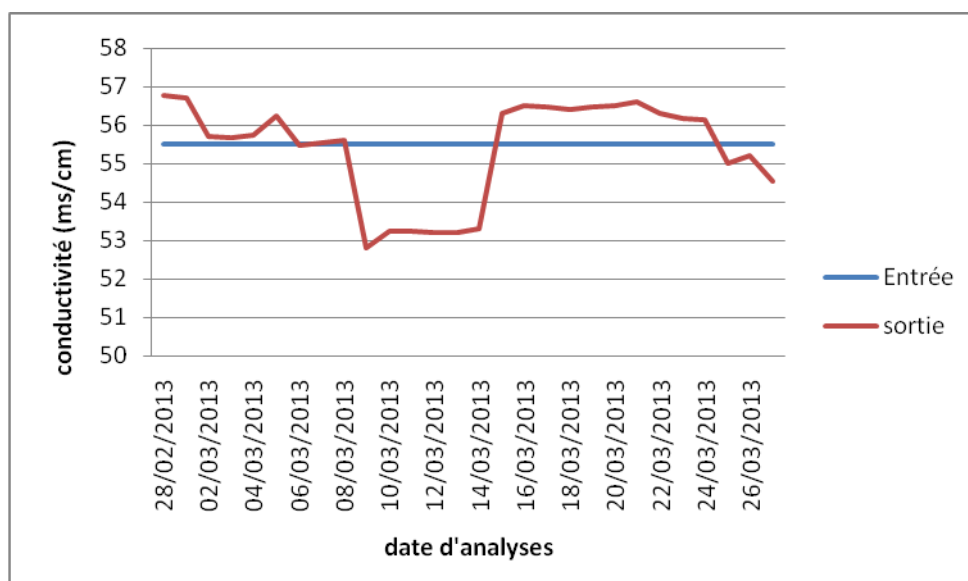


Figure V.2: Variation journalière de la conductivité de l'eau de mer avant (entrée) et après filtration (sortie)

L'examen des résultats obtenus (Figure V.2) montre que la conductivité de l'eau après filtration est comprise entre 52,8 et 56,74 ms/cm. En revanche, elle est quasiment constante dans l'eau avant filtration (55,5 mS/cm). Les valeurs de la conductivité de l'eau de mer de la région méditerranéenne varient entre 55,5 et 58 ms/cm, ce qui confirme la fiabilité des résultats obtenus.

V.2.3. Les matières en suspension (MES)

La figure V.3 donne la variation de la concentration des matières en suspension (MES) dans l'eau avant et après passage sur les filtres.

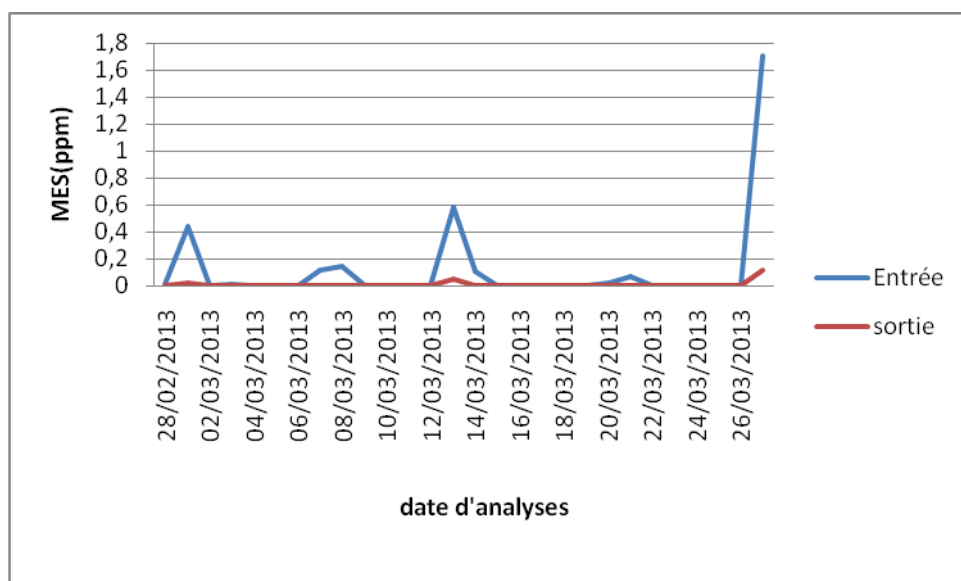


Figure V.3: Variation journalière de la concentration des matières en suspension (MES) dans l’eau de mer avant (entrée) et après filtration (sortie)

En examinant les résultats obtenus (figure V.3), on remarque que la teneur des matières en suspension (MES) dans l’eau prétraitée par les filtres est trop faible. Elle est pratiquement nulle et varie de 0 à 0,12 ppm. Ceci confirme l’efficacité du prétraitement par les matériaux filtrants utilisés. En revanche, la concentration des MES dans l’eau de mer avant prétraitement par les filtres est instable et relativement élevée. Des pics de 0,6 et 1.7 ppm ont été enregistrés le 01 et le 27 Mars 2013 dus à l’état de la mer (peu ou trop agité).

V.2.4. La salinité

La figure V.4 donne la variation de la salinité de l’eau de mer avant et après prétraitement par les filtres.

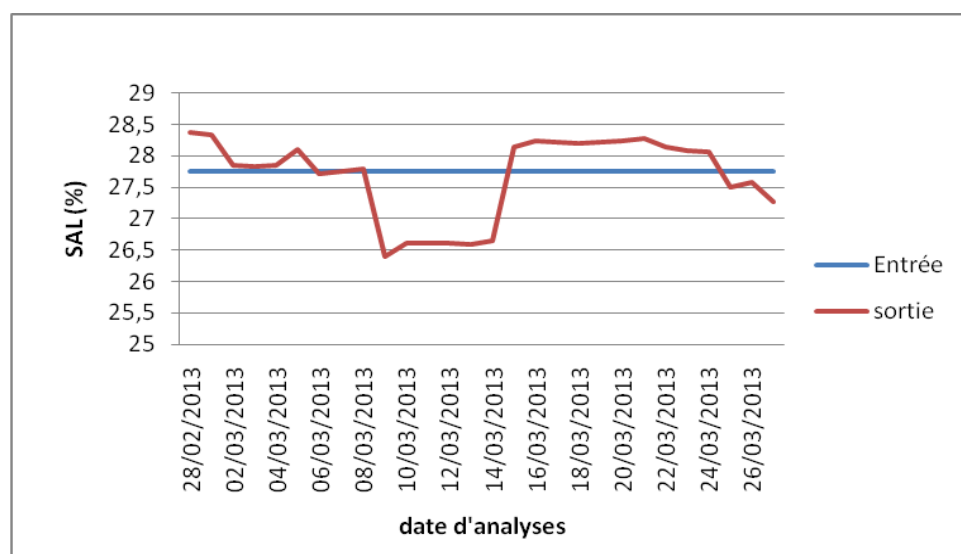


Figure V.4: Variation journalière de la salinité de l’eau de mer avant (entrée) et après passage à travers les filtres (sortie)

L'examen de la figure V.4 montre que la salinité de l'eau de mer à la sortie des filtres est comprise entre 26,6 et 28,3 %. Cependant elle est constante (environ 27,75 %) dans l'eau d'alimentation des filtres, soit près de celle des eaux après filtration. Les prétraitements par les matériaux filtrants n'ont pas modifié la salinité de l'eau de mer. La salinité de l'eau varie selon les variations de la conductivité électrique.

V.2.5. La turbidité :

La figure V.5 donne la variation de la turbidité de l'eau avant et après passage sur les filtres.

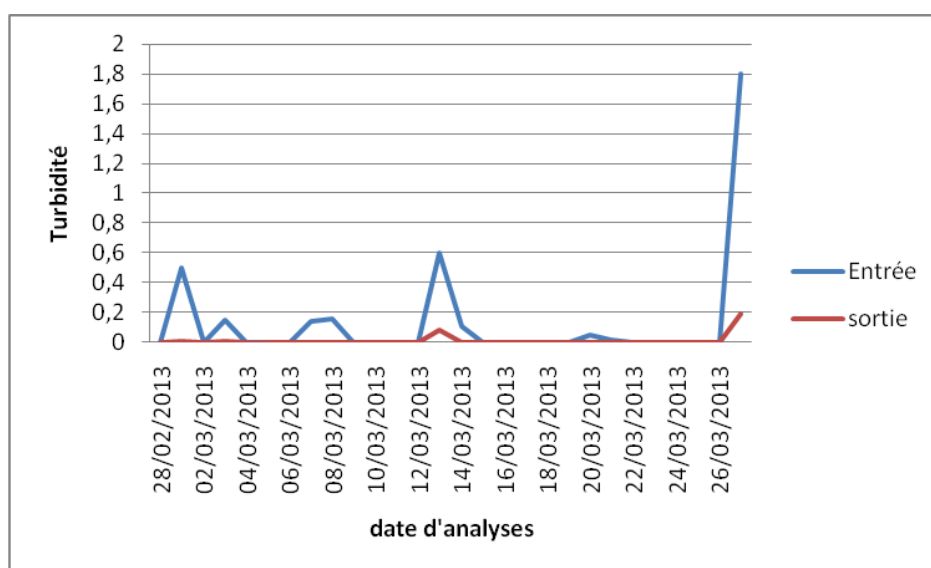


Figure V.5: Variation journalier de la turbidité de l'eau de mer avant (entrée) et après passage à travers les filtres (sortie)

En se référant aux résultats indiqués sur la figure V.5, on constate que les valeurs de la turbidité suivent les mêmes allures que celles des matières en suspension. La turbidité dans l'eau, après prétraitement (sortie des filtres) est trop faible et presque négligeable. Elle est variable de 0 à 0,19 NTU. Ceci confirme l'efficacité des matériaux filtrants quant à la fixation des particules en suspension. De tels résultats sur la turbidité dans l'eau filtrée ne présentent aucun risque de colmatage pour les membranes.

V.3. Conclusion

Selon les résultats des analyses obtenus, on peut conclure que les eaux filtrées présentent de bonnes caractéristiques physiques ou chimiques pour une utilisation dans le dessalement. L'eau après prétraitement ne présente aucun sur le colmatage des membranes. Les valeurs de la turbidité et des matières en suspensions sont proche du zéro ce qui confirme l'efficacité de tels matériaux filtrants (sable, anthracite et gravier) pour le prétraitement des

eaux de mer. D'où un lavage chimique des membranes, tous les jours, n'est pas souvent nécessaire.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

En Algérie, le recours au dessalement de l'eau de mer constitue une solution urgente pour satisfaire l'alimentation en eau des villes côtières. Ces dernières années la consommation en eau potable est toujours en croissance. Pour pallier à cette demande en ressources hydriques, engendrée par la situation de sécheresse répétée qu'a connue le pays pendant les dix dernières années, l'Algérie a engagé plusieurs projets de construction de stations de dessalement de grande capacité en partenariat avec des compagnies étrangères. C'est le cas de la station de dessalement de Honaine située à l'ouest du pays et précisément dans la wilaya de Tlemcen. Construite par le groupe Geida d'Espagne et d'une capacité de dessalement est de 200.000 m³ jour, cette station assure l'eau potable pour 23 communes ainsi que les agglomérations urbaines du grand Tlemcen (Tlemcen, Mansourah et Chetouane), soit une population d'environ 555.000 habitants. Le procédé utilisé dans la station est celui de l'osmose inverse.

Les procédés de séparation membranaire tel que l'osmose inverse peuvent servir à produire de l'eau potable à partir de l'eau de mer qui peut contenir des particules en suspension, des colloïdes organiques et des micro-organismes. L'implantation de tels procédés passe par le contrôle du colmatage des membranes qui dépend de la qualité de l'eau filtrée. Cette filtration peut être faite par passage de l'eau sur des matériaux poreux ou en utilisant des membranes de microfiltration ou d'ultrafiltration.

Le but de ce travail était d'étudier l'influence de différents matériaux filtrants (sable, anthracite, gravier) utilisés dans la station de dessalement de Honaine sur l'efficacité du prétraitement des eaux de mer. Plusieurs paramètres permettant d'évaluer le degré d'efficacité de ces matériaux quant au prétraitement de l'eau de mer ont été analysés. Ceci inclut : la turbidité, les matières en suspension, la salinité, la conductivité et le pH de l'eau.

Les conclusions tirées de cette étude sont les suivantes :

- Les valeurs du pH de l'eau de mer sont proches de la neutralité que ce soit avant ou après prétraitement par les filtres ;
- La teneur des matières en suspension (MES) et de la turbidité dans l'eau prétraitée par les filtres sont trop faible. Elles sont pratiquement nulles confirmant ainsi l'efficacité du prétraitement par les matériaux filtrants utilisés ;
- Les prétraitements par les matériaux filtrants étudiés n'ont pas modifié la salinité de l'eau de mer.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] ALLAM Ibtiissam, La mise en exploitation de la station de dessalement de Honaine, mémoire d'ingénieur d'état en hydraulique, Université de Tlemcen, faculté de technologie, 2012
- [2] 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, Thèse de doctorat, INSA de toulouse, 2009, 253 p.
- [3] Anonyme, osmose inverse, document pdf, 12 p, disponible sur le site : http://www.educnet.education.fr/rnchimie/gen_chim/triboulet/rtf/osmose_inverse.pdf
- [4] Veolia environnement, Le dessalement de l'eau de mer, Le magazine de la chronique scientifique, N°4 / Juillet-Août 2005, 4 p
- [5] Cours de monsieur CHIBOUB FELLAH, dessalement des eaux, Licence technologie de traitement des eaux, université de Tlemcen, faculté de technologie.
- [6] ALAIN MAUREL, Dessalement des eaux de mer et des eaux saumâtre, Edition Lavoisier 2^e édition, année 2006, page 296 p ;
- [7] Anonyme, Osmose inverse, hydranet traitement des eaux, 5 p, disponible sur le site : <http://www.hydranet.fr/>
- [8] site internet : <http://www.google.com/search=1&q+Membrane+asym%C3%A9trique>
- [9] Anonyme, membranes céramiques, IBMEM La séparation membranaire, Germany 1 p
- [10] site internet : http://www.ibmem.fr/images/keramische_membranen.jpg
- [11] site internet : <http://www.advantecmfs.com/filtration/membranes/img/ccac.jpg>
- [12] site internet : http://img.greentradebay.com/picture/200939/200939_200823171132.jpg
- [13] Viviane Renaudin, le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, article de recherche, Université Henri Poincaré de Nancy, 11 p.
- [14] Aurélien Busnot, Comparaison des performances de membranes MF-UF sur une eau de surface, étude de Juillet 2003 à Avril 2005, Rapport final AESN, 48 p.
- [15] Valiron.F, Mémento du gestionnaire de l'alimentation en eau et de l'assainissement (Tome 1), Edition : Tec et Doc. Paris, 1994,435 p.
- [16] Drouart.E et al, Alimentation en eau potable des populations menacées, Edition: Hermann, Paris, 1999, 397 p.
- [17] Sigg.L et al., Chimie des milieux aquatiques: chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement, Edition Dunod, 2000, 567 p.

- [18] Annie Bissonnette, Utilisation De Nanomembranes Pour Le Dessalement De L'eau Et Comparaison Avec L'osmose Inverse Et La Distillation, Janvier 2008, 58 p.
- [19] Traitement De Potabilisation Des Eaux De Surface, Filtration, 59 p.
- [20] Jean-Marc BERLAND et Catherine JUERY, Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau, document FNDAE 14, Office International de l'Eau, 2002, 71 pages.
- [21] Farid TATA, Dessalement de l'eau de mer : bilan des dernières avancées technologiques; bilan économique ; analyse critique en fonction des contextes, Janvier 2009, 15 p.
- [22] R. Desjardins, Le traitement des eaux, Edition de l'école polytechnique de Montréal,
- [23] Rapport de traitement d'eau de mer par osmose inverse, Mémoire technique, Hydrotraitement, 2003.
- [24] M. ZAARA, les grandes stations de dessalement : aspects techniques et économiques, présentation ppt Water Program.
- [25] GEIDA IDAM HONAINÉ, cours pour le personnel d'exploitation et de maintenance de la station dessalement de Honaine.