

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Thèse de Doctorat

Présentée par :

TALANTIKITE SID AHMED

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT Science** en :

Filière : Génie des procédés

Spécialité : Traitement des effluents industriels

***Contribution à l'étude du comportement des
membranes d'osmose inverse : cas des polyamides***

Devant le jury composé de :

Mr LOUHAB	Krim	Professeur	UMBB	Président
Mr BENRACHEDI	Khaled	Professeur	UMBB	Directeur
Mr SELATNIA	Ammar	Professeur	ENP	Examineur
Mr EL HADI	Djamel	Professeur	U.BLIDA	Examineur
Mr KERCHICH	Yacine	Professeur	ENP	Examineur

Année Universitaire 2022/2023

SOMMAIRE

SOMMAIRE	3
REMERCIEMENTS.....	8
<i>DEDICACES</i>	9
ملخص	10
RESUME.....	11
ABSTRACT	12
LISTE DES TABLEAUX	13
LISTE DES FIGURES.....	15
INTRODUCTION.....	19
<i>PARTIE THEORIQUE</i>	22
CHAPITRE I: GENERALITES	24
I.1. RESSOURCES EN EAU	24
I.1.1. Situation de la ressource en eau dans le monde.....	24
I.1.2. Disponibilité de la ressource en eau dans le monde.....	25
I.1.3. Situation de stress hydrique et pénurie dans le monde	27
I.1.4. Ressources en eau en Algérie	30
I.1.4.1 Ressource en eau potable	32
I.1.4.1.1. Ressource superficielle.....	32
I.1.4.1.2. Ressource souterraine.....	33
I.1.4.2. Ressources en eau non conventionnelles.....	34
I.1.4.2.1. Les eaux saumâtres (souterraines et superficielles)	34
I.1.4.2.2. Les eaux usées épurées.....	34
I.1.4.2.3. Les eaux de mer	35
I.2. CARACTERISTIQUES DES EAUX MARINES.....	36
I.2.1. Composition de l'eau de mer	36

I.2.1.1. Composition minérale de l'eau de mer	36
I.2.1.2. Composition organique de l'eau de mer	40
I.2.1.3. Composition en gaz dissous de l'eau de mer	41
I.2.1.3. Elément nutritifs	41
I.2.2. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer	42
I.2.2.1. La salinité	42
I.2.2.1.1. Notions de salinité	42
I.2.2.1.2. Définition théorique de la salinité	42
I.2.2.1.3. La mesure de la salinité	42
I.2.2.1.4. Variation de la salinité	43
I.2.2.2. La Densité	44
I.2.2.3. Solubilité	44
I.2.2.4. La température :	45
I.2.2.5. Potentiel d'hydrogène « pH »	45
I.2.2.6. Dureté	46
I.2.2.8. Conductivité électrique	47
I.2.2.8. Autres caractéristiques	47
I.2.3. Caractéristique et normes de potabilité sur les principaux éléments d'une eau potable	48
CHAPITRE II : TECHNIQUES DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER	51
II.1. DESSALEMENT : DEFINITION ET HISTORIQUE	51
II.2. DESSALEMENT DE L'EAU DE MER DANS LE MONDE	52
II. 3. LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER EN MEDITERRANEE	54
II.4. LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER EN ALGERIE	55
II.4.1. Historique du dessalement de l'eau de mer en Algérie	55
II.4.2. Programme de dessalement de l'eau de mer en Algérie	56
II.4.3. Répartition des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie	57
II.5. LES PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE DESSALEMENT DES EAUX	59
II.5.1. Classification des techniques de dessalement	59
II.5.2. Les procédés de distillation	61
II.5.2.1. Principe	61
II.5.2.2. Les différents types de distillation	61
II.5.2. Les procédés membranaires	64
II.5.2.1. L'osmose inverse (OI)	64
II.5.2.2. L'électrodialyse	64
II.5.3. Fonctionnement et organisation générale installations de dessalement	65
CHAPITRE III : PROCEDE DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER PAR OI	68
III.1. HISTORIQUE ET DEFINITION DU PROCEDE D'OI	68
III.2. PRINCIPE DE L'OSMOSE INVERSE	68

III.2.1. Définition de l'osmose	68
III.2.2. Expression de la pression osmotique : Loi de Van't Hoff.....	69
III.3. PARAMETRE DE FONCTIONNEMENT EN OI	71
III.3.1. La membrane, élément essentiel de l'OI	71
III.3.1.1. Constitution	73
III.3.1.2. Mécanisme de séparation des membranes.....	74
III.3.1.3. Structure des membranes.....	76
III.3.2. Assemblage des membranes	77
III.3.2.1. Définition du module	77
III.3.2.2. Type de module	78
III.3.2.3. Description et comparaison des modules	80
III.4. CARACTERISTIQUES DE LA MEMBRANE ET PERFORMANCE DE L'OI.....	82
III.4.1. Pression transmembranaire : PTM	82
III.4.2. Flux et perméabilité	83
III.4.2.1. Flux de perméat J_v et grandeurs associées :.....	83
III.4.2.2. Perméabilité hydraulique de la membrane : L_p	83
III.4.3. Le taux de rejet ou taux de rétention.....	84
III.5. PARAMETRE DEFINISSANT LA PERFORMANCE DE L'OI.....	84
III.6. COLMATAGE DES MEMBRANES	86
III.6.1. Définition.....	86
III.6.2. Type de Colmatage.....	87
III. 6.4. Les conséquences de colmatage.....	91
III.6.5.1. Nettoyage	94
III.6.5.2. Prétraitement	96
III.7.1. Poste de prise d'eau : Le pompage-le stockage et le tamisage.....	101
III.7.2. Le poste de Prétraitement.....	102
III.7.2.1. Objectifs du prétraitement	102
III.7.2.2. Étapes du prétraitement	103
III.7.3. Poste de Pompage et Récupération d'énergie.....	107
III.7.4. Poste de dessalement d'Osmose inverse proprement dite	108
III.7.4.1. Poste de post-traitement	108
III.7.4.2. Reminéralisation	109
<i>PARTIE EXPERIMENTALE</i>	111
CHAPITRE I : MATERIEL ET METHODE	113
I.1. LA STATION DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER (CAP DJINET).....	113
I.1.1. Situation géographique de la station de dessalement	113
I.1.2. Présentation de la station de dessalement Cap Djinet.....	115
I.1.3. Caractéristiques de l'usine de dessalement « Cap Djinet ».....	115

I.1.3.1. Généralités	115
I.1.3.2. Les activités et fonctionnement de la station	115
I.2. PROCESSUS DU DESSALEMENT APPLIQUÉ DANS LA STATION DU DESSALEMENT DE CAP DJINET	117
I.2.1. Captage de l'eau de mer	117
I.2.2. Le Prétraitement	120
I.2.2.1. Le prétraitement chimique	121
I.2.2.2. Prétraitement physique	122
I.2.3. Procédé osmose inverse.....	124
I.2.3.1. Pompe à haute pression	124
I.2.3.2. Systèmes de membranes d'osmose inverse	126
I.2.4. Récupération d'énergie.....	126
I.2.4.1. Présentation du système de fonctionnement	126
I.2.4.2. Principe de fonctionnement du système.....	129
I.2.4.2.1. Pompes BOOSTER	129
I.2.4.2.1. Poste de nettoyage chimique	129
I.3. MATERIAUX DE FILTRATION	136
I.3.1. La solution étudiée.....	136
I.3.2. Caractéristiques de la membrane.....	136
I.3.2.1. Origine de la membrane	136
I.3.2.2. Nomenclature de la membrane	137
I.3.2.3. Performance de la membrane	137
I.3.2.4. Nettoyage de la membrane	139
I.4. PROTOCOLE D'ANALYSE	140
I.4.1. Prélèvement et Echantillonnage	140
I.4.1.1. Eau de mer et perméat.....	140
I.4.1.2. Membrane et le dépôt colmatant	141
I.4.2. Description des techniques d'analyse des eaux d'alimentation et de perméat.....	141
I.4.2.1. Caractérisation des paramètres organoleptiques	141
I.4.2.2. Paramètres physicochimiques	141
I.4.2.3. Paramètres chimiques.....	147
I.4.3. Autopsie de la membrane	150
I.4.3.1. Analyse de la membrane autopsiée.....	151
I.4.3.1.1. Contrôle visuel de la membrane autopsiée	151
I.4.3.1.2. Intégrité de la membrane	151
I.4.3.2. Analyse du dépôt colmatant.....	152
I.4.3.2.1. Analyse des composants organiques	152
I.4.3.2.2. Analyses chimiques	152
I.4.3.2.3. Analyses microbiologiques.....	153

CHAPITRE II: RESULTATS ET DISCUSSION	155
II.1. CARACTERISTIQUE DE L'EAU TRAITEE PAR L'UNITE DE « CAP DJINET »	155
II.1.1 Paramètres organoleptiques.....	155
II.1.2 Paramètres physico-chimiques.....	156
II.1.3. Paramètres chimiques	164
II.1.4. Comparaison des caractéristiques de l'eau de mer et de la saumure	170
II.2. CARACTERISATION DE LA MEMBRANE ET DU DEPOT	176
II.2.1. Inspection visuelle de la membrane	176
II.2.1.1. Inspection de l'extérieur	176
II.2.1.2. Inspection interne	178
II.3. ETUDE DE LA SURFACE DE LA MEMBRANE ET DE L'ENCRASSEMENT 181	
III.3.1. Analyse des Composés organiques	181
II.3.2. Analyse de la surface de la membrane et de l'encrassement	181
II.3.2.1. Encrassement (Le dépôt).....	181
II.3.2.1.1. SEM/EDS- Résultats chimiques	181
II.3.2.1.2. Résultats de l'EDS	183
II.3.2.2. Analyse de la surface de la membrane (membrane encrassée).....	189
II.3.2.2.1. Résultats de l'analyse SEM-EDX.....	189
II.3.2.2.2. L'analyse EDS de la membrane encrassée	192
II.3.3. Résultats de la numération microbiologique	198
II.3.4. Intégrité de la membrane encrassée.....	199
II.3.4.1. Test au bleu de méthylène	199
III.3.4.2. Test de Fujiwara.....	200
III.3.4.3. Caractérisation des membranes (banc d'essai à plat).....	201
II.3.4.4. Tests de nettoyage.....	203
II.3.5. Résultat des analyses ATR/FTIR	204
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	210
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	215

Remerciements

Je remercie tout d'abord notre Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail

Je tiens à remercier tout d'abord le professeur BENRACHEDI Khaled pour m'avoir dirigé au cours de ces années. Ses conseils et son expérience ont toujours été d'une aide précieuse;

Je tiens aussi à remercier le Professeur LOUHAB Krim à l'université d'UMBB pour m'avoir fait un grand honneur en acceptant de présider le jury.

Je tiens à remercier tout particulièrement les professeurs EL HADI Djamel de l'université de Blida et KERCHICH Yacine et SELATNIA Ammar de l'ENP d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Afin de n'oublier personne, mes vifs remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont aidée à la réalisation de ce modeste travail.

Par ailleurs, j'aimerais remercier vivement tous les enseignants qui ont contribué à ma formation

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,

*A mes parents qui tiennent une place importante dans ma vie qui m'ont
beaucoup aidée grâce à leurs précieux conseils.*

*Mon épouse, pour ton irremplaçable et inconditionnel aide et ta patience tout
au long de ce travail de recherche.*

*A mes enfants :
Anis, Lina et Sarah*

*A mon frère et à ma sœur,
A mes petites nièces,*

*A ma belle famille, pour leurs sincères encouragements
A ma belle sœur, merci pour tes orientations,
A mes belles sœurs,
A mes beaux frères.*

A toutes mes tantes et oncles

A mes amis

A la mémoire de mes grands parents.

ملخص

في الجزائر ، مثل العديد من دول جنوب البحر الأبيض المتوسط الأخرى ، لا تزال موارد المياه محدودة. يوجد اليوم طلب متزايد على مياه الشرب ومتطلبات المياه للري والصناعة. لذلك ، إذا أخذنا في الاعتبار إمكانات المياه المالحة على طول الساحل 1600 كيلومتر ، باستخدام عملية التناضح العكسي R.O ، فقد تم الترويج لتحلية مياه البحر كبديل فعال لتوفير الأمن لمياه الشرب.

ومع ذلك ، فإن القشور والقاذورات هي أخطر المشاكل في التشغيل الفعال لأنظمة التناضح العكسي وقد تؤدي إلى فقدان أداء الغشاء ثم الضروري لاستبدال الأغشية. لذلك ، من أجل إطالة عمرها وتقليل تكاليف إنتاج مياه الشرب ، من الضروري دراسة ظاهرة تآكل الغشاء باستخدام التحليل الكيميائي وتشريح الغشاء لتحليل عناصر التناضح العكسي. يدرس عملنا ظاهرة تآكل غشاء محطة تحلية مياه البحر في كاب جينيت. نحن نركز على تشريح غشاء التناضح العكسي بما في ذلك دراسة شاملة لسطح الغشاء وفاصل رفض الطعام. قمنا بتنفيذ العديد من التقنيات بما في ذلك التحليل الكيميائي والميكروبيولوجي للرواسب التي غطت سطح الغشاء ، والاختبارات لتحديد الأكسدة الكيميائية (اختبار فوجيوارا) ، والاختبارات مع الفحص المجهر الإلكتروني (SEM) مع تحليل العناصر بواسطة الأشعة السينية المشتتة للطاقة (EDX) لدراسة التركيب الذري للقاذورات وتحليل فورييه للأشعة تحت الحمراء (FTIR-ATR) تشير النتائج التي تم الحصول عليها من التحليلات المختلفة التي أجريت على العناصر التي تم تشريحها إلى أن الغشاء من الموضع الأول يُظهر وجودًا عاليًا للقاذورات. تظهر القاذورات على الأغشية الخصائص الأساسية: تم التعرف على خليط من مشتقات البروتين المتعلقة بالأغشية الحيوية ، وكلوريد الصوديوم ، والحديد ، وسيليكات الألمنيوم وعناصر أخرى شائعة على تلوث غشاء مياه البحر. نظرًا لوجود القاذورات ، أظهر الغشاء من الموضع الأول تدفق نفاث أقل من القيم المرجعية. بالنظر إلى هذه النتائج ، يجب إجراء مراجعة للمعالجة المسبقة للنباتات والتطهير من أجل تجنب وجود مكونات القاذورات التي تم تحديدها أثناء تشريح الجثة.

Résumé

En Algérie, comme beaucoup d'autres pays du sud de la Méditerranée, les ressources en eau restent limitées. Il existe aujourd'hui une augmentation de la demande en eau potable et des besoins en eau pour l'irrigation et l'industrie. Par conséquent, si l'on considère le potentiel de l'eau salée le long de la côte de 1200Km, en utilisant le processus de l'osmose inverse OI, le dessalement de l'eau de mer a été promu comme une alternative efficace pour assurer la sécurité de l'eau potable. Cependant, l'entartrage et l'encrassement sont les problèmes les plus sérieux dans l'efficacité fonctionnement des systèmes d'osmose inverse et peut entraîner une perte de performance de la membrane ce qui entraîne la contrainte de remplacer les membranes qui ont une durée de vie courte. Par conséquent, afin de prolonger sa durée de vie et de réduire les coûts de production d'eau potable, il est nécessaire d'étudier phénomène d'usure de la membrane par analyse chimique et autopsie membranaire pour analyser les éléments colmatant de l'osmose inverse. Nos travaux étudient le phénomène d'usure de la membrane de l'usine de dessalement d'eau de mer Cap Djinet. Nous nous sommes concentrés sur l'autopsie des membranes de l'osmose inverse comprenant une étude exhaustive de la surface de la membrane. Nous avons réalisé plusieurs techniques comprenant une analyse chimique et microbiologique des dépôts qui recouvrait la surface de la membrane, des essais pour déterminer l'oxydation chimique (test Fujiwara), Tests avec Scanning Microscopie électronique (MEB) avec analyse par rayons X à dispersion d'énergie (EDX) pour étudier la composition atomique de l'encrassement et une analyse de Infrarouge à transformée de Fourier (FTIR-ATR). Les résultats obtenus à partir des différentes analyses effectuées sur les éléments autopsiés indiquent que la membrane en 1^{ère} position montre une forte présence d'encrassement. L'encrassement des membranes montre un mélange de dérivés protéiques liés au bio film, chlorure de sodium, fer, aluminosilicates et autres éléments couramment détectés sur l'encrassement des membranes d'osmose inverse des stations de dessalement d'eau de mer. En raison de la présence d'encrassement, la membrane en 1^{ère} position a montré un flux de perméat inférieur aux valeurs de référence. Considérant ces résultats, un prétraitement par désinfection des devrait être effectué afin d'éviter la présence des composants d'encrassement identifié lors de l'autopsie.

Mots clés : dessalement de l'eau de mer ; osmose inverse; membrane usagée; autopsie membranaire.

Abstract

In Algeria, as many other southern Mediterranean countries, the water's resources remain limited. Today there is an increasing demand of drinking water and water requirements for irrigation and industry. Therefore, if we consider the saline water potential along the 1600Km coast, using reverse osmosis R.O process, the seawater desalination has been promoted such as an efficient alternative to provide security for drinking water. However, scaling and fouling are the most serious problems in the efficient operation of reverse osmosis systems and may leads to a loss of membrane performance then the necessary to replace the membranes. Therefore, in order to prolong its life and reduce the costs of producing drinking water, it is necessary to study the phenomenon of wear of the membrane using chemical analysis and membrane autopsy to analyze reverse osmosis fouling elements. Our work investigates phenomenon of wear of the membrane of the Cap Djenet seawater desalination plant. We focus on reverse osmosis membrane autopsy including an exhaustive study of the surface of the membrane and of the food-rejection spacer. We carried out several techniques including a chemical and microbiological analysis of the deposit which covered the surface of the membrane, tests to determine chemical oxidation (Fujiwara test), Tests with Scanning Electron Microscopy (SEM) with elemental analysis by X-ray Dispersive Energy (EDX) to study the atomic composition of fouling and an analysis of Fourier Transform Infrared (FTIR-ATR). The results obtained from the different analyses carried out on the autopsied elements indicate that the membrane from 1st position shows a high presence of fouling. The fouling on membranes show mainly characteristics: a mixture of protein derivatives related to biofilm, sodium chloride, iron, aluminosilicates and other elements commonly detected on sea water membrane fouling were identified. Due to the presence of fouling, membrane from first position showed a lower permeate flux than reference values. Considering these results, a review of plant pre-treatment and disinfection should be carried out in order to avoid the presence of the fouling components identified during the autopsy.

Key Words: Seawater desalination; reverse osmosis; used membrane; membrane autopsy.

Liste des tableaux

Tableau 1. Répartition en volume et en pourcentage des différentes sources d'eau salée et d'eau douce présentes sur Terre.....	25
Tableau 2. Répartition de l'eau douce et salée sur la planète.....	25
Tableau 3. Pourcentage de la population ayant accès à l'eau potable.....	29
Tableau 4. Disponibilité en eau potable dans l'espace maghrébins (Djefflat, 2001).....	30
Tableau 5. Potentialités en eau superficielle de l'Algérie du Nord (PNE, 2010).....	33
Tableau 6. Potentialités en eau souterraine de l'Algérie du Nord (PNE, 2010).....	34
Tableau 7. Principaux sel dissous pour une eau de mer de salinité 35g/l.....	37
Tableau 8. Concentration des principales espèces présentes dans une eau de mer de salinité 35,000..	38
Tableau 9. Concentration moyenne des principaux éléments traces métalliques présents dans une eau de mer (Brown et al., 1997).....	39
Tableau 10. Composition de différentes eaux de mers en ions (ppm) (Maurel, 2006)	40
Tableau 11. Eléments nutritifs rencontrés dans l'eau de mer (Brown et al., 1997).....	41
Tableau 12. Concentration en sels des différentes mers (Maurel, 2006).....	44
Tableau 13. Salubrités des sels dans l'eau pure (18°C) en g/l.....	45
Tableau 14. Classification des eaux selon la conductivité (source : Rodier, 2005)	47
Tableau 15. Les normes de potabilité selon l'OMS (OMS, 2013)	48
Tableau 16. Normes de potabilité de principaux éléments de plusieurs pays	49
Tableau 17. Procédés de dessalement	59
Tableau 18. Pression osmotique de quelques solutions aqueuses en fonction de leur concentration....	70
Tableau 19. Classification des procédés membranaires selon le mode de transport (source : Pontié, 1996).....	76
Tableau 20. Comparaison entre différents types de modules à membranes.....	80
Tableau 21. Comparaison des différents types de modules membranaires	81
Tableau 22. Différentes géométries membranaires et quelques-unes de leurs caractéristiques	82
Tableau 23. Les substances typiques responsables du colmatage des membranes.	89
Tableau 24. Nature des dépôts et leur influence sur les paramètres de fonctionnement d'un osmoseur.	94
Tableau 25. Familles de composants utilisés pour le nettoyage de membranes, fonctions principales et risques associés.....	96
Tableau 26. Synthèse bibliographique succincte des principales études du prétraitement conventionnel avant OI d'eau de mer réelle.	99
Tableau 27. Synthèse bibliographique succincte des principales études du prétraitement avant OI d'eau de mer réelle par MF (PVDF : Polyfluorure de Vinylidène ; PES : Polyethersulfone).....	100
Tableau 28. Les différents types de colmatage et prétraitement appropriés.....	103
Tableau 29. Prétraitement de l'eau de mer avant osmose inverse.....	104
Tableau 30. Caractéristiques des pompes de captage d'eau de mer	118
Tableau 31. Caractéristiques des pompes à haute pression	125
Tableau 32. Caractéristiques des pompes d'eau produite.....	133
Tableau 33. Résumé des phases de prétraitement et post traitement au cours de la production d'eau potable par dessalement de l'eau de mer « OI » (PNUE, 2001).....	134
Tableau 34. Analyse de l'eau de la station cap djenet.....	136
Tableau 35. Caractéristiques principales en osmose inverse de la membrane SW30HRLE- 400 et recommandations d'utilisation fournies par le fabricant.	138
Tableau 36. Les cas les plus fréquents des valeurs comparatives de TA, TAC pour les eaux naturelles. (RODIER, 2009).	144
Tableau 37. Les concentrations des paramètres physico-chimiques des échantillons analysés de l'eau produite.....	156
Tableau 38. Les concentrations des différents paramètres chimiques.....	164

Tableau 39. Les concentrations des paramètres chimiques et physico-chimiques de AEI'eau de mer et de la saumure.....	170
Tableau 40. Résultats de l'inspection visuelle des membranes en 1 ^{ère} et 7 ^{ème} position.....	178
Tableau 41. Comptages microbiologiques obtenus à partir de la surface de la membrane.....	198
Tableau 42. Valeurs des paramètres de performance obtenus à partir de coupons de membranes autopsiées sur le banc d'essai plat.....	202
Tableau 43. Résumé des résultats des tests de nettoyage - échantillon de membrane en position 1 ...	203

Liste des figures

Figure 1 : Répartition de l'eau douce et salée sur la planète	25
Figure 2 : Pourcentage de disponibilité en eau par rapport à la population (source UNESCO)	26
Figure 3 : Pourcentage d'eau prélevée dans les différentes régions du monde par rapport au volume d'eau naturellement disponible (Source : EPE, 2008).....	26
Figure 4 : Évolution de l'offre et la demande d'eaux potables pour l'année 2005 et 2030.....	27
Figure 5 : Pourcentage de ménages dans les grandes villes du monde raccordés à l'eau et aux égouts	28
Figure 6 : Zones de pénuries d'eau physique et économiques (source : IWMO, 2006).....	28
Figure 7 : Localisation des grand bassins hydrographiques de l'Algérie (source : ABH)	31
Figure 8 : Evolution des ressources renouvelables en eau douce (2000-2009) (source : ABH)	32
Figure 9 : Utilisation de l'eau de mer dessalée en Espagne – Source : WWF, 2007	51
Figure 10 : Répartition du dessalement dans le monde (Source : Salomon, 2012).....	53
Figure 11 : Le dessalement à travers la méditerranée (source : Dunglas, 2014).....	54
Figure 12 : Capacité de dessalement installé en méditerranée (Boyé, 2008).....	55
Figure 13 : Répartition des stations de dessalement sur le littoral Algérien (Gasmî, 2016)	58
Figure 14 : Evolution de la capacité installée de systèmes de dessalement en Algérie entre 2006 et 2014 (WEX, 2013)	58
Figure 15 : Classification des procédés de dessalement (Al-Shayji, 1998).....	60
Figure 16 : Distillation à simple effet (technique de l'Ingénieur, 2010)	62
Figure 17 : Distillation à multiple effet	62
Figure 18 : Schéma de principe d'un système de Distillation par détente successives (MSF) (source : Technique de l'ingénieur, 2010).....	63
Figure 19 : Unité d'électrodialyse alimentée en parallèle	65
Figure 20 : Schéma du principe des phénomènes d'osmose directe et d'OI.....	69
Figure 21 : Osmose et osmose inverse	70
Figure 22 : Schéma d'un module spiralé (Techniques de l'Ingénieur, 2010).	72
Figure 23 : Schéma d'un module spiralé d'OI (Desclaux et Remigy, 2012-)	77
Figure 24 : Construction des feuilles qui forment un module d'OI (source : Cadotte et al., 1980)	78
Figure 25 : Coupe d'une feuille dans un module spiralé d'OI (source : Cadotte et al., 1980).....	78
Figure 26 : Accumulation des différentes matières sur, dans et au voisinage de la membrane lors d'un écoulement tangentiel (source : Mallevalle, 1996).....	86
Figure 27 : Prétraitement conventionnel (Source Kavitha, 2019).....	97
Figure 28 : Schéma général d'une installation de dessalement (source : Maurel, 2006)	100
Figure 29 : Conception moderne d'une installation de production d'eau purifiée pompage-le stockage et le tamisage	101
Figure 30 : Localisation de la station de dessalement Cap Djinet.....	114
Figure 31 : Situation géographique de la station	114
Figure 32 : Station de dessalement Cap Djinet.....	114
Figure 33 : Captage d'eau de mer.....	119
Figure 35 : Etape de prétraitement chimique.....	120
Figure 34 : Station de pompage de l'eau de mer	120
Figure 36 : Filtres à sable et anthracite.....	123
Figure 37 : Filtre à cartouche	124
Figure 38 : Pompe à haute pression.....	125
Figure 39 : Tubes de pression et Châssis d'osmose inverse.....	126
Figure 40: Installation avec échangeur de pression PX(www.BENISAFWATER.COM).....	127
Figure 41 : Emplacement des échangeurs de pression.....	128
Figure 42 : Constitution d'un système PX (www.BENISAFWATER.COM).	128

Figure 43 : Pompes BOOSTER.....	129
Figure 44 : Bâtiment de la saumure.....	131
Figure 45 : Stockage (a) et injection (b) des produits de prétraitement.....	131
Figure 46 : Lits de calcite.....	132
Figure 47 : Schéma de fonctionnement de la station de dessalement.....	135
Figure 48 : Structure chimique du polyamide aromatique d'une membrane OI composite comportant des groupements réticulés (fraction X) et linéaires (fraction Y) (Source : Kwon, 2008).....	137
Figure 49 : Structure chimique du polyamide aromatique d'une membrane OI composite comportant des groupements réticulés (fraction X) et linéaires (fraction Y) (Source : Kwon, 2008).....	138
Figure 50 : Coupe MEB d'une membrane d'osmose inverse composite (Source : Rapenne, 2006) ..	139
Figure 51 : Variations mensuelles de la teneur en Chlore libre.....	156
Figure 53 : Variations mensuelles du titre hydrotimétrique.....	157
Figure 52 : Variation du titre hydrotimétrique.....	157
Figure 55 : Variations mensuelles du Total des solides dissous.....	159
Figure 54 : Variations mensuelles de la teneur en Total des solides dissous.....	159
Figure 57 : Variations mensuelles du potentiel hydrogène.....	160
Figure 56 : Variations du potentiel hydrogène.....	160
Figure 58 : Variation de la température.....	161
Figure 59 : Variations mensuelles de la conductivité.....	161
Figure 60 : Variations mensuelles de la conductivité électrique.....	162
Figure 61 : Variations mensuelles de la teneur en CaCO ₃	162
Figure 63 : Variations mensuelles de la teneur en TA.....	163
Figure 62 : Variations mensuelles de la teneur en Magnesium.....	163
Figure 64 : Variations mensuelles de la teneur en TAC.....	164
Figure 66 : Variation mensuelle du bore.....	165
Figure 65 : Variations mensuelles de la teneur en Bore.....	165
Figure 68 : Variations mensuelles du chlorure.....	166
Figure 67 : Variations mensuelles de la teneur en Chlorure.....	166
Figure 70 : Variations mensuelles de la teneur en Nitrates.....	167
Figure 69 : Variations mensuelles de la teneur en Nitrites.....	167
Figure 71 : Variations mensuelles de la teneur en Sulfates.....	168
Figure 72 : Variations mensuelles de la teneur en Sodium.....	168
Figure 73 : Variations mensuelles de la teneur en Potassium.....	169
Figure 74 : Variations mensuelles de la teneur en Fer.....	169
Figure 75 : Variations mensuelles de la Température pour l'eau de mer et la saumure.....	171
Figure 76 : Variations mensuelles du TDS pour l'eau de mer et la saumure.....	172
Figure 77 : Variations mensuelles du TDS pour l'eau de mer et la saumure.....	172
Figure 78 : Variations mensuelles de la conductivité pour l'eau de mer et la saumure.....	173
Figure 79 : Variations mensuelles de la Température pour l'eau de mer et la saumure.....	173
Figure 80 : Variations mensuelles de la turbidité pour l'eau de mer et la saumure.....	174
Figure 81 : Variations mensuelles de fer pour l'eau de mer et la saumure.....	174
Figure 82 : Variations mensuelles de MES pour l'eau de mer et la saumure.....	175
Figure 83 : Variations mensuelles de Résidus sec à 180° C pour l'eau de mer et la saumure.....	175
Figure 84 : Résultats de l'inspection visuelle externe de la membrane en position 1.....	176
Figure 85 : Résultats de l'inspection visuelle externe de la membrane en position 7.....	177
Figure 86 : Inspection visuelle interne de la membrane en position 1 encrassée de la station de dessalement du cap Djenet.....	179
Figure 87 : Inspection visuelle interne de la membrane en position 7 encrassée de la station de dessalement du cap Djenet.....	180
Figure 88 : Résultats de la Loi obtenus à partir de l'encrassement de la membrane en Position 1.....	181

Figure 89 : SEM Microphotograph of membrane fouling; Microphotograph 1F- General view of fouling from membrane surface– General analysis: Spectrum 1F (a); Microphotograph 2F. Détail de l'encrassement de la membrane: Spectre 2F (b); Microphotographie 1 Vue générale des particules (c).	182
Figure 90 : SEM Microphotograph of membrane fouling; Microphotograph 1F- General view of fouling from membrane surface– General analysis: Spectrum 3F (a); Microphotograph 4F. Détail de l'encrassement de la membrane: Spectre 3F (a); Microphotographie 4F.	183
Figure 91 : Analyse générale de l'encrassement des membranes en position 1 (Spectre 1F).....	184
Figure 92 : Analyse de la zone 1 sur l'encrassement de la membrane en position 1 (Spectre 2F) et zone 2 sur l'encrassement de la membrane en position 1 (Spectre 3F).....	185
Figure 93 : Analyse de la particule 1 de l'alimentation de la membrane.....	186
Figure 94 : Analyse de la particule 2 (a) et 3 (b) de l'alimentation de la membrane.....	187
Figure 95 : Analyse générale de l'encrassement des membranes en position 7 (Spectre 4F).....	188
Figure 96 : Analyse de la zone 3 sur l'encrassement de la membrane en Position 7 (Spectre 2F) et zone 4 sur l'encrassement de la membrane en position 7 (Spectre 3F).....	188
Figure 97 : Microphotographie MEB de la surface de la membrane en position 1; Microphotographie. 1 Vue générale de la surface de la membrane (a) ; Microphotographie. 2 Détail de l'encrassement sur la zone 1 (b) ; Microphotographie. 3 Détail de l'encrassement sur la zone de support de l'espaceur (c) ; Microphotographie 4.- Détail de la surface de la membrane à fort grossissement sur la zone avec une fine couche organique (d).....	190
Figure 98 : Microphotographie MEB de la surface de la membrane en position 7 ; Microphotographie. 5 Vue générale de la surface de la membrane (a) ; Microphotographie. 6 Détail de l'encrassement sur la zone 1 (b) ; Microphotographie. 7 Détail de l'encrassement sur la zone de support de l'espaceur (c) ; Microphotographie 8- Détail de la surface de la membrane à fort grossissement sur la zone avec une fine couche organique (d).....	192
Figure 99 : Analyse générale EDS de la surface de la membrane en position 1.	193
Figure 100 : Analyse EDS de la zone 1 sur la surface de la membrane en position 1 (a) ; .Analyse EDS de la zone 2 sur la surface de la membrane en position 1 (b).....	194
Figure 101 : Analyse générale EDS de la surface de la membrane en position 7.	195
Figure 102 : Analyse EDS de la zone 1 sur la surface de la membrane en position 7 (a) ; Analyse EDS de la zone 2 sur la surface de la membrane en position 7 (b).....	195
Figure 103 : Test au bleu de méthylène de la membrane encrassée usagée	200
Figure 104 : Test de Fujiwara de la membrane encrassée utilisée	201
Figure 105 : Performances moyennes des membranes de flux de perméation.....	202
Figure 106 : Performance moyenne de rejet de sel des membranes.....	203
Figure 107 : Pourcentage de changements de flux obtenus à partir de la performance de différents nettoyeurs alcalins sur la membrane en position 1	203
Figure 108 : Comparaison du spectre IR de la membrane en position 1 (rouge) avec à un spectre caractéristique de polyamide polysulfone du même fabricant (bleu).....	205
Figure 109 : Analyse du spectre d'encrassement de la membrane en position 1 (rouge).....	205
Figure 110 : Comparaison du spectre IR de la membrane en position 7 (rouge) avec à un spectre caractéristique de polyamide polysulfone du même fabricant (bleu).....	206
Figure 111 : Analyse du spectre de la membrane en position 1	207
Figure 112 : Analyse du spectre de la membrane en position 7	208

Introduction

Introduction

Le manque d'eau est incontestablement l'un des problèmes majeurs du XXI^{ème} siècle auquel est confrontée l'humanité. La rareté de l'eau se fait de plus en plus sentir et devient sans doute l'un des défis majeurs de ce siècle. D'après le « Water Resources Institute », il existe déjà plus de 26 pays, qui commencent à souffrir du manque d'eau et d'ici 2032, ce chiffre dépassera la barre des 50 % de la population mondiale. Par ailleurs, le « Conseil Mondial de l'Eau », avait avancé que sur une population de 6 milliards d'habitants, 1 sur 4 n'accède pas à une eau de qualité et en quantité suffisante, qu'un habitant sur deux ne dispose pas d'un système d'assainissement adéquat et, chaque année, 7 millions de personnes meurent à cause des maladies d'origine hydrique. D'ici 2025, plus de la moitié de la population mondiale vivra dans des régions soumises au stress hydrique (Ercin et Hoekstra, 2014 ; Vörösmart et al., 2000). L'Afrique est la région la plus touchée par le manque d'eau, puis viennent l'Océanie, la Chine et l'Inde. Plus précisément, L'ONU estime qu'en 2025, 25 pays africains devraient souffrir de pénurie d'eau et de stress hydrique et si les tendances actuelles se maintiennent, on estime qu'à l'horizon 2030, la demande devrait dépasser l'offre de 40 %, autrement dit plus de 60 % de la population mondiale pourrait subir une pénurie d'eau (World Economic Forum, 2017).

En Algérie la mobilisation des ressources en eau depuis l'indépendance a été axée en premier lieu sur les ressources souterraines. L'accroissement rapide de la demande en eau dans les secteurs de l'irrigation, de l'industrie ainsi que les besoins de la population ont amené les pouvoirs publics à mobilisé de plus en plus des ressources superficielles. Mais la mobilisation des eaux souterraines au nord du pays a atteint son seuil maximal,

Pour faire face à cette pénurie d'eau on se tourne vers l'exploitation des ressources non conventionnelles : le dessalement se présente comme une alternative quand les ressources conventionnelles (cours d'eau, nappes phréatiques) viennent à être insuffisantes. La technique du dessalement d'eau de mer représente une ressource alternative qui apporte des réponses aux besoins en eau à court et à long terme, puisque 72% de la surface totale de la terre est recouverte d'eau, dont 97% est salée.

Plusieurs méthodes physiques permettent l'obtention de l'eau douce à partir l'eau de mer. Celles qui ont eu un grand succès à nos jours sont la distillation et l'osmose inverse. Ces deux techniques sont implémentées à l'échelle industrielle pour des grandes capacités de production et ont connu des développements technologiques considérables afin de les rendre plus compétitifs.

Les procédés les plus courants pour le dessalement de l'eau de mer sont la distillation et les séparations par membranes (Maurel, 2006; Pontie et al., 1998). Le choix de l'une de ces techniques est tributaire des coûts d'investissements et d'exploitations de ces stations et donc, du prix de revient du mètre cube produit.

Parmi les procédés de séparation membranaire, l'osmose inverse (OI) représente à l'heure actuelle 53 % des capacités mondiales d'eau produites par dessalement. Cette méthode est la plus rentable, la moins chère et de ce fait la plus envisageable pour subvenir aux besoins en eau potable futurs.

La membrane est le point clef des installations par osmose inverse, la séparation membranaire (ou osmose) présente un inconvénient connu : le **colmatage** de la membrane. Le principal problème récurrent intervenant lors de la mise en œuvre de l'OI est le colmatage des membranes, conséquence de l'accumulation de matière à sa surface. Les prétraitements permettent de limiter l'accumulation de particules, de sels et de matières organiques sur les membranes d'OI et le colmatage associé. Cependant, Ce colmatage des membranes diminue ses performances de filtration et rend nécessaire le recours à de fréquents nettoyages chimiques, qui peuvent accélérer le vieillissement des membranes et posent le problème du devenir des effluents de lavage. Ainsi, à l'usage, les membranes sont soumises, en l'absence de pré-traitement, à un colmatage accéléré ou, s'il y en a, induit une durée de vie des membranes qui n'excède alors pas trois ans. Or, le remplacement des membranes représente 5% du coût de traitement. Par conséquent, bien que cette technique ait connu un développement important, son essor est ralenti par les phénomènes intrinsèques aux techniques membranaires : coût élevé des membranes, polarisation de concentration et colmatage

A cet effet, nous nous sommes intéressés à l'un des aspects de ces phénomènes, à savoir : l'usure des membranes.

Dans le cadre de cette thèse, nous nous proposons d'étudier le phénomène d'usure de la membrane afin de prolonger sa durée de vie et donc réduire les coûts de production d'eau potable, économie qui se répercutera sur la facture du consommateur. L'objectif de ce travail a été d'étudier l'état de vieillissement d'une membrane usagée prélevée en Algérie sur une station de dessalement installée à Cap Djnet dans la Wilaya de Boumerdes.

La voie explorée ici est l'autopsie de la membrane usagée ne répondant plus aux critères de qualité pour la préparation d'une eau potable afin d'envisager une seconde vie de la membrane usée d'OI.

Cette thèse est organisée en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à la synthèse bibliographique sur le dessalement, la caractérisation des eaux de mer, la situation du dessalement en Algérie. Les différentes techniques de dessalement d'eau de mer. Nous avons achevé ce chapitre par une description détaillée du procédé de dessalement membranaire d'OI.

Le second chapitre de ce travail est dédié à l'étude expérimentale. Elle est composée de trois parties : la première présente la station de dessalement et ses caractéristiques, son emplacement, comment elle fonctionne, son objectif, la méthode sur laquelle elle se base dans le processus de dessalement ; la seconde est consacrée pour la description des matériaux à savoir le soluté étudié, la membrane analysée; la dernière expose le protocole suivi durant les travaux de thèse l'approche analytique mis en place pour analyser les membranes, le colmatage et les solutés.

Le troisième et dernier chapitre est consacré aux résultats expérimentaux et à leurs discussions.

Enfin, nous achevons ce travail par une conclusion générale, dans laquelle nous récapitulons les principaux résultats obtenus et les perspectives à prévoir dans le futur.

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE 1 : GENERALITES

CHAPITRE I: GENERALITES

Ce chapitre bibliographique présente tout d'abord quelques généralités sur les ressources en eau dans le monde et en Algérie. Dans un second temps, nous décrirons les caractéristiques et compositions des l'eau de mer ainsi que les principales techniques de dessalement des eaux de mer. Et pour finir, nous aborderons en détail le procédé de dessalement par OI ainsi que le fonctionnement d'une installation de dessalement.

I.1. RESSOURCES EN EAU

I.1.1. Situation de la ressource en eau dans le monde

Selon le Water Resources Institute, l'eau représente 1380 millions de km³. La surface de la terre est recouverte à 72% d'eau (Barhoumi et al., 2004)

Cependant 97,5 % du volume total se trouve sous forme d'eau salée (soit 1.365 milliards Km³), représentée par les océans et les mers, et le reste soit 2,5% du volume total d'eau sur la planète sous forme d'eau douce, soit environ 35 millions de km³ (Diop, 2003) (cf. table 1).

En revanche, cette eau se trouve en grande partie sous forme de glace ou de neige et d'eau courante ou souterraine environ. Cette eau est répartie sur les continents, localisée aussi dans les endroits inhabités ou sous de grande profondeur de sol. Ainsi, moins de 1% est disponible pour l'humanité, soit environ 9 millions de km³ dont la quasi-totalité de ce volume correspond aux eaux souterraines (Diop, 2003) (cf. figure ci-après).

Les tableaux 1 et 2 représentent la répartition en volume et en pourcentage des différentes sources d'eau salée et d'eau douce présentes sur terre et la répartition sur la planète.

Tableau 1. Répartition en volume et en pourcentage des différentes sources d'eau salée et d'eau douce présentes sur Terre

	Volume (10 ³ km ³)	Pourcentage de l'eau totale (%)	Pourcentage de l'eau douce (%)
Eau totale	1,386 millions	100	-
Eau douce totale	35 000	2,53	100
Océans mondiaux	1,340 millions	96,5	-
Eau salée souterraine	13 000	1	-
Eau douce souterraine	10 500	0,76	30
Glaciers antarctiques	21 600	1,56	61,7
Glaciers du Groenland	2 340	0,17	6,7
Îles arctiques	84	0,006	0,24
Glaciers montagneux	40,6	0,003	0,12
Pergélisol et glace souterraine	300	0,022	0,86
Lacs salins	85,4	0,006	-
Lacs d'eau douce	91	0,007	0,26
Humidité du sol	16,5	0,0012	0,047
Tourbières	11,5	0,0008	0,03
Rivières (flux moyen)	2,12	0,0002	0,006
Dans la matière biologique	1,12	0,0001	0,0003
Dans l'atmosphère (en moyenne)	12,9	0,0001	0,04

Tableau 2. Répartition de l'eau douce et salée sur la planète

Répartition de l'eau douce et salée sur la planète	Km ³	%
Eau douce	35	2,5
Eau salée	1 365	97,5
Volume total d'eau	1 400	100

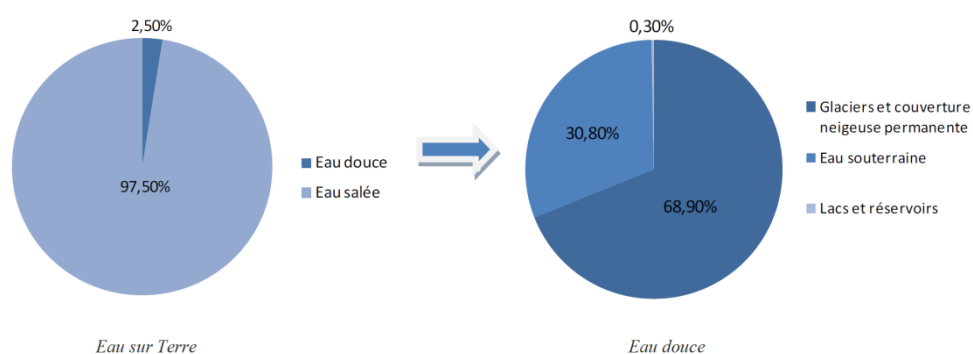


Figure 1 : Répartition de l'eau douce et salée sur la planète

I.1.2. Disponibilité de la ressource en eau dans le monde

La ressource en eau inégalement répartie dans le monde. En effet, on estime que les ressources en eau potable dans le monde sont de 40.000 milliards de m³ pour une population de 7 milliards de personnes

soit presque 6800 m³/habitant/an. Cette disponibilité varie d'un pays à un autre. Seulement 10% des pays possèdent 60% de la ressource, et la disponibilité connue par an et par personne varie de moins de 500 m³ à plus de 10 000 m³ selon les régions du monde.

Le coefficient de disponibilité en eau par rapport à la population par continents et le pourcentage d'eau prélevée dans les différentes régions du monde par rapport au volume d'eau naturellement disponible est cartographié dans les figures ci-dessous (AESN).

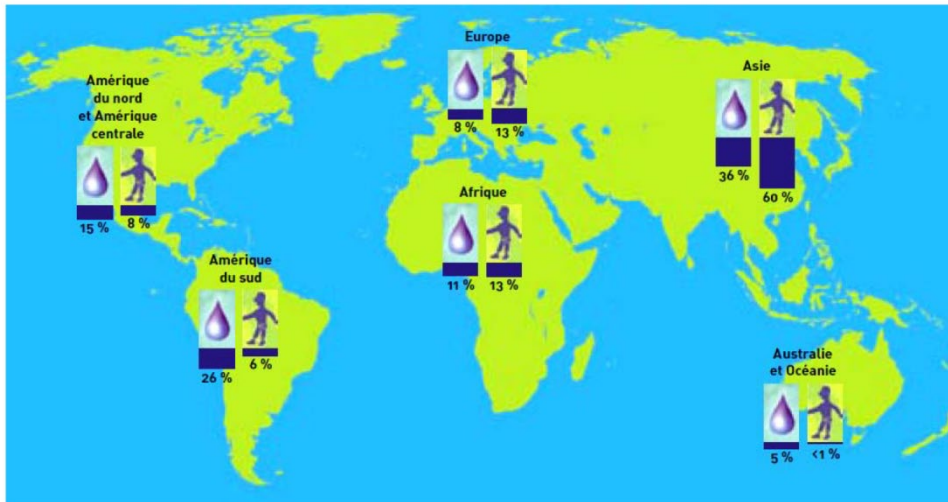


Figure 2 : Pourcentage de disponibilité en eau par rapport à la population (source UNESCO)

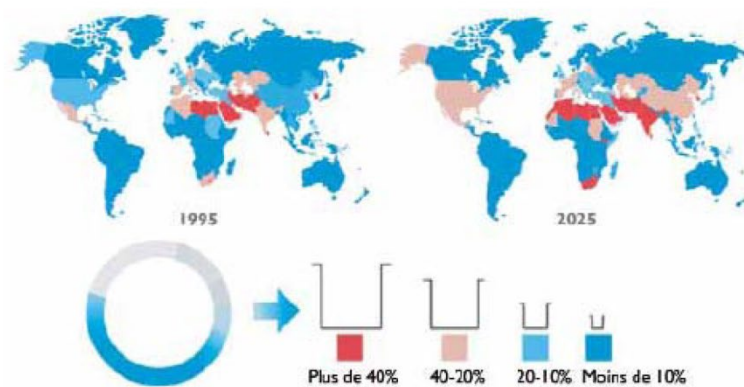


Figure 3 : Pourcentage d'eau prélevée dans les différentes régions du monde par rapport au volume d'eau naturellement disponible (Source : EPE, 2008)

La comparaison mondiale des coefficients de la disponibilité en eau par rapport à la population met en évidence les disparités entre les continents. Ainsi, les pressions exercées sur l'Asie qui abrite plus de la moitié de la population mondiale et ne possède que 36% des ressources en eau de la planète.

La figure ci-dessous décrit l'évolution de l'offre et la demande d'eaux potables pour l'année 2005 et 2030. Cette prévision met en évidence une insuffisance de l'offre en 2030 en raison de la demande croissante.

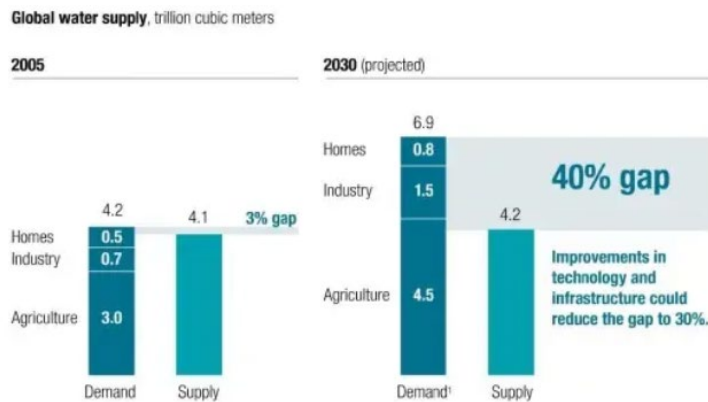


Figure 4 : Évolution de l'offre et la demande d'eaux potables pour l'année 2005 et 2030

I.1.3. Situation de stress hydrique et pénurie dans le monde

Par définition, un pays connaît un stress hydrique en deçà d'une ressource renouvelable en eau douce de 1 700m³ par an et par personne. Cependant, on considère que le développement économique et le bien-être individuel sont affectés négativement en deçà de 1 000 m³ par an et par personne (AESN).

La Banque mondiale a signalé que 90 pays connaissent maintenant des pénuries d'eau qui menacent la santé et l'économie. Plus de trois milliards de personnes, presque 50% de la population mondiale, n'ont pas accès à l'eau potable ni à l'assainissement. Plus de 1,1 milliard de personnes n'ont toujours pas accès à l'eau potable.

La figure ci-après montre le pourcentage de ménages raccordés à l'eau et aux égouts dans les grandes villes du monde. Une grande partie de ménages, même dans les grandes villes des pays en développement, n'ont pas accès aux égouts (Barlow et Gold, 2001 ; WWDR, 2016).

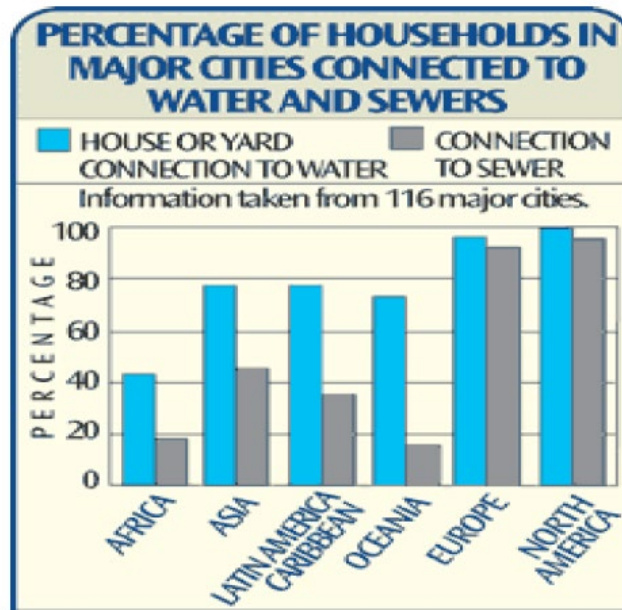


Figure 5 : Pourcentage de ménages dans les grandes villes du monde raccordés à l'eau et aux égouts

En ce qui concerne les prélèvements ramenés au nombre de population, environ 700 millions de personnes réparties dans 43 pays vivent en dessous du seuil de stress hydrique (EPE, 2008)

La figure ci-après montre la distribution mondiale de la pénurie d'eau physique et économique.

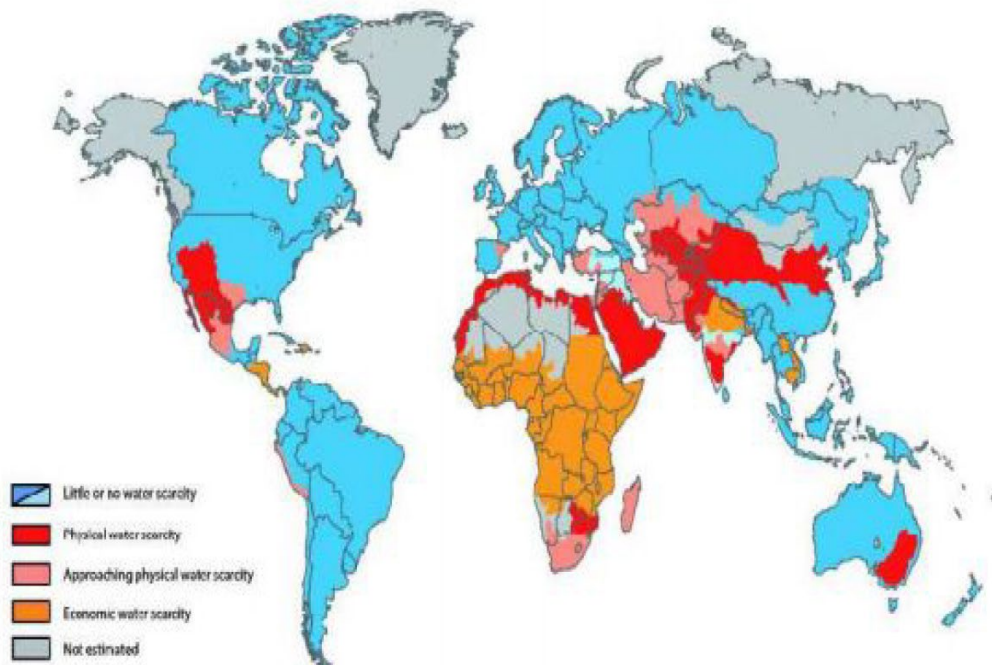


Figure 6 : Zones de pénuries d'eau physique et économiques (source : IWMO, 2006)

Le tableau 3 montre le pourcentage de la population ayant accès à l'eau potable. De nombreux pays arides et semi-arides sont confrontés à une pénurie d'eau due au manque de ressources naturelles, en particulier dans le monde arabe.

Tableau 3. Pourcentage de la population ayant accès à l'eau potable

	1990	2000		1990	2000	Asie du sud	1990	2000		1990	2000
Afrique sub-saharienne			Moyen orient et Afrique du nord						CEE/CIS		
Mauritanie	100	100	Cyprus	100	100	Maldives	-	100	Belarussie	-	100
Comores	88	96	Djibouti	-	100	Bangladesh	94	97	Bulgarie	-	100
Botswana	93	95	Liban	-	100	Pakistan	83	90	Slovaquie	-	100
Gabon	-	86	Egypte	94	97	Nepal	67	88	Hongrie	99	99
Afrique du Sud	86	86	Jordan	97	96	Regional average	72	85	Russie	-	99
Zimbabwe	78	83	Arabie Saoudite	-	95	Inde	68	84	Ukraine	-	98
Cote d'Ivoire	80	81	Iran	-	92	Sri Lanka	68	77	Yugoslavie	-	98
Burundi	69	78	Algerie	-	89	Bhutan	-	62	Albanie	-	97
Lesotho	-	78	Regional average	82	87	Afghanistan	-	13	Moldavie	-	92
Senegal	72	78	Palestinian Terr.	-	86				Kazakhstan	-	91
Namibie	72	77	Irak	-	85	Latin America/Caribbean			Regional average	-	91
Cape Verde	-	74	Maroc	75	80	Barbados	-	100	Ouzbekistan	-	85
Ghana	53	73	Syrie	-	80	Saint Lucia	-	98	Turquie	79	82
Centre Afrique	48	70	Tunisie	75	80	Uruguay	-	98	Georgie	-	79
Nigeria	53	62	Asie de l'est et Pacifique			Chile	90	93	Pays industriels		
Niger	53	59	Cook Islands	100	100	Belize	-	92	Andorre	-	100
Cameroon	51	58	S. Korea,	-	100	Guatemala	76	92	Australie	100	100
Kenya	45	57	Niue	100	100	Jamaïque	93	92	Autriche	100	100
Malawi	49	57	Singapore	100	100	Colombie	94	91	Canada	100	100
Mozambique	-	57	Tonga	-	100	Cuba	-	91	Denmark	-	100
Sierra Leone	-	57	Tuvalu	-	100	Panama	-	90	Finlande	100	100
Regional average	53	57	Samoa	-	99	Trinidad & Tobago	91	90	Malte	100	100
Guinea-Bissau	-	56	Coree	-	92	Honduras	83	88	Monaco	-	100
Togo	51	54	Vanuatu	-	88	Mexico	80	88	Hollande	100	100
Ouganda	45	52	Philippines	87	86	Brazil	83	87	Norvege	100	100
Congo	-	51	Thaïlande	80	84	Dominican Rep.	83	86	Slovenie	100	100
Guinee	45	48	Palau	-	79	Regional average	82	86	Suede	100	100
Madagascar	44	47	Indonesie	71	78	Ecuador	71	85	Suisse	100	100

Plusieurs facteurs causant la pénurie d'eau dans le monde ont été identifiés :

- ✓ Un accès insuffisant à l'eau potable pour environ 900 millions de personnes (WHO/UNICEF, 2008).
- ✓ Un accès insuffisant à l'eau domestique pour environ trois milliards de personnes (WHO-UNICEF, 2008).
- ✓ Le pompage excessif des eaux souterraines entraînant une baisse de rendement agricole dans le future (Christopherson, 2003).
- ✓ L'utilisation excessive et la pollution des ressources en eau nuisent à la biodiversité (Cunningham et al., 2003).
- ✓ Les maladies d'origine hydrique et pandémies (Cunningham et al., 2003).
- ✓ La sécheresse prolongée (Cunningham et al., 2003).
- ✓ Les dommages (dus aux inondations) à l'infrastructure existante qui cause la pénurie d'eau potable à court terme (Cunningham et al., 2003).

✓ Les conflits régionaux sur des ressources en eau rares entraînant parfois des guerres (Cunningham et al., 2003).

I.1.4. Ressources en eau en Algérie

Aujourd'hui dans le Maghreb, au vu de l'évolution des ressources en eau d'ici 2025, décrite dans le tableau ci-dessous, le plus grand défi est le développement des capacités pour l'exploitation et la gestion des ressources en eau, y compris en Algérie.

Tableau 4. Disponibilité en eau potable dans l'espace maghrébins (Djeflat, 2001)

	Population (million)		Précipitation (m ³)	Différentes sources d'eau			Disponibilité de l'eau (1000 m ³ /hab.)		Importance de la dégradation
	1990	2025		De surface	Souterraine	Total	1990	2025	
Algérie	24,96	51,95	63	12,4	6,7	19,10	00,76	00,36	47%
Maroc	25,04	45,65	150	22,5	7,5	30,0	1,19	0,65	55%
Tunisie	8,18	13,63	33	2,7	1,8	4,50	0,55	0,36	65%
Libye	4,55	12,84	-	0,20(*)	3,63	3,83	0,84	0,30	36%

En effet, l'Algérie se situe dans la catégorie des pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la banque mondiale à 1000 m³/habitant/an.

En 1962, la disponibilité en eau théorique par habitant et par an était de 1500m³, elle est de 720 m³ et 680 m³, 630 en 1990, 1995, 1998 respectivement (Nichane et Khellil, 2014).

La pluviométrie moyenne annuelle en Algérie du nord est évaluée entre 95 et 100.109 m³. Plus de 80.109 m³ s'évaporent, 3.109 m³ s'infiltrent et 12,5 109 s'écoulent dans les cours d'eau (Rapport d'investissement par pays Algérie, 2008).

Les ressources hydriques disponibles et mobilisables en Algérie sont réparties à travers cinq grands bassins hydrographiques, regroupant les 17 bassins versants. Cette répartition s'inscrit dans la politique de gestion de l'eau (ABH).

Durant la période 1993-1997, un plan National de l'Eau (PNE93) qui a concerné les 4 régions du Nord du territoire de l'Algérie a été réalisé par le groupement BETURE-CARL BRO-CES Salzgitter (PLE, 1997).

La figure ci-dessous décrit le découpage du territoire de l'Algérie en cinq régions en fonction des critères suivants :

- i) Les caractéristiques géographiques et naturelles des régions
- ii) Le groupement des bassins versants et sous bassins hydrographiques, entre lesquels existent des nécessités de transfert

Ces régions hydrographiques font l'objet d'études de planifications au cours de la dernière décennie.



Figure 7 : Localisation des grand bassins hydrographiques de l'Algérie (source : ABH)

Ainsi, nous distinguons les bassins suivants:

- Les bassins du nord :
 - Oranie Chott-Chergui,
 - Chelif -Zahrez,
 - Algerois - Hodna – Soummam,
 - Constantinois, Seybouse, Mellegue
- Le bassin du sud : Sahara - La région du Sahara détient 43% de la superficie totale des cinq régions dont 100 000 km² monopolisés par le bassin versant du Sahara.

La superficie totale des régions hydrographiques du pays est de 393 745 km² soit 16,5% de la superficie totale du pays. Comme le montre la figure ci-dessous, elle est répartie comme suit :

- Oranie Chott-Chergui 20% ;
- Cheliff - Zahrez 13% ;
- Algerois - Hodna - Soummam 13% ;
- Constantinois - Seybouse - Mellegue 11% ;
- Sahara 43%.

I.1.4.1 Ressource en eau potable

Il faut distinguer deux types de ressources d'eau potable, celles qui sont renouvelables et celles qui ne le sont pas.

I.1.4.1.1. Ressource superficielle

Les ressources en eau superficielle renouvelables internes totalisent environ 10 milliards de m³/an pour l'ensemble du pays dont le Sahara, bassin le plus important par la surface, ne renferme que 0,2 milliard de m³.

Dans l'Algérie du nord, l'apport principal vient du ruissellement. Les eaux de surface sont stockées dans les nappes (Rapport d'investissement par pays Algérie, 2008).

La répartition des ressources hydriques à travers le pays est fortement liée à la distribution pluviométrique qui se différencie d'Est en Ouest et du Nord au Sud.

L'Algérie, disposait, jusqu'en 2000, de 44 barrages en exploitation. La capacité théorique de cette mobilisation des eaux superficielles, avoisinait les 4.5 milliards de m³.

La figure ci-dessous décrit l'évolution des ressources renouvelables par rapport à la précipitation.

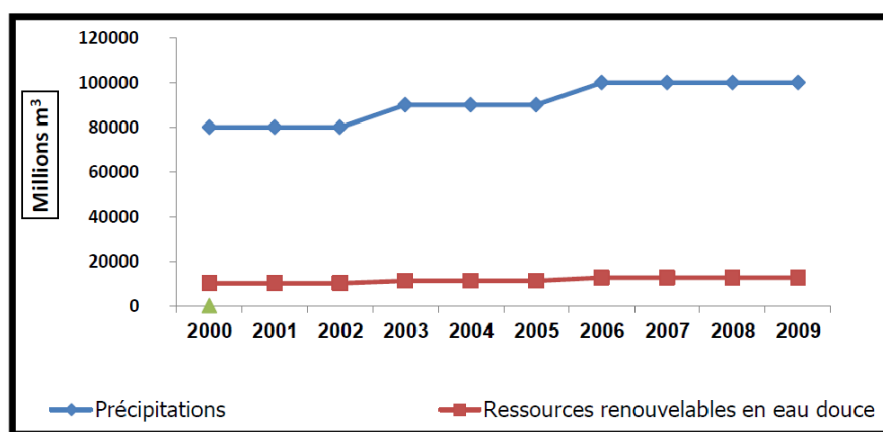


Figure 8 : Evolution des ressources renouvelables en eau douce (2000-2009) (source : ABH)

La figure ci-dessus représente l'évolution des ressources renouvelables par rapport à la précipitation.

La capacité réellement mobilisable n'excédait guère 2.5 milliards de m³ pour des raisons liées principalement à une sécheresse accrue et une irrégularité spatiale et temporelle des précipitations.

Sur la base d'une capacité de 3.4 milliards de m³ mobilisée par les eaux souterraines, les potentialités de mobilisation totales du pays atteignaient 5.9 milliards de m³, alors que les besoins réels étaient de 6.85 milliards de m³.

Malgré la construction de nouveaux barrages et le recours au dessalement, l'Algérie enregistrera un déficit en eau de 1 milliard de m³ d'ici l'an 2025 (Zhlana, 2001). La seule région qui semble échapper au déficit à cet horizon, est la région hydrographique du Constantinois – Seybouse - Mellègue. A titre d'exemple, le barrage de Beni Haroun permet de régulariser un volume de 432 millions de m³ (Remini.B, 2010).

En 2010, les potentialités en eau superficielle ont fait l'objet d'une évaluation hydrologique dans le cadre du PNE10. Le tableau ci-dessous décrit les potentialités en eau superficielle de l'Algérie du Nord.

Tableau 5. Potentialités en eau superficielle de l'Algérie du Nord (PNE, 2010)

Région Hydrographique	Superficie (km ²)	Apport moyen (Hm ³)
Oranie-Chott-Chergui	77 320.2	701.9
Cheliff-Zahrez	56 134.0	1 339.91
Algérois-Hodna-Soummam	47 296.9	3 358.8
Constantinois-Seybousse-Mellègue	43 887.4	4 908.7
Total Nord Algérie	224 638,5	10 309,31

I.1.4.1.2. Ressource souterraine

En Algérie les nappes sont alimentées essentiellement par les précipitations dont la répartition demeure irrégulière à la fois dans le temps et dans l'espace.

Dans les nappes du Nord du territoire de l'Algérie, Les ressources en eau souterraine sont estimées Après de 2 Milliards de m³/an, il existe 147 nappes aquifères, 9 000 sources, 23000forages et 60 000 puits (ONS, 2015). Dans le Sud, les ressources considérables en eau souterraine proviennent de 2 grands systèmes aquifères profonds : les nappes du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT).

Ces 2 grands systèmes aquifères profonds constituent des réserves importantes, non renouvelables et caractérisées par des contraintes physiques et géologiques (ABH).

Ainsi, un potentiel de 40 000 milliards de m³, 5 milliards peut être exploités annuellement et ce, sans impact sur la durabilité de ces nappes.

Cependant, au Nord algérien, ces vingt dernières années, l'intrusion des eaux marines au nord du pays est un phénomène qui a pris une ampleur à cause d'une part à de la sécheresse, et d'autre part, des pompages excessifs et anarchiques.

Sur la base les dernières connaissances, le PNE10 a entrepris une évaluation des ressources en eau souterraine de l'Algérie. Le tableau ci-dessous décrit les potentialités en eau souterraine analysé sous deux scénarii : une année moyenne et une année sèche.

Tableau 6. Potentialités en eau souterraine de l'Algérie du Nord (PNE, 2010)

Région Hydrographique	Ressources renouvelables utilisables (Hm ³ /an)	
	Période moyenne	Période sèche
Oranie-Chott-Chergui	631,6	379
Chelif-Zahrez	454,3	273
Algérois-Hodna-Soummam	1 308,6	785
Constantinois-Seybousse-Mellègue	873	524
Total Nord Algérie	3 267,5	1 961

I.1.4.2. Ressources en eau non conventionnelles

La mobilisation des ressources en eau non conventionnelles repose sur trois techniques à savoir :

1. Le dessalement de l'eau de mer ;
2. La déminéralisation des eaux saumâtres (souterraines et superficielles) ;
3. La réutilisation des eaux usées épurées.

I.1.4.2.1. Les eaux saumâtres (souterraines et superficielles)

La déminéralisation des eaux saumâtres se fait dans les Hauts Plateaux et le Sud. Les stations situées dans le sud de l'Algérie et dont le débit de traitement est relativement faible (entre 100 et 200 m³/j) sont exploitées par les collectivités locales et la SONELGAZ.

I.1.4.2.2. Les eaux usées épurées

En 1994 les réseaux d'assainissement totaliseraient 1 7000 km. Le volume d'eaux usées rejetées à l'échelle nationale est estimé actuellement à près de 750 millions de m³. Une cinquantaine de stations d'épuration ont été réalisées en Algérie avec une capacité de traitement d'environ 4 millions équivalents habitants.

La capacité totale installée dans les stations d'épuration est de 925 millions de m³/an, une partie de ces eaux est réutilisée dans le domaine d'irrigation, la superficie totale dans le pays irriguée est de 12 000 ha.

I.1.4.2.3. Les eaux de mer

En matière de mobilisation des ressources en eau non conventionnelles et pour faire face aux besoins sans cesse grandissants de la population en eau potable, l'Algérie s'est orientée vers les stations de dessalement de l'eau de mer.

Ce programme stratégique est destiné à se libérer de la dépendance de la pluviométrie, et notamment dans l'ouest du pays qui souffre d'un grave déficit chronique en pluviométrie.

I.2. CARACTERISTIQUES DES EAUX MARINES

I.2.1. Composition de l'eau de mer

I.2.1.1. Composition minérale de l'eau de mer

Les eaux de mer sont caractérisées par une grande salinité ; c'est-à-dire une teneur globale en sels (chlorures de sodium et de magnésium, calcium, sulfates et carbonates), et par un milieu légèrement basique avec un pH moyen variant entre 7,5 et 8,3 (Edzwald et Haarhoff, 2011). L'eau de mer est composée d'eau et de sels, ainsi que de diverses substances en faible quantité. Si plus des deux tiers des 92 éléments chimiques naturels sont présents dans l'eau de mer, la plupart le sont en faible quantité et difficilement décelables.

L'eau de mer est composée d'eau et de sels. Les eaux de mer contiennent des substances dissoutes (sels) dont les ions majeurs sont principalement Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- et HCO_3^- .

Les premières théories scientifiques sur l'origine du sel de la mer datent d'Edmond Halley qui propose en 1715 que le sel et les autres minéraux y sont amenés par les rivières: l'écoulement de l'eau en surface (eau de pluie) et dans les rivières dissout des ions par dissolution des roches. Les eaux douces souterraines et de surface sont donc très légèrement « salées » à cause de ces ions ; ceux-ci sont entraînés jusqu'à l'océan, où ils restent tandis que l'évaporation entraîne leur concentration (voir le cycle de l'eau). Halley note que les quelques lacs qui ne débouchent pas sur un océan (comme la mer Morte et la mer Caspienne, voir Endoréisme) ont en général une salinité très élevée, ce qu'il appelle la « météorisation continentale » (continental weathering).

Le tableau ci-dessous décrit les principaux sels dissous pour une eau de mer de salinité 35 g/l (Bakalowicz, 1999).

Tableau 7. Principaux sel dissous pour une eau de mer de salinité 35g/l

Principaux sels dissous pour une eau de mer de salinité 35 g/l		
Anions	g/kg	mol/kg
Chlorure (Cl ⁻)	19,3524	0,54586
Sulfate (SO ₄ ²⁻)	2,7123	0,02824
Hydrogénocarbonate (HCO ₃ ⁻)	0,1080	0,001770
Bromure (Br ⁻)	0,0673	0,000842
Carbonate (CO ₃ ²⁻)	0,0156	0,000260
Fluorure (F ⁻)	0,0013	6,84E ⁻⁵
Hydroxyde (HO ⁻)	0,0002	1,2E ⁻³
Cations	g/kg	mol/kg
Ion sodium (Na ⁺)	10,7837	0,46907
Ion magnésium (Mg ²⁺)	1,2837	0,05282
Ion calcium (Ca ²⁺)	0,4121	0,01028
Ion potassium (K ⁺)	0,3991	0,01021
Ion strontium (Sr ²⁺)	0,0079	9,02E ⁻⁵
Ion lithium (Li ⁺)	1,73E ⁻⁴	2,49E ⁻⁵
Ion rubidium (Rb ⁺)	1,20E ⁻⁴	1,404E ⁻⁶
Ion baryum (Ba ²⁺)	2,0E ⁻⁵	1,46E ⁻⁷
Ions poly atomiques dont molybdène	1,0E ⁻⁵	1,04E ⁻⁷

En pratique, seuls les constituants majeurs qui sont présents en concentration supérieure à 1 mg.kg⁻¹ sont retenus. Le tableau ci-dessous décrit les concentrations des principales espèces présentes dans une eau de mer. Ainsi, la masse totale des espèces prises en compte atteint environ 35,15 g.kg⁻¹.

Tableau 8. Concentration des principales espèces présentes dans une eau de mer de salinité 35,000

Tableau 1 – Concentration des principales espèces présentes dans une eau de mer de salinité 35,000, d'après [1]		
Espèces	Concentrations (1)	
	(g·(kg-sln) ⁻¹)	(mol·(kg-sln) ⁻¹)
Ion sodium Na ⁺	10,77	0,4685
Ion magnésium Mg ²⁺	1,290	0,05308
Ion calcium Ca ²⁺	0,4121	0,01028
Ion potassium K ⁺	0,399	0,01021
Ion strontium Sr ²⁺	0,0079	0,000090
Bore total B(OH) ₃ + B(OH) ₄ ⁻	0,0045	0,00042
Ion chlorure Cl ⁻	19,354	0,54591
Ion sulfate SO ₄ ²⁻	2,712	0,02823
Hydrogénocarbonate HCO ₃ ⁻ + carbonate CO ₃ ²⁻	0,118 à 0,146	0,00194 à 0,00240
Ion bromure Br ⁻	0,0673	0,000842
Ion fluorure F ⁻	0,0013	0,00007

(1) Les concentrations se rapportent au kg de solution (kg-sln), autrement dit au kg d'eau de mer (eau + sels dissous).

Divers autres ions y sont présents à de plus faibles concentrations ainsi que de diverses substances en faible quantité. De nombreux autres éléments sont présents à l'état de trace (moins de 0,1 ppm), comme par exemple l'ion baryum Ba²⁺ ou l'iode I⁻. Certains ions métalliques sont également rencontrés dans l'eau de mer avec une concentration d'environ une partie par billion (10-3 mg/kg) en masse, ou moins : titane, zinc, nickel, aluminium, chrome, cadmium, cuivre, fer, manganèse, plomb, mercure (Brown et al., 1997)

Tableau 9. Concentration moyenne des principaux éléments traces métalliques présents dans une eau de mer (Brown et al., 1997)

Constituants	Concentrations (10^{-3} mg/kg)
Titane, (Ti)	1
Zinc, (Zn)	0,5
Nickel, (Ni)	0,48
Aluminium, (Al)	0,4
Cadmium, (Cd)	0,1
Cuivre, (Cu)	0,1
Fer, (Fe)	0,055
Manganèse, (Mn)	0,03
Plomb, (Pb)	0,002
Mercuré, (Hg)	0,001

Par contre, les proportions relatives des principaux sels restent constantes. Cette propriété est évoquée sous l'appellation de *loi de Dittmar*.

La grande particularité de l'eau de mer est que les proportions relatives de ses constituants sont sensiblement constantes ; (c'est-à-dire indépendantes de la salinité) ; cette propriété a été établie par le chimiste allemand William Dittmar. Elle permet de considérer l'eau de mer comme une solution de onze constituants majeurs dans de l'eau pure, à savoir, par ordre décroissant d'importance, le chlorure, l'ion sodium, le sulfate, l'ion magnésium, l'ion calcium, l'ion potassium, le bicarbonate, le bromure, l'acide borique, le carbonate et le fluorure.

Cependant, la masse totale des sels dissous dans 1 kg d'eau de mer peut varier d'une eau de mer à une autre (plus de 40 g/kg d'eau de mer, en mer Rouge, moins de 10 g/kg en certaines régions de la mer Baltique).

Table ci-dessous décrit la composition des différentes eaux de mers en ions

Tableau 10. Composition de différentes eaux de mers en ions (ppm) (Maurel, 2006)

	Concentration en ppm	Eau de mer standard	Mer Méditerranée	Golfe Arabique
Cations	Concentration totale	35 000	39 000	45 000
	Sodium Na ⁺	10 760	11 973	13 830
	Magnésium Mg ²⁺	1 294	1 443	1 660
	Calcium Ca ²⁺	412	468	530
	Potassium K ⁺	387	429	497
Anions	Chlorures Cl ⁻	19 353	21 567	24 900
	Sulfates SO ₄ ²⁻	2 712	3 003	3 500
	Bicarbonates HCO ₃ ⁻	142	156	182
	Bromures Br ⁻	67	78	86

I.2.1.2. Composition organique de l'eau de mer

L'océan constitue le réservoir principal du carbone organique sur terre. Il contient environ 1012T de carbone (Hedges, 1992) La majeure partie de ce carbone organique des océans se trouve sous forme dissoute (COD : Carbone Organique Dissous) à plus de 90% et principalement de molécules à faible poids moléculaire et l'autre partie est dite sous forme particulaire (COP :Carbone Organique Particulaire) (Benner et al., 1997).

La fraction particulaire est définie comme la fraction retenue sur une membrane ayant des pores de diamètre de 0,2 à 1,0 µm.

Pour les océans ouverts, le COT et le COD sont souvent équivalents.

La matière organique dissoute (COP) de l'eau de mer a pour origine l'activité biologique planctonique (l'activité biologique des matières organiques vivantes), les apports continentaux par les fleuves et l'activité humaine et les apports atmosphériques.

Dans l'eau de mer de surface, la concentration en COD est souvent comprise entre 0,5 et 4 mg.L-1, mais peut atteindre 20 mg.L-1 pour certaines eaux côtières.

Pour les océans ouverts, la concentration est d'environ d'1 mg.L-1 (Méricq, 2009).

I.2.1.3. Composition en gaz dissous de l'eau de mer

Les gaz dissous comprennent principalement : 64 % d'azote, 34 % d'oxygène, 1,8 % de dioxyde de carbone (soit 60 fois la proportion de ce gaz dans l'atmosphère terrestre).

I.2.1.3. Élément nutritifs

L'eau de mer contient aussi certains éléments nutritifs, que les phytoplanctons utilisent pour produire de la matière organique par photosynthèse. Ces éléments, en dehors du carbone, sont principalement le phosphore, l'azote inorganique et le silicium dont les différentes formes sont décrites dans le Tableau ci-dessous.

Tableau 11. Éléments nutritifs rencontrés dans l'eau de mer (Brown et al., 1997)

Élément	Forme	Localisation ou proportion	Concentration (µmol/L)
Phosphore	HPO ₄ ²⁻	90%	1
	PO ₄ ³⁻	10%	1
Azote inorganique	N ₂ (gaz dissous)	Majoritaire	---
	NO ₃ ⁻	Zones oxygénées	Quelques dizaines
	NO ₂ ⁻	Zones anoxiques	0,1 – 2
	NH ₄ ⁺	Zones oxygénées et anoxiques	5 – 100
Silicium	Si(OH) ₄	Principalement régions volcaniques et en surface (coquilles d'organismes)	25 – 550

I.2.2. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer

Les différentes propriétés de l'eau de mer dépendent de sa température, de sa salinité et de sa pression. Elles peuvent être fortement variables d'un endroit à l'autre en raison des fortes variations de salinité, de température et de profondeur.

Ces différentes caractéristiques sont décrites ci-dessous.

I.2.2.1. La salinité

I.2.2.1.1. Notions de salinité

C'est le caractère essentiel de l'eau de mer. La salinité mesure la teneur globale en sels dissous (chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates). La présence de sel dans l'eau peut modifier certaines de ses propriétés telles que la densité, la compressibilité, le point de congélation, la température du maximum de densité. Cependant, d'autres propriétés ne sont pas influencées significativement telles que : comme la viscosité, l'absorption de la lumière.

I.2.2.1.2. Définition théorique de la salinité

Dans sa première définition, donnée en 1902, la salinité, symbole S, désignait la masse totale des sels dissous par kilogramme d'eau de mer. La salinité est la quantité totale des résidus solides (en grammes) contenu dans 1 kg d'eau de mer.

La loi de Dittmar permet ainsi de déterminer la salinité de l'eau de mer par une seule mesure : de la concentration d'un de ces constituants (par exemple, Cl^-) ou d'une des propriétés physiques de l'eau de mer à une température donnée (comme la densité relative, l'indice de réfraction ou la conductivité).

Les deux principaux ions sont Na^+ et Cl^- , qui en s'associant forment le chlorure de sodium principal constituant du « sel marin ».

I.2.2.1.3. La mesure de la salinité

La salinité est difficilement estimable, puisqu'elle n'est pas à proprement dit mesurable, par analyse chimique directe : chimique directe (séchage et pesée du résidu solide), car certains corps présents, notamment les chlorures, s'échappent au cours du dernier stade de séchage.

On utilise le fait que, dans l'eau de mer, les proportions relatives des principaux constituants sont pratiquement constantes. Le dosage de l'un d'entre eux est donc susceptible de donner la teneur de tous les autres, ainsi que la salinité. Les ions ; chlore, brome et iode peuvent aisément être dosés, avec précision, par titrage au nitrate d'argent.

Sachant que les proportions des constituants principaux de l'eau de mer sont quasiment constantes, le seul dosage de l'un d'entre eux permet de déduire la teneur de tous les autres, et une évaluation de la salinité.

La salinité est depuis 1978 officiellement mesurée à partir de la conductivité électrique de l'eau à une certaine température et pression.

La salinité (S) d'un échantillon d'eau est donnée par le rapport K de la conductivité électrique de cet échantillon d'eau de mer à 15 C et à la pression atmosphérique normale, avec la conductivité d'une solution de chlorure de potassium (KCl) dans laquelle la fraction en masse de KCl est 0,0324356, à la même température et même pression. Si ce rapport K est égal à 1 on dit que la salinité est de 35.

La salinité s'exprime sans unité, mais on trouve encore des salinités exprimées en ‰, en g/kg ou en psu (practical salinity unit).

Elle était exprimée en g/kg ou ‰ (1 kg d'eau de mer de salinité 35,000 ‰ devrait contenir 35,000 g de sel pour 965,000 g d'eau pure).

I.2.2.1.4. Variation de la salinité

La salinité peut être différente d'une mer à une autre, en l'occurrence dans le cas de mers fermées. La salinité moyenne des eaux des mers et océans est de 35 g.L⁻¹ (27,2 g.L⁻¹ de NaCl, 3,8 g.L⁻¹ de MgCl₂, 1,7 g.L⁻¹ MgSO₄, 1,26 g.L⁻¹ CaSO₄, 0,86 g.L⁻¹ K₂SO₄).

Les salinités les plus basses se rencontrent au voisinage des pôles ou dans les zones de fort apport d'eau douce. La salinité augmente au fur et à mesure que l'on se rapproche des tropiques. Dans certaines zones telles que l'Arabie Saoudite, elle peut dépasser 45g/l.

La concentration en sels des mers ouvertes sur les masses océaniques est de l'ordre de 35 g.kg⁻¹. Elle reste assez constante pour les mers ouvertes mais elle peut varier considérablement pour les mers fermées selon la position géographique et la saison. Pour les autres mers, les concentrations sont très différentes. Le Tableau ci-après présente les principaux exemples.

Tableau 12. Concentration en sels des différentes mers (Maurel, 2006)

Mer	Concentration (g.kg ⁻¹)
Mer Baltique	7
Mer Caspienne	13
Mer Noire	20
Mer Méditerranée	36 à 39
Mer Rouge	40
Golfe Arabique	40 à 70
Mer Morte	270

I.2.2.2. La Densité

La densité est le rapport entre la masse volumique de l'eau de mer à celle de l'eau distillée à une température de 4°C. La densité des eaux de mer varie avec la salinité, la température et la pression. La densité des océans est en moyenne de l'ordre de 1,035 à 1,036. La densité est mesurée par le densimètre ou hydromètre à flotteur.

I.2.2.3. Solubilité

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

Tableau ci-dessous décrit les solubilités des sels dans l'eau pure (18°C) en g/l. On peut noter que le sel les plus solubles sont :

- i) Les sels de Sodium Cl, SO₄, NO₃, et F
- ii) Les Nitrates Na, Ca, Mg, K, Ba et Sr

Alors que les seuls qui ont une solubilité très limitée sont :

- i) Les sels de Calcium et Strontium SO₄, CO₃, et du F
- ii) Les carbonates

Tableau 13. Salubrités des sels dans l'eau pure (18°C) en g/l

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

I.2.2.4. La température :

L'eau de mer est, en général, plus ou moins froide suivant la latitude. L'eau de mer peut être chaude à l'Équateur (26°C en surface dans l'océan, plus de 30°C dans les mers intérieures l'été) et froide aux pôles (1 à 3°C) en surface. L'océan Indien à latitude égale est plus chaud que l'Atlantique.

Cependant, à la même latitude dans un même océan les températures sont différentes.

Dans l'hémisphère Sud le phénomène est inverse : ce sont les façades Ouest des continents qui sont plus froides que les côtes Est.

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

Ainsi, les échanges thermiques entre la surface de l'eau de mer et l'atmosphère sont très importants. Les océans se réchauffent moins vite et se refroidissent moins vite également que la terre.

I.2.2.5. Potentiel d'hydrogène « pH »

L'eau naturelle pure est neutre. Le pH d'une eau représente son acidité ou alcalinité. C'est le paramètre le plus important de la qualité de l'eau.

L'eau de mer faiblement alcaline et son PH moyen est de 8,2 avec des variations entre 7 et 8,4. Cependant, dans certaines conditions le PH peut prendre des valeurs particulières. Notamment dans les bassins isolés. Le PH peut approcher des valeurs voisines de 7 ou tomber à des valeurs nettement plus acides.

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

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

I.2.2.6. Dureté

La première définition de la dureté de l'eau était sa capacité de transformer le savon en un composé insoluble. Aujourd'hui, la dureté de l'eau est calculée en mesurant la quantité d'ions calcium, magnésium, aluminium, fer, strontium, etc. présents dans l'eau. Ainsi, la dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en cations métalliques, excepté celles des métaux alcalins (Na⁺, K⁺) et H⁺.

Cependant, étant donné que le calcium est un des ions les plus abondants, il devient donc un bon indicateur de la dureté de l'eau.

On exprime la dureté selon la quantité de trioxycarbonate de calcium (CaCO₃, communément appelé le carbonate de calcium) présente dans une solution (mesuré en mg de CaCO₃ par litre). Cette quantité est exprimée en mg/L ou en ppm.

Ainsi, on peut déterminer dans l'eau :

- La dureté totale ou titre hydrotimétrique TH qui est la somme des concentrations calcique et magnésienne ;
- La dureté calcique qui correspond à la teneur globale en sels de calcium ;
- La dureté magnésienne qui correspond à la teneur globale en sels de magnésium.

La dureté carbonatée correspond à la teneur en hydrogénocarbonate et carbonate de calcium et de magnésium.

I.2.2.7. La teneur des matières en suspension (MeS)

Les matières en suspension, représentent les matières qui ne sont ni à l'état soluble ni à l'état colloïdal, autrement dit : l'ensemble des particules minérales et organiques contenues dans les eaux. Les matières en suspension, qui comportent des matières organiques et minérales, constituent un paramètre important qui marque bien le degré de pollution de l'eau (Satin et Selmi, 1999).

Elles varient en fonction des courants et la profondeur des fonds, la nature des terrains traversés, de la saison, de la pluviométrie, du régime d'écoulement des eaux, de la nature des rejets, etc

Les teneurs élevées en matières en suspension peuvent être considérées comme une forme de pollution (Rodier, 2005).

I.2.2.8. Conductivité électrique

La conductivité donne une idée de la minéralisation d'une eau et est à ce titre un bon marqueur de l'origine d'une eau. Théoriquement, la conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques (Platine) de 1 cm² de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm (Rodier, 2005). La conductivité s'exprime en micro siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (Guajour, 1995).

La conductivité de l'eau de mer varie également en fonction de la température de l'eau, et proportionnelle à la minéralisation (Mens et Derouane, 2000).

Le tableau ci-dessous décrit une classification des eaux selon la conductivité.

Tableau 14. Classification des eaux selon la conductivité (source : Rodier, 2005)

Type d'eaux	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{Cm}$)	Résistivité
Eau pure	< 23	> 30000
Eau douce peu minéralisée	100 à 200	5000 à 10000
Eau de minéralisation moyenne	250 à 500	2000 à 40000
Eau très minéralisée	1000 à 2500	400 à 1000

I.2.2.8. Autres caractéristiques

La turbidité

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

Solubilité des gaz dans l'eau-

L'eau contient toujours des gaz dissous dont les concentrations dépendent notamment de la température ainsi que de la composition et de la pression de l'atmosphère gazeux avec laquelle elle est en contact.

La loi de HENRY appliquée à la solubilité des gaz dans l'eau pure, prévoit que, la concentration dissoute d'un composé gazeux dans l'eau est directement proportionnelle à la pression partielle de ce composé dans la phase gazeuse au contact de l'eau (Rodier, 2009).

I.2.3. Caractéristique et normes de potabilité sur les principaux éléments d'une eau potable

En vue de notre objet d'étude, notamment, le dessalement de l'eau de mer pour approvisionner les populations en eau potable, il convient de s'intéresser particulièrement aux caractéristiques d'une eau potable. Une eau potable est une eau qui peut être bue sans aucun danger pour la santé humaine. Pour l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) les critères de potabilité d'une eau donnée sont classés selon :

- l'aspect physique : température, limpidité, odeur, teneur en matières en suspension (MeS) ;
- les caractéristiques chimiques : salinité, chlorures, pH etc.

Ainsi, dans une eau de mer, la salinité doit être inférieure ou égale à 1000 mg/l et les chlorures inférieurs ou égaux à 250 mg/l. Même si la salinité demeure le facteur le plus important, dans certains cas les teneurs en Bore (B), en Bromure (Br) et en métaux lourds tels le mercure (Hg) et le plomb (Pb) dépassent les limites autorisées par les normes.

Tableau 15. Les normes de potabilité selon l'OMS (OMS, 2013)

Elément/substance	Symbole /formule	Lignes directrices fixées par l'OMS
Turbidité	-	Non mentionnée
Dureté	mg/l CaCO ₃	200 ppm
TDS (total des solides dissous)	-	Pas de valeur guide mais optimum en dessous de 1000 mg/l
pH	-	Pas de valeur guide mais un optimum entre 6.5 et 9.5
Aluminium	Al	0,2 mg/l
Ammonium	NH ⁴⁺	Pas de contraintes
Antimoine	Sb	0.02 mg/l
Arsenic	As	0,01 mg/l

Ces normes sont variables d'un pays à un autre. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) définit régulièrement des préconisations sur la qualité de l'eau potable, sur lesquelles les différents pays s'appuient pour l'élaboration de standards nationaux en matière de réglementation sur les eaux destinées à la consommation humaine (cf. tableau ci-dessous).

Tableau 16. Normes de potabilité de principaux éléments de plusieurs pays

Paramètres	Recommandation OMS (WHO, 2011)	MAROC (SNIMA, 2006)	ESPAGNE (Ministerio Presi., 2003)	ABU DHABI (The Reg. Sup. Bur. Wat. 2014)
Turbidité (NTU)	5	5	5	4
pH	6,5<pH<8,5	6,5<pH<8,5	6,5<pH<9,5	7,0<pH<9,2
TDS (mg.L ⁻¹)	10 ³	-	-	10 ² <TDS<10 ³
Conductivité (µS.cm ⁻¹) 20°C	-	2700	2500	-
Sodium (mg.L ⁻¹)	200	-	200	150
Chlorure (mg.L ⁻¹)	250	750	250	250
Aluminium (mg.L ⁻¹)	-	0,2	0,2	0,2
Fer (mg.L ⁻¹)	2,0	0,3	0,2	0,2
Cuivre (mg.L ⁻¹)	2,0	2,0	2,0	1,0
Manganèse (mg.L ⁻¹)	0,4	0,5	0,05	0,4
Sulfates (mg.L ⁻¹)	500	400	250	250
Bore (mg.L ⁻¹)	2,4	0,3	1,0	2,4
Chlore résiduel (mg.L ⁻¹)	0,5<Cl ₂ <5,0	0,5<Cl ₂ <1,0	1,0	0,2<Cl ₂ <0,5

Le tableau ci-dessus décrit les recommandations de l'OMS et les standards de trois pays sujets à de fortes chaleurs et à de nombreuses pénuries d'eau : le Maroc, pays côtier nord africain bordé par l'Océan Atlantique et la Mer Méditerranée ; l'Espagne, péninsule du sud de l'Europe bordée par la Mer Méditerranée et l'Océan Atlantique et Abu Dhabi faisant partie de l'Etat des Emirats Arabes Unis, pays de la péninsule arabique bordé du Golfe Persique et du Golfe d'Oman.

La comparaison du tableau décrivant la composition d'une eau de mer avec le tableau ci-dessus met en évidence a nécessité d'un traitement de l'eau de mer avant son utilisation pour la potabilisation. La comparaison des quantités en ions sodium et chlorures entre l'eau de mer standard avec les normes de l'OMS démontre la nécessité d'éliminer 98,1% des ions sodiums et 98,7% des ions chlorures pour respecter la réglementation internationale.

C'est précisément l'objet de la section suivante consacrée aux techniques de dessalement qui permettra d'approfondir plus en détail les principes de ces procédés qui permettent de rendre l'eau de mer potable.

CHAPITRE II :
TECHNIQUE DE DESSALEMENT
DE L'EAU DE MER

CHAPITRE II : TECHNIQUES DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER

II.1. DESSALEMENT : DEFINITION ET HISTORIQUE

Le dessalement de l'eau, appelé également dessalage ou désalinisation, est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce, soit de l'eau potable ou, soit de l'eau utilisable pour l'irrigation, à partir d'une eau saumâtre ou salée (eau de mer notamment).

Ce processus de dessalement permet notamment d'augmenter la ressource en eau douce disponible, de fournir une solution alternative en cas de sécheresse et faire face aux situations de pénuries.

Le dessalement d'eau est avant tout destiné à la consommation humaine (75% en 2008) (Plan bleu, 2008) mais son usage en agriculture peut être localement important. A titre illustratif, en Espagne, sur la côte Est de l'Andalousie l'installation de Carboneras a multipliée la production quotidienne par 6 depuis son ouverture passant de 20 000 à 120 000 m³ d'eau (voir graphique). Outre l'alimentation en eau potable de 700 000 personnes, elle a permis le développement de la production maraîchère intensive.

Use of Desalinated Water in Spain

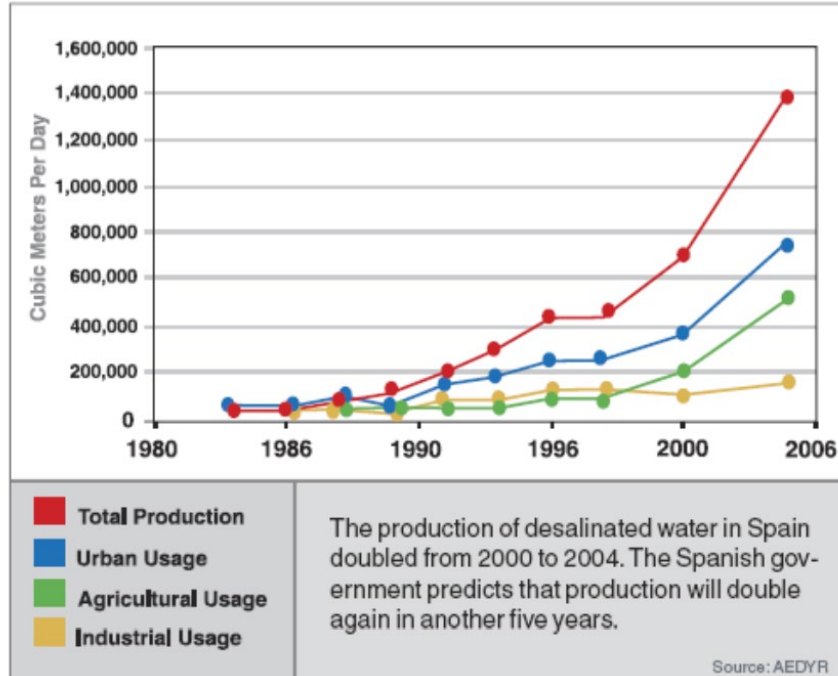


Figure 9 : Utilisation de l'eau de mer dessalée en Espagne – Source : WWF, 2007

Plusieurs méthodes permettent la séparation de l'eau de mer en une eau douce contenant une faible concentration des sels dissouts, et une solution concentrée en sels. Cependant, les deux technologies

utilisées actuellement, à l'échelle industrielle, sont celles basées sur la distillation et l'osmose inverse. Nous décrirons plus en détail les principales techniques de dessalement ci-dessous.

Les premiers procédés de dessalement remontent à longtemps. L'homme a commencé par produire des petites quantités à partir de simples bouilleurs pour arriver au cours des dernières années à une production de 815120 m³ /jour (Khawajia et coll., 2008). En effet, déjà au XII^e siècle, Adélarde de Bath décrit deux expériences dans les *Quæstiones naturales* : « au soleil, après l'évaporation sur un rocher, l'eau de mer se transforme en sel ; lorsque le soleil fait défaut, on chauffe de l'eau de mer et sous l'effet de la cuisson on la voit également se transformer en sel. Cette métamorphose explique que la mer soit plus salée l'été que l'hiver, que les mers méridionales le soient davantage que les mers septentrionales ». Ainsi, depuis les temps les plus anciens, les marins ont dessalé l'eau de mer à partir de simples bouilleurs sur leurs bateaux, mais l'utilisation à des fins industrielles est récente.

Dans les années 60, les procédés thermiques sont mis au point et utilisés pour dessaler l'eau de mer. Par ailleurs, des recherches sont développées sur le procédé de dessalement par osmose inverse. En 1978 a eu lieu la mise en service de la première unité de dessalement de l'eau de mer par osmose inverse, à Djeddah en Arabie Saoudite.

II.2. DESSALEMENT DE L'EAU DE MER DANS LE MONDE

De plus en plus de pays sont confrontés à une pénurie d'eau, en raison d'une aridité climatique, d'une pression démographique importante, mais aussi de l'augmentation de la consommation par habitant. Cette situation conduit de nombreux pays à se tourner vers le dessalement de l'eau de mer. Cette solution constitue pour ces pays des enjeux de santé publique, de dynamisme territorial voire de développement économique.

La production industrielle d'eau potable par dessalement a débuté dans les années 1950 (UNEP, 2008). En 2007, elle atteignait 47 millions de mètres cubes par jour dans le monde, soit environ 8 % de la production totale d'eau potable ou encore 0,45 % de la consommation d'eau douce journalière sur notre planète (Global water intel, 2007).

Selon l'International Water Association, l'eau douce produite grâce au dessalement d'eau de mer répond actuellement à environ 1 % des besoins mondiaux.

Cette industrie connaît depuis, une très forte croissance dans le monde de l'ordre de 15% par an (Elimelech et Phillip, 2011).

Ceci s'explique en grande partie par les nouvelles innovations technologiques et notamment le développement de l'osmose inverse qui rend le dessalement moins coûteux (Plan bleu, 2008). Un

mètre cube d'eau produit par osmose inverse coûte ainsi entre 0,40 et 0,80 € contre 0,65 à 1,80 € pour la technique de distillation, de moins en moins utilisée dans le monde (Commission Européenne, 2007).

Aujourd'hui, les petites installations locales font place à de grosses unités de production plus rentables et mieux équipées. Aujourd'hui, l'alimentation en eau de près de 300 millions de personnes dans le monde en dépend.

Le rapport de 2014 des Nations Unies sur le développement de l'eau dans le monde constate qu'il y a plus de 16.000 stations de dessalement réparties dans le monde pour un total de plus de 150 pays.

La répartition des usines de dessalement est fonction de 3 critères :

- une forte pénurie d'eau liée à l'aridité climatique,
- la proximité de la mer et une altitude pas trop élevée,
- enfin la possibilité d'assumer financièrement un fort coût énergétique ce qui exclut pratiquement les régions pauvres (Salomon, 2012).

On retrouve des stations dans de nombreuses zones côtières, de la Californie à l'Espagne, des Caraïbes au Sud-Est asiatique. L'Arabie Saoudite reste cependant le plus gros producteur (Elimelech et Phillip, 2011).

La répartition de ces stations est comme suit (cf. figure ci-dessous) :

- les principaux pays producteurs sont l'Arabie Saoudite (25 %), les États- Unis (15%), les Émirats Arabes Unis (10 %) et le Koweït (5%).
- L'Europe représente 12,9 % dont 3,4millions en Espagne et 0,8 en Italie.
- L'Asie représente 15,1% dont 1,5 million au Japon, 1 en Coréedu Sud, 1,1 en Chine, 0,8 en Inde, 0,6 à Taiwan et 0,5 à Singapour (Salomon, 2012)

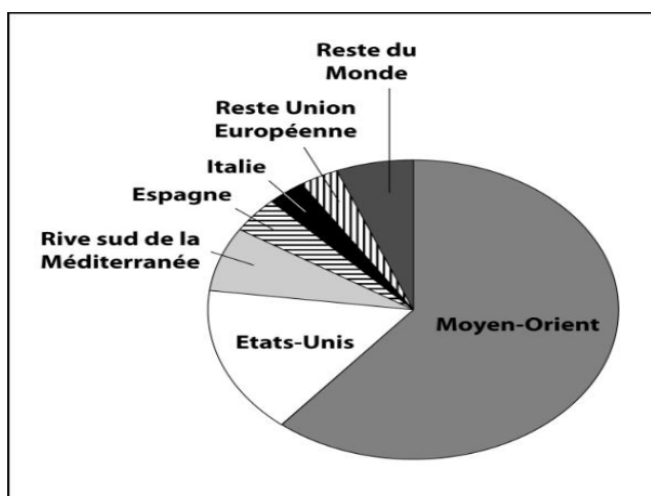


Figure 10 : Répartition du dessalement dans le monde (Source : Salomon, 2012)

La production totale actuelle serait de l'ordre de 58 Mm³ /jour (47 à partir d'eau de mer et 11 à partir d'eaux saumâtres). Les estimations de cette production varient suivant les sources (de 50 à 60 Mm³ /jour). Cela représente environ 1% de la quantité d'eau potable consommée (Dunglas, 2014).

II. 3. LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER EN MEDITERRANEE

Selon les notes du plan bleu, la méditerranée constitue 60% de la population mondiale bénéficiant de moins de 1000 m³ par habitant/an de ressources en eau renouvelables. Pour faire face à cette situation, dans le bassin méditerranéen, le dessalement de l'eau de mer est une des solutions incontournables avec le recyclage des eaux usées. Ainsi, en 2008, la méditerranée représentait environ un quart du dessalement mondial (Plan bleu, 2008).

La figure ci-dessous décrit la localisation, type de technologie ainsi que la capacité des installations du bassin méditerranée.

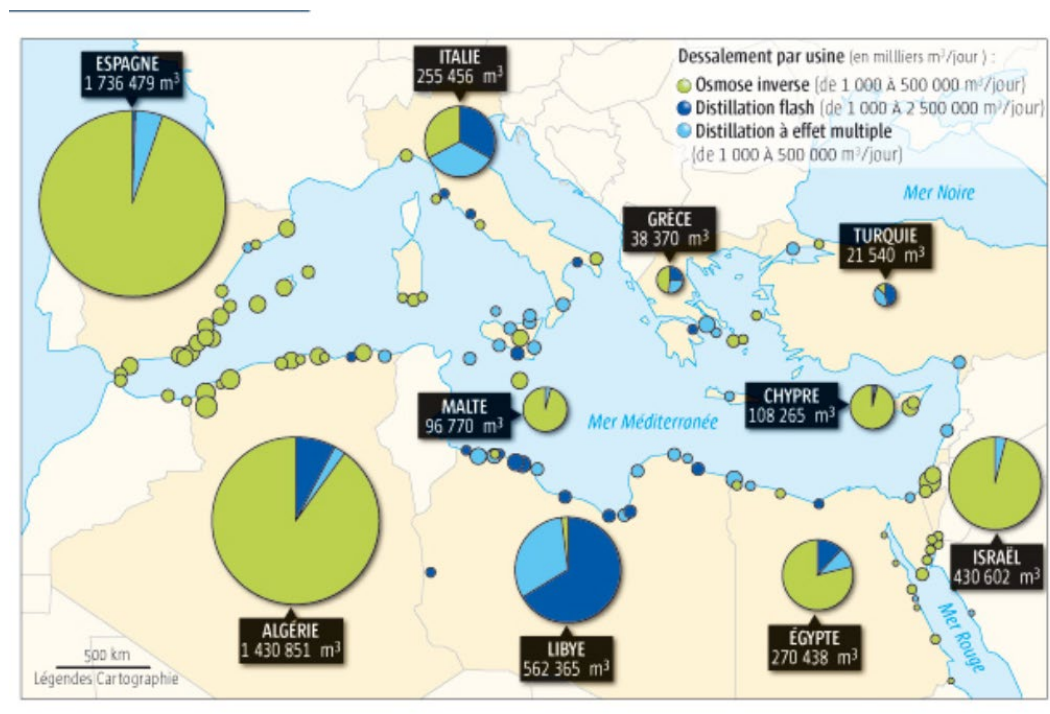


Figure 11 : Le dessalement à travers la méditerranée (source : Dunglas, 2014)

Le marché du dessalement de l'eau de mer devrait continuer à accroître dans les années à venir. A l'horizon 2030, la méditerranée pourrait tripler voir quadrupler sa production pour atteindre 30 à 40Mm³/j

L'Espagne s'investit dans le développement de cette technologie pour répondre aux pénuries d'eau dans les zones en stress hydrique. L'installation d'El Prat de Llobregat de Barcelone fournit 200 000 m³ d'eau par jour soit 73 millions par an. Elle est considérée comme la plus grande usine de dessalement d'Europe et répond ainsi à la consommation d'un quart de la population de Barcelone.

Certaines régions, notamment les îles Canaries, dépendent totalement de ces technologies pour leur eau potable. En France, seules de petites unités facilitent localement l'approvisionnement en eau potable : à titre illustratif la Belle-île, l'île de Sein et le port de Rogliano dans le Cap Corse.

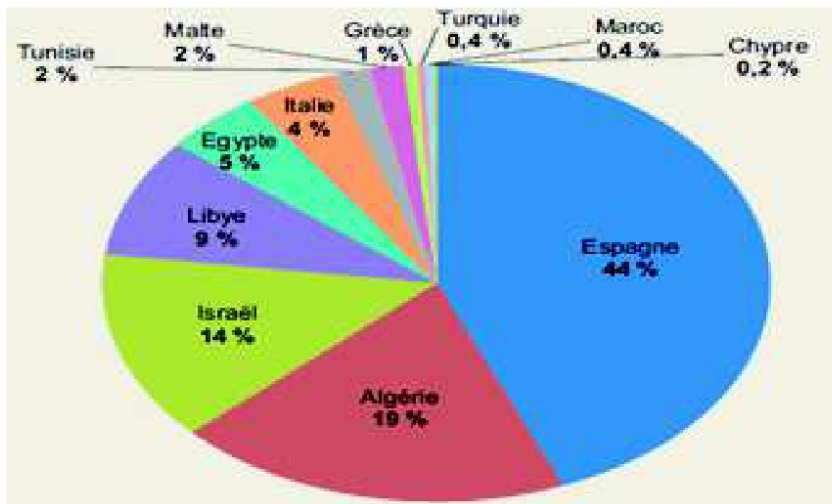


Figure 12 : Capacité de dessalement installée en méditerranée (Boyé, 2008)

II.4. LE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER EN ALGERIE

II.4.1. Historique du dessalement de l'eau de mer en Algérie

Les premières installations de dessalement remontent à l'année 1964 dans l'industrie pétrolière. Trois petits blocs d'une capacité de 8 m³/h chacun ont été installés au complexe Gaz liquéfié d'Arzew.

Le procédé utilisé est de type « tubes submergés », travaillant à basse pression. En 1969, une autre installation à Arzew a été installée pour une capacité de production de 4560 m³/j, le procédé utilisé est de type multi-flash (Luganand et Fethi, 2008-) En 1964, trois petits blocs d'une capacité de 8 m³/h chacun ont été installés au complexe Gaz liquéfié d'Arzew (ville côtière à l'ouest du pays). Le procédé utilisé est « à tubes submergés » travaillant à basse pression.

Une autre installation a vu le jour à Arzew en 1969 avec une capacité de production de 4560 m³/j. Le procédé utilisé est MSF. Dès lors de nombreuses installations de dessalement ont été mise en place en parallèle avec les nouveaux complexes.

Aujourd'hui, plusieurs facteurs militent en faveur de la mise en œuvre de cette technologie dans sur le territoire de l'Algérie :

- les caractéristiques géographiques du pays : un littoral long de 1450 kilomètres.
- les ressources hydrologique : une disponibilité de l'eau de mer, ressource inépuisable.
- les besoins grandissants : une population et une industrie grandes consommatrices d'eau se trouvant à proximité de la mer.

C'est ainsi que le dessalement de l'eau de mer a connu ces dernières années une avancée remarquable en Algérie.

II.4.2. Programme de dessalement de l'eau de mer en Algérie

La crise de ressources hydriques qui a même menacé ces dernières années, l'alimentation en eau potable de la population dans diverses régions du pays a pressé l'Algérie dans le dessalement. C'est ainsi que ces dernières années, l'Algérie s'est engagée dans un important programme d'investissement pour le dessalement d'eau de mer afin de :

- faire face à la demande domestique (eau potable) de sa population, en sécurisant les besoins des villes cotières (80% de la population) ;
- libérer le pays de la dépendance de la pluviométrie pour l'alimentation en eau potable des populations;
- intégrer l'apport de technologies nouvelles qui permettent d'obtenir aujourd'hui une eau potable, de qualité, à des coûts de production maîtrisés ;
- Palier aux contraintes de réalisation des barrages, dont la durée de construction est très longue par rapport à la durée de construction d'une station de dessalement d'eau de mer (WEX, 2013)

Ainsi, le projet dessalement d'eau de mer fait partie d'un programme d'urgence décidé par le gouvernement pour pallier durablement au déficit en ces ressources. Le marché a été conclu et signé entre l'E.P Algérienne de eaux, d'une part, et :

- L'entreprise nationale Hydro - traitement le 11/05/2002.
- L'entreprise allemande Linde – kca le11/05/2002.

Ce programme de dessalement de l'eau de mer à été planifié pour la réalisation d'unités de petites et grandes capacités afin d'obtenir une production globale de l'ordre d'un million de mètres cubes et répondre à un cinquième (1/5) des besoins de consommation du pays à l'horizon 2005 (ADE : L'Algérienne Des Eaux).

La réalisation du projet s'est traduite par la production de 57.500m³/j répartis entre les six wilayas suivantes :

- Wilaya d'Alger : 12 stations pour un volume journalier de 30.000 m³.
- Wilaya de Boumerdes : 01 station pour un volume journalier de 5000 m³.
- Wilaya de Tipaza : 01 station pour un volume journalier de 5000 m³.
- Wilaya de Skikda : 04 stations pour un volume journalier de 10.000 m³.
- Wilaya de Tlemcen : 02 stations pour un volume journalier de 5000 m³.
- Wilaya de Tizi ousou : 01 station pour un volume journalier de 2500 m³.

II.4.3. Répartition des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie

En Algérie, une vingtaine (20) de petites stations étaient réalisées en 2016, sur le budget de l'Etat et confiées à la charge de l'Algérienne des Eaux (ADE). Elles sont toutes implantées dans les régions côtières, notamment :

- Boumerdes : une station pour un volume de 5000 m³/j.
- Tipaza : une station pour un volume de 5000 m³/j.
- Skikda : 04 stations pour un volume de 10.000 m³/j.
- Tlemcen : 02 stations pour un volume de 5000 m³/j.
- Tizi Ouzou (Azzefoun) : 01 station pour un volume de 2500 m³/j.

En 2019, 12 grandes stations étaient opérationnelles pour approvisionner les grands centres urbains, localisées à Mostaganem, Zéralda (Alger-Ouest), à Cap Djinet (à l'Est d'Alger), à SidnaOuchaa, Honaïne, AïnTourk (wilaya d'Oran), Jijel et El Kala (Figure ci-après)

Ces dernières années, le dessalement de l'eau de mer est pratiqué dans de nombreuses régions côtières du territoire avec d'importante capacité de production. A titre illustratif, ci-dessous une liste non-exhaustive des installations et leurs capacités :

- Hamma 200.000 m³/j
- Skikda 100.000 m³/j ;
- Beni Saf 200.000 m³/j ;
- Kahrama 90.000 m³/j ;
- Cap Djinet 100.000 m³/j ;
- Mostaganem 200.000 m³/j ;
- Magtaa 500.000 m³/j ;
- Oued Sebt: 200.000 m³/j ;
- Tenes: 200.000 m³/j ;
- Souk Tlata: 200 000 m³/j ;
- El Taref: 50.000m³/j

- Fouka : 120 000 j/m³. Soit 2 160 000 m³/j.



Figure 13 : Répartition des stations de dessalement sur le littoral Algérien (Gasmi, 2016)

La production de l'ensemble des installations a nettement augmenté entre 2006 et 2014 comme le montre la figure ci-dessous.

Actuellement toutes ces stations fournissent 17% de l'eau consommée dans le territoire de l'Algérie avec un volume de 2,6 millions m³/jour soit l'équivalent de 770 Mm³/an. Cette production permet de fournir de l'eau potable à travers les différentes wilayas d'alimenter 6 millions d'habitants (Magoum, 2020)

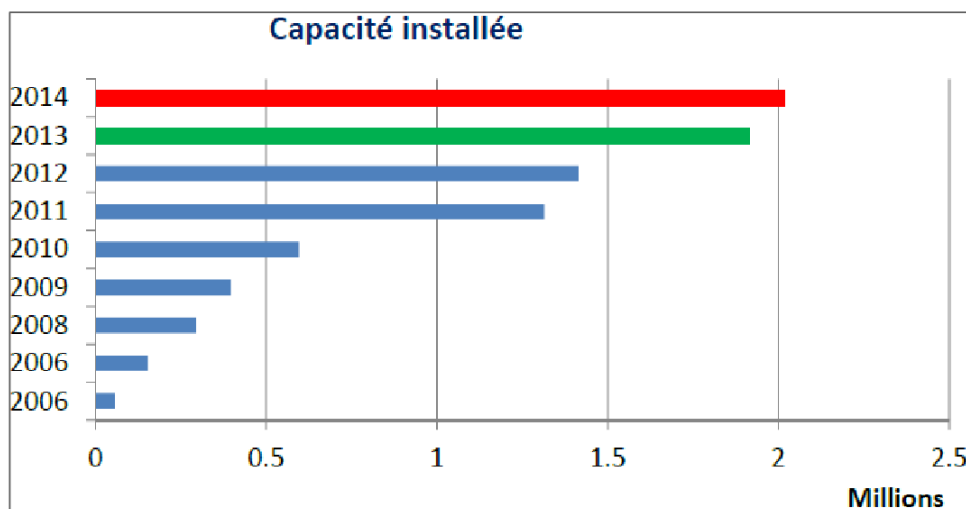


Figure 14 : Evolution de la capacité installée de systèmes de dessalement en Algérie entre 2006 et 2014 (WEX, 2013)

II.5. LES PRINCIPALES TECHNOLOGIES DE DESSALEMENT DES EAUX

II.5.1. Classification des techniques de dessalement

On recense 27 procédés différents de dessalement qui peuvent être classés de différentes approches, dont beaucoup ont atteint le stade industriel (Altaee et al., 2014; Henthorne, 2007).

Les technologies actuelles de dessalement des eaux peuvent être classées selon le principe appliqué :

- les procédés thermiques faisant intervenir un changement de phases : la congélation et la distillation ;
- les procédés membranaires: l'osmose inverse et l'électrodialyse (Pankratz, 2010)

Le tableau ci-dessous, décrit un ensemble de procédés de dessalement catégorisé en fonction du type de séparation.

Tableau 17. Procédés de dessalement

Séparation	Energie	Processus	Méthode
Eau des sels	Thermique	Evaporation	Distillation subite (flash)
			Distillation multi-effet
			Thermo-compression à vapeur
			Distillation solaire
	Cristallisation	Congélation	
		Formation d'hydrates	
	Filtration et évaporation	Distillation par membranes	
Mécanique	Evaporation	Compression mécanique vapeur	
	Filtration	Osmose inverse	
Sels de l'eau	Electrique	Filtration sélective	Electrodialyse
	Chimique	Echange	Echange ionique

D'autres auteurs proposent que les procédés de dessalement des eaux peuvent être classés en trois grandes familles :

- Les procédés de distillation ;
- Les procédés membranaires ;
- Autres procédés (Échanges d'ions, congélation et humidification).

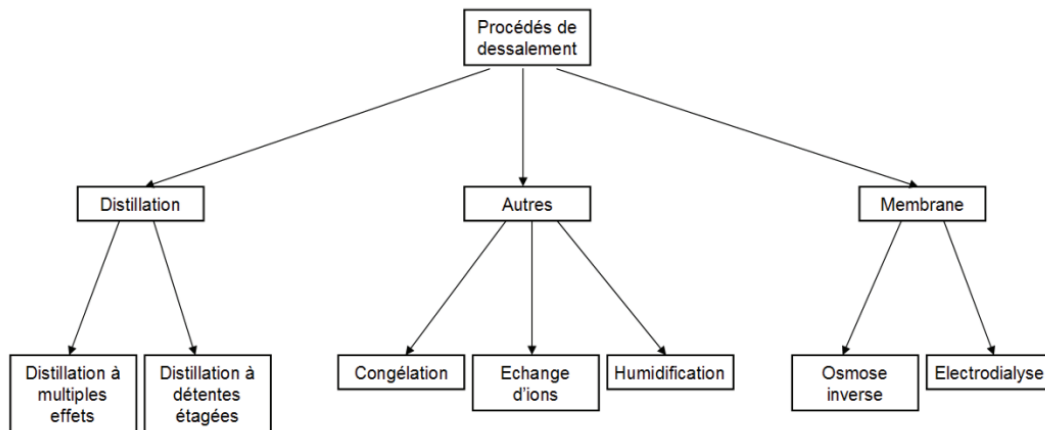


Figure 15 : Classification des procédés de dessalement (Al-Shayji, 1998).

Les techniques les plus performantes, disponibles sur le marché, sont l'osmose inverse et les procédés de distillation, à détente étagées ou à multiples effets.

Quelques soit l'approche de classification des procédés de dessalement, la distillation et l'osmose inverse, les plus courants (Salomon, 2012) sont des technologies dont les performances ont été prouvées pour le dessalement d'eau de mer. Ces deux procédés sont les plus disponibles dans le marché mondial du dessalement. Les autres techniques n'ont pas connu un essor important dans le domaine.

Plus précisément, ce sont les procédés membranaires, principalement par osmose inverse (OI), qui représente les 3/4 de la capacité de dessalement mondiale, le reste étant le dessalement thermique utilisant la distillation flash multi-étapes et la distillation multi-effets (Elsaid et al., 2020).

Selon la nature du procédé mis en jeu, la capacité de production peut varier de quelques litres par jour à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes par jour. Ainsi, le choix de la technologie de dessalement déployée est fonction de nombreux facteurs, notamment, la nature de l'eau à traiter, la capacité de production souhaitée, et de la source d'énergie disponible.

II.5.2. Les procédés de distillation

II.5.2.1. Principe

La distillation est un procédé de séparation selon lequel un composé volatil d'une solution est évaporé et ensuite condensé. Elle repose sur un principe de changement de phase eau liquide - vapeur.

Les procédés de distillation consistent à chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur produite ne contient pas de sels, ainsi, la condensation de cette vapeur permet d'obtenir de l'eau douce liquide. Plus précisément, le principe de la distillation consiste à accélérer le cycle naturel de l'eau.

Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux. Cette technologie fut la première à être employée pour dessaler l'eau de mer commercialement.

L'inconvénient majeur des procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau (le coût énergétique représente environ un tiers du coût total). Ainsi, pour transformer un kg d'eau liquide en un kg d'eau vapeur à température constante, il faut environ 2250 kilojoules. Elle n'est donc rentable que dans les pays où l'énergie est très bon marché.

II.5.2.2. Les différents types de distillation

Les procédés de distillation qui peuvent être utilisés sont les suivants :

- Distillation à multiple effet ;
- Distillation par détente successive appelée aussi multi flash ;
- Distillation par compression de vapeur.

a) La distillation à simple effet

La vapeur produite elle participe à l'ébullition de l'eau de mer. La distillation à simple effet consiste à reproduire le cycle naturel de l'eau. Dans un premier temps, l'eau de mer est portée à ébullition au contact d'un premier serpentin dans lequel circule un fluide caloporteur (cf. figure ci-dessous). Par le biais d'un second serpentin dans lequel circule de l'eau de mer froide, la vapeur ainsi produite se condense. Les sels dissouts n'étant pas vaporisables dans les mêmes conditions que l'eau, la vapeur ainsi obtenue est constituée d'eau pure.

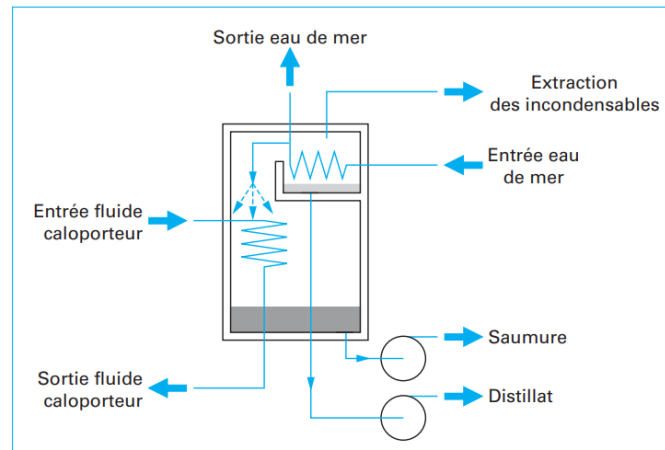


Figure 16 : Distillation à simple effet (technique de l'Ingénieur, 2010)

b) Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effect distillation MED)

Il s'agit du montage le plus utilisé. Le procédé de distillation à multiples effets est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. Ce procédé comporte une série de cellules (compartiment ou étage) fonctionnant à des pressions et des températures décroissantes. La vaporisation de l'eau se fait par passage au sein des étages successifs où règnent des pressions de plus en plus faibles.

La vapeur ainsi produite dans le 1er compartiment est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2ème compartiment où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2ème compartiment et ainsi de suite (voir figure ci-après). Ainsi, le phénomène d'évaporation se reproduit.

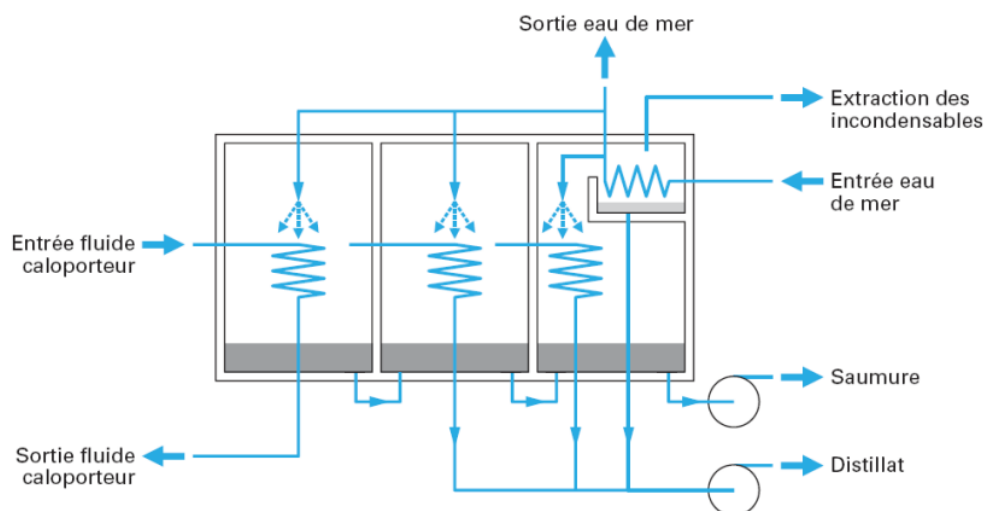


Figure 17 : Distillation à multiple effet

c) Le procédé de distillation à détente étagée (Multi-Stage Flash distillation MSF)

Le procédé de distillation à détente étagée dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120 °C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite.

En pratique, une fraction de l'eau s'évapore puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détente 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. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée Flash. La figure ci-dessous décrit le procédé de distillation MSF.

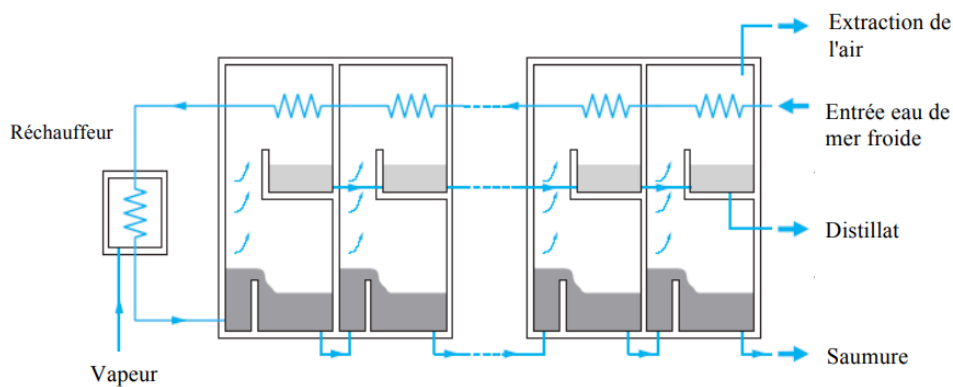


Figure 18 : Schéma de principe d'un système de Distillation par détente successives (MSF) (source : Technique de l'ingénieur, 2010)

II.5.2. Les procédés membranaires

Dans le domaine du traitement de l'eau, les techniques de séparation par membranes constituent une révolution. Le principe de ces procédés consiste à extraire physiquement les microorganismes. Elles n'utilisent aucun réactif chimique, sauf pour leur entretien. Les membranes ont ainsi la capacité de différencier et séparer sélectivement les sels dissous dans l'eau. Très fiable, elles permettent de produire une eau très pure et de qualité constante (Maurel et al, 2001).

II.5.2.1. L'osmose inverse (OI)

Cette technique repose sur le principe d'une séparation sel - eau faisant appel à une membrane semi-perméable. Ce procédé de l'osmose inverse est de plus en plus répandu et tend à se développer très largement car elle présente un fort intérêt en termes de coût d'investissement, de consommation d'énergie et de qualité de l'eau produite.

La majorité des usines construites dans les 20 dernières années ainsi que les futurs projets sont basées sur l'utilisation de cette technologie : en 1990, elle représentait 40% des installations dans le monde contre environ 55% en 2008 et 70% en 2020 (plan bleu, 2008).

Ce procédé d'OI sera plus amplement détaillé dans la prochaine section dont l'objectif est de décrire précisément ce type de dessalement.

II.5.2.2. L'électrodialyse

L'électrodialyse repose, aussi, sur une séparation sels-eau en faisant appel à une membrane semi-perméable mais le principe physique utilisé est différent. Ce procédé est une technique électro-membranaire qui permet le transfert des ions à travers une membrane à perméabilité sélective sous l'effet d'un champ électrique. L'objectif de ce procédé est donc d'extraire les sels d'une solution pour obtenir, d'un côté une solution saumure très concentrée et de l'autre une solution dessalée (cf. figure ci-dessous)

Sous l'action d'un champ électrique créé par deux électrodes trempant dans le liquide, les ions d'un sel dissous dans l'eau, (Na^+ et Cl^- , pour l'eau de mer) peuvent se déplacer. Ainsi, les ions positifs ou cations (Na^+) sont attirés par l'électrode négative (ou cathode) tandis que les ions négatifs (Cl^-) sont attirés par l'électrode positive. En raison de la sélectivité des membranes seuls les ions Na^+ peuvent uniquement traverser les membranes cathodiques et seuls les ions Cl^- peuvent traverser les membranes anioniques, on obtient de l'eau douce dans deux des quatre compartiments.

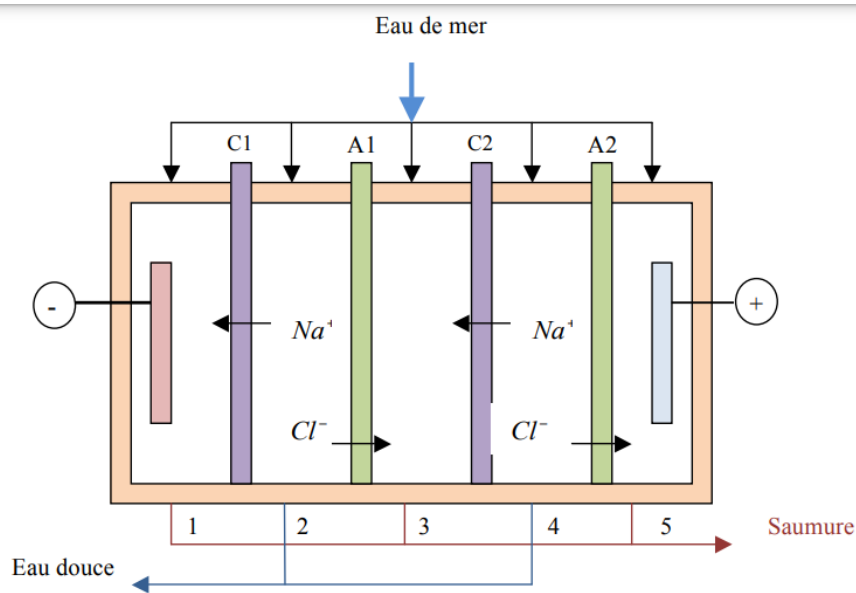


Figure 19 : Unité d'électrodialyse alimentée en parallèle

II.5.3. Fonctionnement et organisation générale installations de dessalement

Quel que soit le procédé de dessalement, décrit ci-dessus, déployé, toutes les installations de dessalement comportent 4 étapes :

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

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

La plupart des usines sont organisées selon le schéma suivant :

1. Une unité de pompage. La plupart du temps, on pompe l'eau de mer mais parfois, des eaux souterraines qui peuvent présenter une salinité qui les rend impropres à la consommation.
2. Une unité de décantation constituée de grandes cuves permettant le dépôt des impuretés les plus denses.
3. Une pompe de précharge avec crépine, filtre

4. Une unité de désalinisation qui peut fonctionner selon 3 principes physiques différents : la distillation - l'osmose inverse - l'électrodialyse.
5. Une unité de traitement des eaux usées (généralement par floculation et filtration) avant rejet.
6. Une source d'énergie, nécessaire notamment au pompage, à la mise sous pression de l'eau, etc... Elle peut être, par ordre décroissant d'investissement

CHAPITRE III :
TECHNIQUE DE DESSALEMENT
PAR OI

CHAPITRE III : PROCEDE DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER PAR OI

III.1. HISTORIQUE ET DEFINITION DU PROCEDE D'OI

Comme décrit brièvement dans la section ci-dessus, l'osmose inverse est un procédé de séparation de l'eau et des sels dissous au moyen de membranes semi-perméables sous l'action d'un gradient de pression (54 à 80 bars pour le traitement de l'eau de mer) (Fell, 1995). 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.

L'osmose inverse a été découverte en 1950 par Reid à l'Université de Floride (États-Unis). Son développement s'est fait grâce à la découverte, vers 1960, par Loeb et Sourirajan d'un nouveau type de membrane à structure asymétrique : les membranes TFC. De telles membranes, sont très fines, 100 à 200 μm . Ce qui leur donne un avantage certain puisque la perméabilité d'une membrane est inversement proportionnelle à son épaisseur. C'est ce qui a permis, en 20 ans, d'augmenter le taux de rejet de 98.6 à 99.6%. De plus, le prix a beaucoup baissé au cours des 20 dernières années, passant de 40 \$/m² à 9 \$/m²

III.2. PRINCIPE DE L'OSMOSE INVERSE

III.2.1. Définition de l'osmose

L'OI est à l'inverse au phénomène naturel d'osmose qui tend à transférer le solvant d'une solution diluée vers une solution concentrée mises en contact par une membrane sélective sous l'action d'un gradient de concentration. Par conséquent, il convient donc de définir le principe de l'osmose, le phénomène naturel, qui découle du deuxième principe de la thermodynamique.

Ainsi, l'osmose est définie par la relation entre un soluté (ici le sel, principalement) et le liquide (ici, l'eau) dans lequel il est dissout.

On appelle, donc, osmose le transfert de solvant (eau dans la plupart des cas) à travers une membrane semi-perméable sous l'action d'un gradient de concentration.

Lorsqu'on met en présence deux solutions de concentration différentes, séparées par une membrane, on observe un déplacement des espèces qui se fait de la solution la moins concentrée à la solution la plus concentrée.

III.2.2. Expression de la pression osmotique : Loi de Van't Hoff

Soit un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes (figure ci-dessous). Le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée.

L'équilibre s'établit à la pression osmotique. Plus l'eau est chargée en sels, plus la pression osmotique est élevée.

La pression osmotique peut être calculée par la loi de Van't Hoff : la pression osmotique exercée par un soluté est égale à la pression que ce corps aurait ainsi exercé dans l'état gazeux parfait dans le même volume et à la même température. Si le soluté est dissocié en i ions, la pression osmotique sera i fois supérieure. La pression osmotique (p) d'une solution est proportionnelle à la concentration en solutés :

$$P = i \times C \times R \times T$$

avec i = nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte,

C = concentration en sels (en mol.m⁻³),

R = constante des gaz parfaits ($R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$),

K = température de la solution (en kelvins)

Ainsi, la pression osmotique d'une eau à 20°C contenant 35 g de chlorure de sodium par litre vaut :

$$P = 2 \times (35 \times 10^3 / 58,5) \times 8,314 \times 293 = 29,14 \times 10^5 \text{ Pa} = 29,14 \text{ bar.}$$

Cette formule fait apparaître que la pression osmotique est d'autant plus élevée que la concentration de la solution est élevée. A titre d'exemple, le tableau ci-dessous décrit quelques ordres de grandeurs relatifs aux pressions osmotiques de quelques solutions aqueuses (Violleau, 1999).

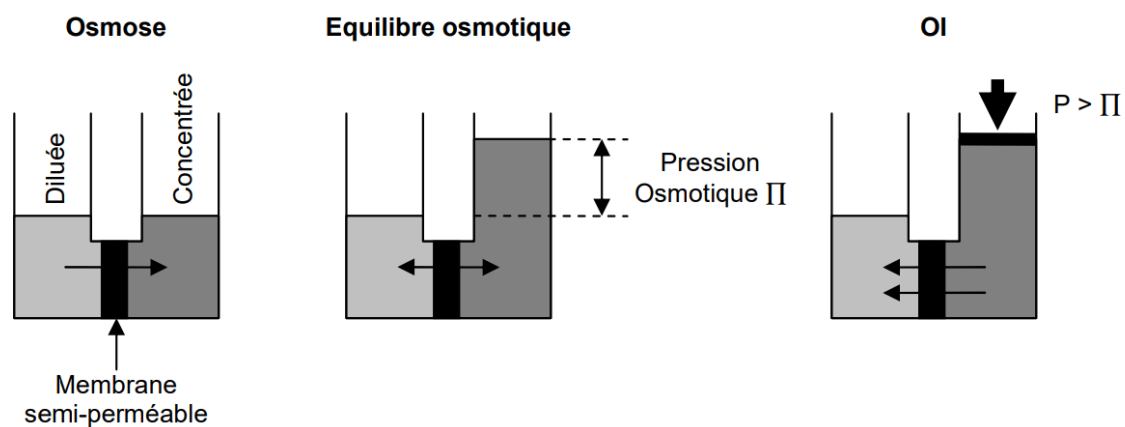


Figure 20 : Schéma du principe des phénomènes d'osmose directe et d'OI

Tableau 18. Pression osmotique de quelques solutions aqueuses en fonction de leur concentration

	Concentration (mg/L)	Pression osmotique (bars)
NaCl	35	27,9
	5	3,9
	1	1,2
	0,5	0,9
Eau de mer	44	32,3
	32	23,1

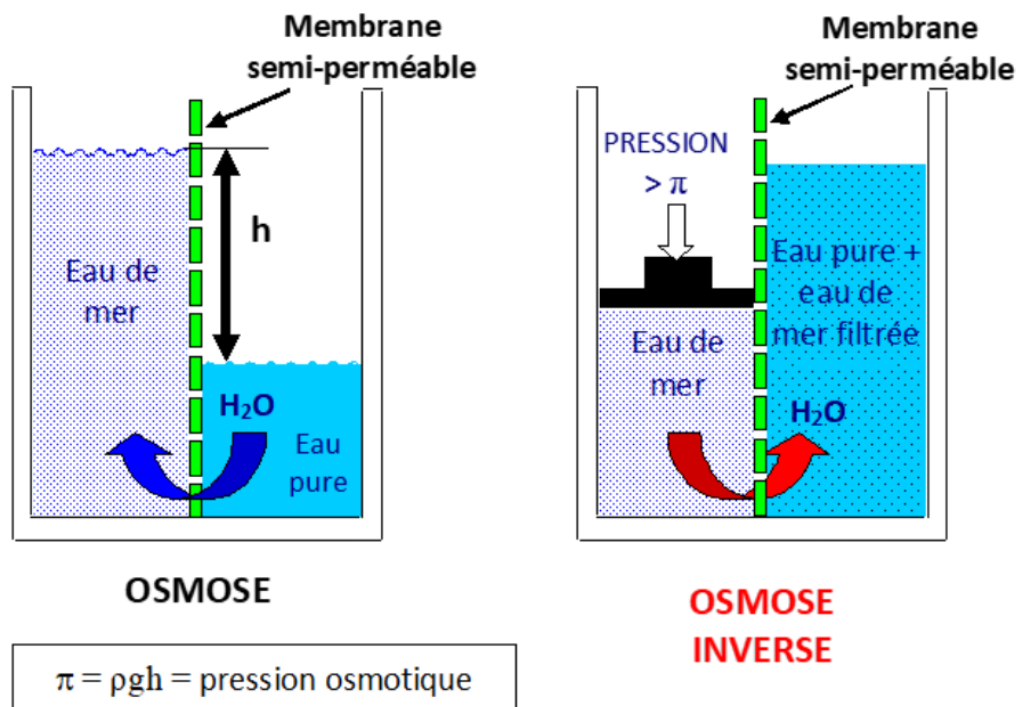


Figure 21 : Osmose et osmose inverse

Si on applique une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose diminue. Puis lorsque la pression est suffisante, le flux de transfert va s'annuler. Cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique.

Une augmentation de la pression au-delà de la pression osmotique va se traduire par un flux d'eau dirigé en sens inverse du flux osmotique, c'est-à-dire de la solution concentrée vers la solution diluée : c'est le phénomène d'osmose inverse.

A titre illustratif, la pression osmotique d'une eau à 20°C contenant 35 g de chlorure de sodium par litre vaut :

$$\pi = 2 \times (35 \times 103 / 58,5) \times 8,314 \times 293 = 29,14 \times 10^5 \text{ Pa} = 29,14 \text{ bar.}$$

Le débit spécifique J1 (débit massique par m2 de membrane) d'eau osmosée produite est proportionnel à la différence entre la pression appliquée P et la pression osmotique π de la solution concentrée.

$J_1 = A \times (P - \pi)$, où A est le coefficient de perméabilité vis-à-vis de l'eau pure.

Le flux spécifique de sel traversant la membrane est quant à lui proportionnel à la différence de concentration de part et d'autre de la membrane.

$J_2 = B \times \pi C$, où B est le coefficient de perméabilité vis-à-vis du sel.

D'autre part, on peut aussi estimer la valeur de la pression osmotique à partir des solides dissous dans l'eau en utilisant l'approximation suivante :

$$P_{osm} = TDS \times 0.0008$$

TDS : le total des solides dissous dans l'eau

Les unités utilisées sont :

$$[P_{osm}] = \text{Bar}$$

$$[TDS] = \text{ppm}$$

Ainsi, lorsque l'eau de mer est poussée grâce à une forte pression (entre 50 et 80 bars) à travers une membrane, le sel et les impuretés sont piégés par la membrane et seules, les molécules d'eau peuvent la traverser, fournissant de l'eau douce. Le diamètre des pores des membranes d'osmose inverse sont de l'ordre du millième de micromètre.

III.3. PARAMETRE DE FONCTIONNEMENT EN OI

III.3.1. La membrane, élément essentiel de l'OI

La séparation de l'eau d'alimentation en eau pure (premeat) et concentrât ; se produit dans l'élément d'OI. L'élément d'OI consiste en une membrane semi-perméable qui permet le passage de l'eau pure mais empêche le passage de la matière dissoute et des ions. Le procédé d'OI est donc basé sur un élément essentiel : la membrane.

Par définition, une membrane est une barrière semi-perméable ou permselective, issue d'une synthèse minérale ou organique. Elle est appelée ainsi car elle est perméable aux solvants mais peu ou pas perméable aux espèces présentes dans la solution sous forme dissoute (Koller, 2001).

L'eau passe au travers d'une membrane ultra fine, semi-perméable, qui élimine non seulement les particules, mais aussi un pourcentage extrêmement élevé de contaminants dissous dans l'eau, molécule par molécule. L'extraction de l'eau pur à partir de l'eau d'alimentation augmente la concentration de la matière dissoute dans l'eau d'alimentation résiduelle. Cette eau d'alimentation résiduelle est appelée rejet d'eau ou concentrât.

Cette membrane n'est perméable qu'aux molécules les plus fines, c'est à dire H₂O. La membrane est constituée de plusieurs couches minces ou de feuilles de film, qui sont liées entre elles et roulées dans différentes configurations (cf. figure ci-après).

La membrane d'OI est constituée d'une couche mince d'un matériel poreux dont les pores peuvent s'étendre des dimensions atomiques $<10 \text{ \AA}$ à 100 microns (Humphrey et al., 2001). Son épaisseur peut varier entre 100 nm et jusqu'à un peu plus de 1 cm (Koller, 2001). Elle a la propriété d'opposer une résistance sélective au transfert des différents constituants d'un fluide et donc de permettre la séparation de certains éléments (suspensions, solutés ou solvants) composant ce fluide.

Les membranes d'OI sont denses, exemptes de microporosités (taille du pore $< 2 \text{ nm}$), d'une épaisseur très fine allant de 0,1 à 0,5 μm (Koller, 2001 ; Meloan, 1999). Elles sont élaborées avec un matériau ayant des coefficients de diffusion très élevés pour l'eau et moins élevés pour les solutés (Roth et al., 2000).

La durée de vie moyenne des membranes d'osmose Inverse est entre 3-5 ans.

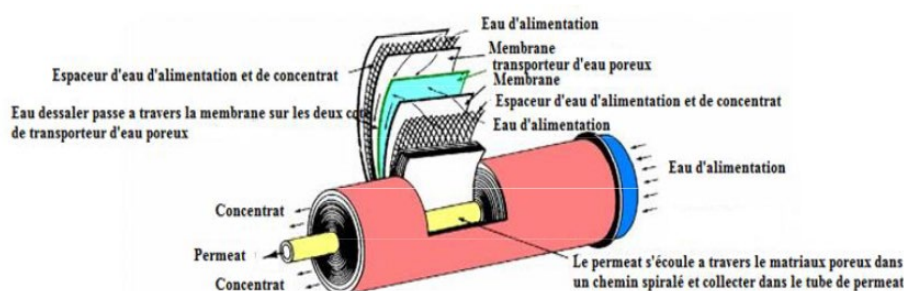
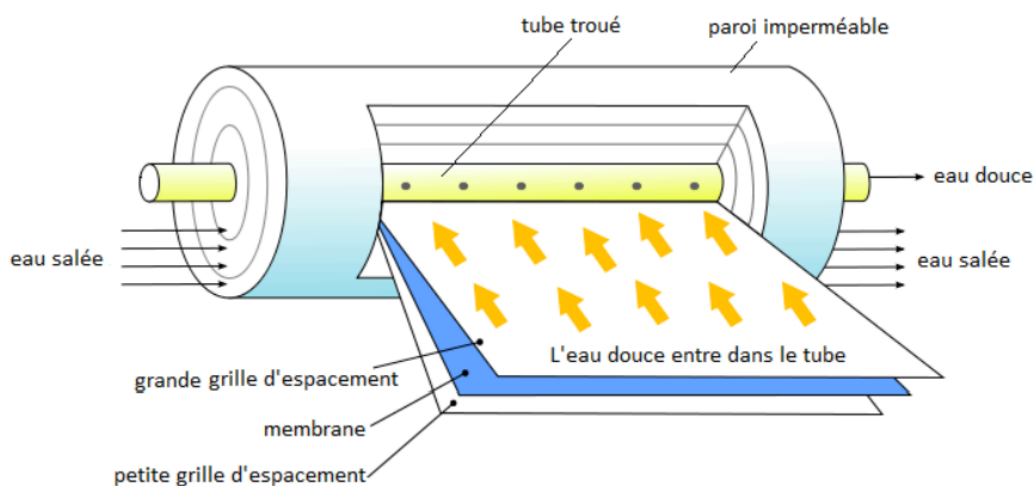


Figure 22 : Schéma d'un module spiralé (Techniques de l'Ingénieur, 2010).

III.3.1.1. Constitution

Les membranes peuvent être constituées de différents matériaux et donc peuvent être classé en: organiques, inorganiques et hybrides.

a) Membranes organiques

Les membranes polymériques représentent la plus grande proportion des membranes installées et actuellement utilisées, malgré leurs résistances thermiques et chimiques relativement limitées car elles sont nettement moins chères que les membranes minérales.

Les membranes organiques sont généralement faites de polymère naturel ou synthétique. Parmi les polymères les plus utilisés, on rencontre entre autres, les polysulfones, les polyamides aromatiques, les polyamides, les polyether sulfones, les polycarbonates, ainsi que des polymères fluorés possédant principalement une structure asymétrique.

Les matériaux communs comprennent : l'acétate de cellulose, le polysulfone, les polyamides aromatiques, le polyacrylonitrile (Ulbricht, 2006 ; Matsuyama et al., 2000 ; Sivakumar et al., 2006).

Le plus souvent un premier polymère présentant une structure macroporeuse est utilisé comme support (polyester, ...) et un second polymère forme la couche active de la membrane.

On peut distinguer 3 types de membranes organiques :

i) Membrane à base d'acétate de cellulose

L'acétate de cellulose (CA) est l'une des premières membranes polymères qui ont été utilisées pour une séparation à base aqueuse, c'est-à-dire des techniques d'osmose inverse et d'ultrafiltration (Buisson et al., 1998). Elles présentent une perméabilité élevée à l'eau et sont également peu toxiques et faciles à fabriquer, mais elles sont vulnérables aux attaques microbiennes et subissent également une dégradation à des températures supérieures à 35 °C (Buisson et al., 1998).

ii) Membrane à base de polyamide aromatique

Les membranes de polyamides (PA) ont quelques avantages par rapport aux membranes CA: elles ont une meilleure résistance à l'hydrolyse et à l'attaque biologique que les membranes cellulosiques. Elles peuvent supporter une température plus élevée.

Cependant, les membranes de PA sont de moins bonne qualité en termes de tolérance au chlore et les tendances d'encrassement biologique malgré que la perméabilité à l'eau est inférieure à celle des membranes CA (Ulbricht, 2006).

iii) Membrane à base de polysulfone

Le polysulfone est un matériau utilisé pour la préparation des membranes car il possède d'excellentes propriétés filmogènes et une grande stabilité mécanique et chimique.

Le polysulfone est couramment utilisé pour les membranes UF ou pour recouvrir les polymères aromatiques pour les membranes NF et OI.

b) Membranes inorganiques

Ces membranes peuvent également être préparées à partir de matériaux inorganiques tels que les céramiques, les métaux et le verre. Deux classes principales de membranes peuvent être distinguées: les membranes denses (elles sont constituées de métaux, d'oxydes hybrides organiques-inorganiques ou mixtes) et les membranes poreuses (céramiques) (Suen et al., 2003).

Les membranes inorganiques peuvent fonctionner à des températures élevées allant de 500 à 800 °C. Certaines membranes céramiques sont utilisables à plus de 1000 °C. Elles sont beaucoup plus résistantes aux attaques chimiques et ont un cycle de vie plus long (Caroia et al., 2006). Mais d'un autre côté, les matériaux inorganiques sont rarement adoptés en tant que supports de membrane d'affinité (Sivakumar et al., 2006).

c) Membranes hybrides

Les matériaux hybrides organiques/inorganiques offrent des avantages spécifiques pour la préparation des membranes artificielles présentant une sélectivité et un flux élevés, ainsi qu'une bonne résistance thermique et chimique (Força et al., 1999). Les matériaux organiques / inorganiques hybrides sont généralement classés en deux catégories (Cotet al., 2000):

- Type I: dans lequel seules les interactions comme les forces de van der Waals ou les liaisons hydrogènes existent entre les parties organiques et inorganiques.

- Type II: dans lequel une liaison covalente existe entre des parties organiques et inorganiques, aboutissant soit à un matériau hybride homogène au niveau moléculaire, soit à des matériaux inorganiques de grande surface modifiée par greffage de surface de groupes organiques.

III.3.1.2. Mécanisme de séparation des membranes

Le mode de séparation est fonction de la morphologie de la membrane. La surface de la membrane peut être soit : *i*) une couche sélective dense qui permet uniquement un transport par diffusion ; soit *ii*) une couche poreuse qui permet un écoulement visqueux du perméat.

Ainsi, la séparation membranaire est réalisée par la manipulation de ces morphologies basiques.

La structure de la couche membranaire est classée en fonction du caractère poreux de la membrane (tableau 20-ci-dessous).

Nous pouvons donc distinguer 3 types :

a) Membranes poreuses

Le taux de transport et la sélectivité de membranes poreuses sont principalement influencés par l'écoulement visqueux et le tamisage ou l'exclusion de taille. En théorie, les barrières poreuses pourraient être utilisées pour des séparations permselectives continues basées sur des différences de taille, de forme et / ou de groupes fonctionnels (Matsuyama et al., 2000). Cependant, les interactions des solutés avec la surface de la membrane (pores) peuvent modifier de manière significative les performances de la membrane.

b) Membranes denses

Les interactions entre les solutés et le matériau de la membrane non poreuses dominent le taux de transport et la sélectivité. Pour les membranes denses, le mécanisme de transport peut être décrit par le modèle solution / diffusion pour le cas des membranes d'osmose inverse (Cath et al., 2006).

c) Membranes d'échangeuses d'ions

Deux mécanismes sont généralement utilisés pour décrire le transport à travers des membranes chargées, soit : *i*) le mécanisme de diffusion de solution avec effet Donnan, soit *ii*) Mécanisme d'électrocinétique.

Les membranes échangeuses d'ions sont généralement de trois types : (1) membranes chargées négativement, (2) membranes chargées positivement et (3) membranes bipolaires.

Tableau 19. Classification des procédés membranaires selon le mode de transport (source : Pontié, 1996)

Structure membranaire	Mécanisme de transfert		
	Flux visqueux/ taille	Solution/Diffusion	Exclusion Electrochimique
Non-poreuse		Osmose inverse OI Separation des gaz GS Prevaporation PV	Electrodialyse ED
Diamètre micro-poreux $d_p \leq 2 \text{ nm}$	Nano-filtration NF	Nano-filtration NF	Dialyse
Diamètre méso-poreux $d_p = 2-50 \text{ nm}$	Ultra-filtration UF	Dialyse	Electrodialyse ED
Diamètre macro-poreux $d_p = 50-500 \text{ nm}$	Micro-filtration MF		

III.3.1.3. Structure des membranes

Différentes structures de membranes sont créées par différentes méthodes de traitement. Nous pouvons classer les membranes en fonction de l'homogénéité structurale des pores ainsi que le long de la section transversale en trois types : membranes symétriques, asymétriques et composites.

Celles-ci sont représentées sur la figure ci-dessous.

a) Membranes symétriques- Les membranes symétriques ont un diamètre de pores homogène et / ou une section transversale de pores à travers l'épaisseur de la membrane. Leur structure microscopique est constante sur toute leur épaisseur. Pour permettre des flux de transfert acceptables, elles doivent être très minces, ce qui les empêche d'avoir la solidité mécanique requise pour un emploi industriel (Belkacem, 1995).

b) Membranes asymétriques- les membranes asymétriques, dites aussi anisotropes, découvertes vers 1960 par S.Loeb et S. Sourirajan, comprennent une couche très mince (0,1-1,0 micromètre) sur une sous-structure très poreuse (100-200 microns d'épaisseur).

La couche fine agit comme une membrane sélective et la sous-couche poreuse agit comme un support de la première couche fine ; celle-ci ne présente presque aucun effet sur les caractéristiques de séparation (Rumeau, 1990 ; Altinkaya, 2004). Dans une membrane asymétrique intégrale, la première couche (couche fine) et le support microporeux sont toujours constituées du même polymère. Les propriétés de séparation de ces membranes (perméabilité, sélectivité) dépendent uniquement de la

structure de leur peau ; en particulier, la perméabilité d'une membrane étant inversement proportionnelle à son épaisseur, il est évident qu'elle sera élevée (Gulhati, 1973).

c) Membranes composites en film mince (TFC)- Les membranes composites sont constituées d'au moins de deux couches de polymères différents, d'où le nom de membranes composites (Koller, 2001 ; Tamas, 2004) :

- La peau : un film mince (polymère dense de 10 à 100 nm) semi-perméable. Cette fine épaisseur est obtenue par polymérisation interfaciale d'un polyamide sur une structure microporeuse à base de polysulfone (Maurel, 1993 ; Ferjani et al., 2002) ;
- La couche support : couche plus épaisse d'une épaisseur de 50 à 100 μm (Koller, 2001) et d'une perméabilité beaucoup plus grande, qui supporte la peau et confère à la membrane sa résistance mécanique.

III.3.2. Assemblage des membranes

III.3.2.1. Définition du module

Dans les procédés membrane, notamment l'OI, les membranes sont généralement logées dans support appelé un module. Ainsi, par définition, un module est un assemblage de membranes avec une entrée d'alimentation commune et des sorties communes de perméat et de concentré (Audinos et Isoard, 1986). Le module comporte des cadres séparateurs ou des drains intercalaires, et généralement des joints de colle pour assembler les membranes et assurer l'étanchéité entre l'alimentation et le perméat (cf. 2 figures ci-dessous).

Un module devra être conçu de façon à atteindre les deux objectifs essentiels suivants :

- Assurer au niveau des membranes la meilleure circulation possible afin de limiter au maximum la formation des couches de polarisation de concentration ;
- Avoir une compacité permettant la plus grande surface d'échange par unité de volume

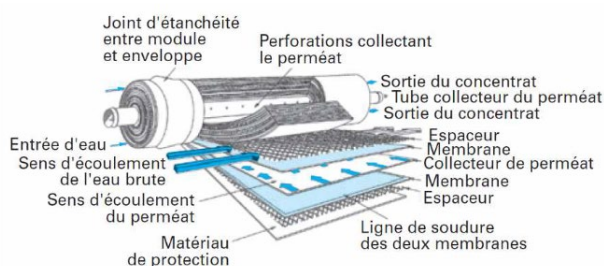


Figure 23 : Schéma d'un module spiralé d'OI (Desclaux et Remigy, 2012-)

La combinaison de la membrane et de l'espaceur d'alimentation s'appelle une feuille. Un élément est constitué de feuilles. L'eau s'écoule à travers l'espaceur d'alimentation, pénètre à travers la membrane et sort par l'autre côté de la membrane comme indiqué dans la figure ci-dessous (Cadotte et al.1980).

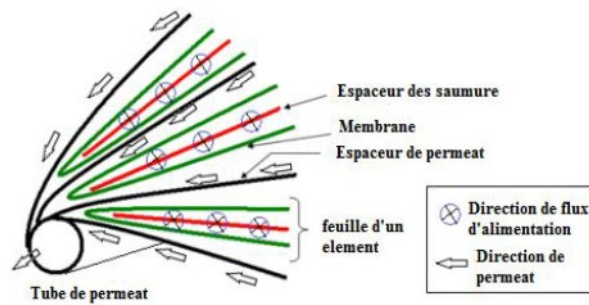


Figure 24 : Construction des feuilles qui forment un module d'OI (source : Cadotte et al., 1980)

A titre illustratif, la figure ci-dessous, montre l'arrangement des feuilles, de l'espaceur de perméat et du tube d'eau produit (PWT) dans un élément (module spiralé). Elle montre également la direction de l'écoulement de l'alimentation et de l'eau du perméat. Les feuilles sont collées le long de chacun des trois côtés exposés (Cadotte et al.1980).

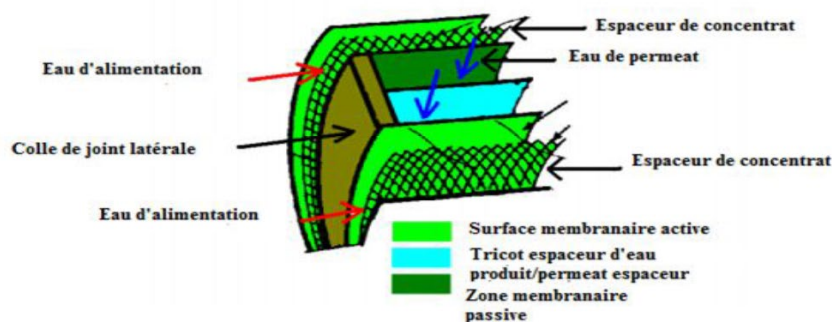


Figure 25 : Coupe d'une feuille dans un module spiralé d'OI (source : Cadotte et al., 1980)

Un module ne comporte pas d'accessoires et d'équipement tels que des dispositifs de mesure de mise sous pression ou de contrôle.

III.3.2.2. Type de module

Différentes formes de membranes et conceptions de modules ont été adoptées dans les différents procédé membranaires. Nous décrivons les 4 grands types de module qui sont commercialisés aujourd'hui.

a) Les modules tubulaires

Un module tubulaire contient plusieurs tubes qui peuvent être en série ou en parallèle. Les membranes tubulaires ont un diamètre d'environ 5 à 15 mm. Dans les modules tubulaires, la membrane semi-perméable est placée à l'intérieur d'un tube support percé de trous de drainage, dont le diamètre varie entre 10 et 40 mm. Les tubes dont la longueur varie de 1,5 à 6 m, sont placés en parallèle ou en série dans une enveloppe cylindrique pour constituer le module unitaire (Koller, 2001). L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est recueilli à l'extérieur des tubes. Les tubes constituent des canaux d'écoulement tangentiel.

b) Les modules fibre creuses

Les modules fibres creuses sont produits par extrusion de fibres au travers de filières annulaires. Les modules fibres creuses se présentent comme un ensemble de fibres creuses regroupées dans une enveloppe. Le diamètre d'une fibre varie entre quelques millimètres et quelques dizaines de microns, les fibres jouent à la fois le rôle de membrane et de support (Koller, 2001). La peau est localisée à l'intérieur ou à l'extérieur de chaque fibre selon que le perméat est collecté à l'extérieur ou à l'intérieur des fibres. L'écoulement du liquide à traiter s'effectue soit à l'intérieur des fibres soit à l'extérieur (Koller, 2001 ; Caetano et al., 1995).

c) Les modules spiralés

Les modules spiralés sont constitués d'une membrane plane enroulée sur elle-même autour d'un tube poreux qui recueille le filtrat. Il s'agit d'un cylindre multi-couches où le perméat s'écoule selon un chemin spiralé vers le tube poreux alors que l'alimentation circule axialement dans les canaux (Berland et Juery, 2002).

Ces modules sont insérés dans des tubes de pression à raison de 1 à 8 modules maximum par tubes qui sont à leur tour raccordés entre eux par des connecteurs.

Le fluide à traiter circule dans l'espaceur, la feuille poreuse assure le drainage du perméat vers le collecteur axial. Le diamètre d'un rouleau de membranes (cartouche) peut atteindre 30 cm et sa longueur 1,5 m. L'ensemble est introduit dans une enveloppe cylindrique pressurisée dont les sections permettent l'entrée de la charge et la sortie du concentrat.

d) Les modules à membranes planes

Ce type de modules est le plus simple, il est aussi le plus ancien des technologies. Au sein de ces modules, les membranes sont montées de part et d'autre de cadres rigides. Les membranes sous formes de plaque plate sont appelées membranes pillow-shaped. Ce type de module est peu adapté aux débits élevés. Le fluide à traiter circule entre les membranes de deux plaques adjacentes ; ces plaques assurent, en même temps, le soutien mécanique de la membrane et le drainage du perméat (Tchobanoglous et al., 2003). La distance entre les membranes, et donc l'épaisseur de la lame liquide, peut varier de 0,5 à 3 mm.

III.3.2.3. Description et comparaison des modules

Les caractéristiques de ces différents types de module sont synthétisées dans le tableau ci-dessous (Azrat, 2008).

Tableau 20. Comparaison entre différents types de modules à membranes

	Géométrie			
	Plan	Spiralée	Tubulaire	Fibres creuses
Membranes	Organique en format rectangulaires ou en disque	Organiques	Organiques : monotubulaires Minérales la couche monotubulaire ou multicanaux	Organique séparatrice ou peau à l'intérieur ou à l'extérieur
Assemblage	Selon le principe de filtre-presse. Le côté rétentat se trouve entre les plaques portes membranes, qui sont séparées entre elles par des joints cadres. Le côté perméat se trouve dans la partie creuse de la plaque	Les membranes sont enroulées et collées sur un tube perforé avec des grilles flexibles pour séparer le côté rétentat du côté perméat	Assemblage de plusieurs membranes tubulaires parallèles séparées par des joints d'étanchement. Le côté rétentat se trouve à l'intérieur et le côté perméat à l'extérieur des tubes. L'ensemble est incorporé dans une enveloppe en matière plastique ou en acier inoxydable.	Le module consiste en un ou plusieurs faisceaux de fibres creuses empotés dans une résistance et assemblés dans une enveloppe en matière plastique ou en acier inoxydable
Surface filtrante par module industriel	Jusqu'à 100 m ²	Jusqu'à 30 m ²	Jusqu'à 25 m ²	Jusqu'à 74 m ²
Avantages	-Flexibilité du système modulaire -Faible consommation d'énergie	-compacité - Faible volume mort -faible consommation en énergie	-faible colmatage - facilité de nettoyage - traitement facile des produits visqueux	-compacité - faible volume mort Faible consommation en énergie
Inconvénients	-faible résistance thermique des matières plastiques - colmatage	-traitement difficile de produits visqueux - faible résistance thermique des matières plastiques - pertes de charge élevées - nettoyage difficile - colmatage	-volume mort important -forte consommation d'énergie - faible résistance thermique des matières plastiques	-traitement difficile de produits visqueux - colmatage - faible résistance thermique des matières plastiques

Aussi, la comparaison de ces modules est décrite dans le tableau ci-dessous.

Tableau 21. Comparaison des différents types de modules membranaires

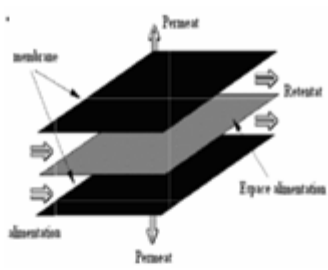
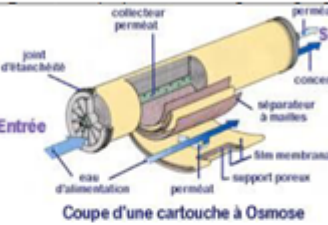
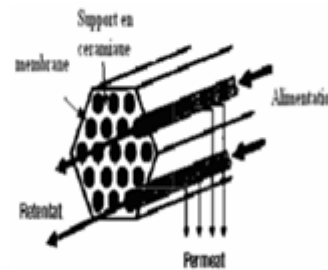
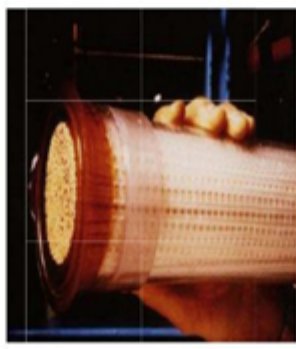
Forme de la membrane	Limitation	Conception dumodule
Plane	<ul style="list-style-type: none"> - Le manque de support de membrane adéquat. - La faible densité de compactage. - Offre une conception très robuste mais coûteuse. - Certains systèmes modernes tolèrent une très forte pression jusqu'à 100 bars [73]. 	 <p>La forme plane</p>
Spiralé	<ul style="list-style-type: none"> - Ce module contient de 1 à plus de 30 membranes, selon le diamètre et le type d'élément. - Chaque feuille est constituée de deux feuilles de membrane collées dos à dos avec un intercalaire de perméat entre elles - Cette configuration offre des coûts de remplacement significativement plus bas, une maintenance plus facile, une densité de conditionnement élevée et une application de pression plus élevée. - Un nettoyage difficile du module et la complexité de l'écoulement [72] 	 <p>La forme spiralé</p>
Tubulaire	<ul style="list-style-type: none"> - est la couche de support pour la membrane. - La fixation de la membrane à la couche de support est très faible - Un diamètre d'environ 5 à 15 mm - Un colmatage des membranes tubulaires est peu probable. - La densité de tassement est faible - Prix élevés par module [76]. 	 <p>La forme Tubulaire</p>
Fibre creuse	<ul style="list-style-type: none"> -Les membranes à fibres creuses sont de petites membranes tubulaires d'un diamètre inférieur à 2 mm. -La possibilité de colmatage est très élevée. -Ne peuvent être utilisées que pour le traitement de l'eau à faible teneur en suspension solides. -La densité de tassement est très élevée. -Haute densité, bon contrôle de la concentration de polarisation et de l'encrassement de la membrane, Faibles coûts d'exploitation et de maintenance, Production rentable[54, 77] 	 <p>La forme fibre creuse</p>

Tableau 22. Différentes géométries membranaires et quelques-unes de leurs caractéristiques

Tableau 2 – Différentes géométries membranaires et quelques-unes de leurs caractéristiques			
Géométrie et matériau	Rapport aire membranaire/ encombrement (m ² /m ³)	Particularités	Prétraitement
Plane – sur montage filtre-pressé Polymères et céramiques dans quelques cas	10 à 100	Adaptée aux pressions faibles Séparateurs souvent nécessaires dans les compartiments Changement possible membrane par membrane Démontage assez aisé Seule géométrie pour procédés électromembranaires	Préfiltration nécessaire surtout en présence de grilles de séparation des membranes
Plane spiralée Polymères exclusivement	100 à 1 000	Séparateurs indispensables Nettoyage et désinfection difficiles Adaptée aux pressions moyennes à élevées Mal adaptée aux débits de filtration élevés (clarification) Mal adaptée au traitement des suspensions	Préfiltration indispensable
Fibres creuses Polymères surtout et céramiques dans quelques cas	100 à 1 000	Autosupportée Régime laminaire et pression limitée Inadaptée aux suspensions	Préfiltration indispensable Écoulement laminaire
Tubulaire Céramique essentiellement Quelques cas de polymères	10 à 100	Autosupportée Régime turbulent la plupart du temps Très adaptée aux hautes pressions et aux suspensions	Préfiltration non nécessaire, mais risque d'abrasion si particules dures Écoulement turbulent

III.4. CARACTERISTIQUES DE LA MEMBRANE ET PERFORMANCE DE L'OI

III.4.1. Pression transmembranaire : PTM

La PTM est la force motrice qui permet le transfert à travers une membrane. Elle peut être définie par la différence de pression selon l'Équation 1 :

$$PTM = (P \text{ rétentat} - P \text{ perméat}) \quad (\text{equation 1})$$

Soit

PTM atmosphérique relative atmosphérique perméat relative

$$PTM = (P^{\circ} \text{ rétentat} + P \text{ atmosphérique}) - (P^{\circ} \text{ perméat} + P \text{ atmosphérique}) \quad (\text{Equation 2})$$

P : pression absolue (Pa, unité usuelle = bar = 10⁵ Pa)

P[°]: Pression relative qu'est lue au manomètre A l'exception de la microfiltration, dans la plupart des cas, le compartiment perméat est ouvert à l'air et donc à la pression atmosphérique (P[°]perméat = 0)

l'Équation 2 se réduit à l'Équation 3:

$$PTM = P \text{ rétentat} \quad (\text{Equation 3})$$

En raison des pertes de charges dans les modules, la pression dans le rétentat (Prétentat) chute entre l'entrée et la sortie de la membrane.

Il est donc nécessaire d'avoir des capteurs de pression en entrée et en sortie des modules et la pression moyenne du retentât P_{retmoy} est généralement utilisée.

III.4.2. Flux et perméabilité

III.4.2.1. Flux de perméat J_v et grandeurs associées :

C'est le débit à travers la membrane par unité de surface géométrique. Dans le cas d'une membrane poreuse, il peut être défini par la relation de Poiseuille en considérant que la membrane est un réseau de capillaires cylindriques de rayon constant et que l'écoulement y est laminaire.

III.4.2.2. Perméabilité hydraulique de la membrane : L_p

Afin de ne pas rentrer dans les détails de la structure de la membrane et sous, l'action de la PTM, le solvant entraîne sélectivement les solutés à travers la membrane. Le flux de solvant J_v , qui traverse la membrane est proportionnel à la pression transmembranaire selon la loi de Darcy : On définit la perméabilité hydraulique L_p (Équation I-6) qui est valable pour toutes les membranes.

$$J_v = L_p \times PTM$$

Avec

L_p : perméabilité hydraulique de la membrane ($m \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-1}$ ou $Lh^{-1} \cdot m^{-2} \cdot bar^{-1}$)
 PTM : pression transmembranaire (Pa)

Dans le cas de membranes poreuses, l'analogie entre (equation) permet d'explicitier L_p plus précisément.

La perméabilité hydraulique L_p n'est pas une caractéristique intrinsèque de la membrane car elle dépend du solvant via la viscosité du perméat qui est fonction de la température et du fluide (il est nécessaire de préciser la température à laquelle sont réalisées les mesures en raison de l'influence de celle-ci sur la viscosité du fluide).

$$J = L_p \times PTM = PTM / (n \cdot R) \quad I-7$$

n : viscosité dynamique du perméat ($Pa \cdot s$)

R : résistance hydraulique de la membrane (m^{-1})

$$R = 1 / (n \times L_p)$$

La résistance R de la membrane est la résistance que la membrane oppose au solvant. Elle est notée R_m pour la membrane neuve, et est une caractéristique intrinsèque de la membrane contrairement à

Lp. La perméabilité (water Lp) à l'eau d'une membrane est une caractéristique intrinsèque de la membrane qui dépend de sa structure.

La résistance hydraulique (Rm) d'une membrane peut être définie comme étant sa résistance à l'écoulement du fluide à filtrer à travers cette membrane. La résistance d'une membrane est reliée à sa perméabilité.

III.4.3. Le taux de rejet ou taux de rétention

Le taux de rejet donne le pourcentage des solutés (sel, macromolécule, particule) retenus par la membrane par rapport à la concentration de ces espèces dans la solution d'alimentation. Ainsi, le taux de rejet donne une idée sur la sélectivité de la membrane. Un taux de rejet de 1 signifie que le soluté est parfaitement retenu par la membrane (la concentration dans le perméat $C_p=0$) alors qu'un taux de rejet de 0 correspond à un soluté non retenu, concentration identique dans le perméat C_p et le retentât CR ($C_p=CR$).

Le taux de conversion

La conversion ou le rendement en eau du processus d'un système membranaire est par définition la proportion d'eau d'alimentation qui passe dans le courant de perméat.

Le taux de conversion est très variable en fonction de la qualité désirée, de la qualité de la ressource disponible, et en particulier du risque lié à la précipitation des sels minéraux en surface de membrane.

III.5. PARAMETRE DEFINISSANT LA PERFORMANCE DE L'OI

Plusieurs paramètres définissent les performances de l'OI.

i) Le principal est le taux de conversion Y

Le rapport entre le débit de perméat et le débit d'alimentation. Dans le cas de filtration d'eau de mer par OI, le taux de conversion est généralement compris entre 30 et 45%, et dans le cas des eaux saumâtres entre 65 et 85%.

i) Le taux de rejet apparent en sels

Le TR est le rapport de la différence de concentration en sels entre l'alimentation et le perméat sur la concentration en sels dans l'alimentation. On distingue le taux de rejet apparent (TRapp) du taux de rejet réel (TRréel) qui prend en compte la concentration en sel au voisinage de la membrane côté concentrat plutôt que la concentration dans l'alimentation.

Les taux de rejet apparents en OI sont généralement compris entre 99,4% et 99,8% pour les eaux de mer.

ii) Le facteur de concentration FC

Le FC donne une indication globale de la salinité des concentrats par rapport à l'alimentation, peut être défini comme suit (Greenlee et al., 2009):

Facteurs influençant la membrane

Effet du temps

Même en supposant les conditions idéales de fonctionnement de la membrane remplies, on observe un déclin du débit en fonction du temps. Ceci est dû au phénomène de compaction semblable à ce qui produit surtout plastique ou métal soumis à certains à certaines conditions de pression.

Effet de la température

La température de l'eau d'alimentation a une grande influence sur le débit, les calculs et les chiffres annoncés dans les notices sont établis pour une température de 20°C. on observe une augmentation de débit de 3%par degré au-dessus de cette température et une diminution de débit de 3%par degré en-dessous de cette température. Température maximale : 45°C Température idéale : 20°C

Effet de PH

Il faut se rappeler que la membrane est un ester et comme tel soumise à une hydrolyse à long terme. L'hydrolyse se traduit par une mauvaise réjection de sels.

Le taux et la vitesse d'hydrolyse sont fonction de la température et du PH de l'eau d'alimentation.

III.6. COLMATAGE DES MEMBRANES

III.6.1. Définition

Au-delà des phénomènes qui conduisent à une évolution des propriétés des membranes pour des raisons mécaniques (compression, fluage du polymère) ou chimique (vieillessement chimique du matériau membranaire à la suite d'exposition à des conditions acido-basiques ou oxydantes, mais ne sont pas liées directement au transfert à travers la membrane), le principal problème que rencontre le dessalement de l'eau de mer par OI est le problème de colmatage.

Le terme colmatage peut être défini comme l'ensemble des phénomènes physiques, chimiques et biologiques se produisant à l'interface membrane/solution ou dans le volume poreux (cf. figure ci-dessous), provoquant la modification des propriétés filtrantes d'une membrane, exceptée la compaction et les propriétés chimiques (Maurel, 1993).

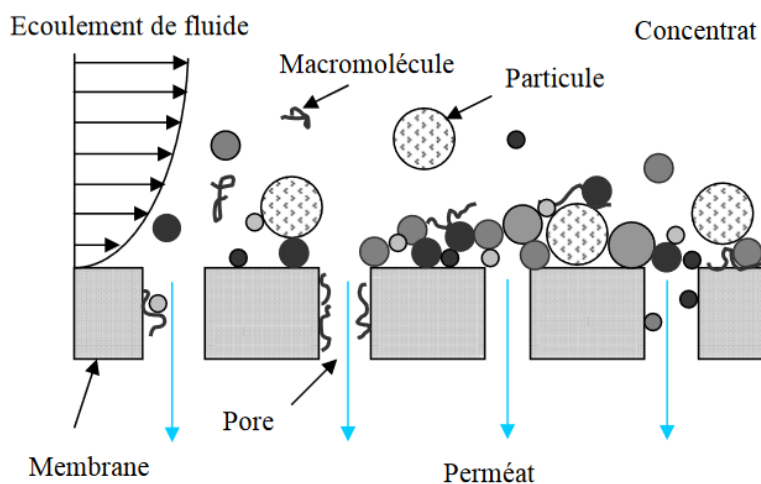


Figure 26 : Accumulation des différentes matières sur, dans et au voisinage de la membrane lors d'un écoulement tangential (source :Mallevalle, 1996)

En pratique, le colmatage résulte du passage de la matière de la phase liquide à la phase solide. Rejetée par la membrane, cette matière non transportée par le flux de concentrat s'accumule et forme dans le temps un dépôt sur et/ou dans la structure du matériau membranaire (Duafin, 1998 ;Sahachaiyunta et al., 2002 ; Visvanathan et al., 2002). Le colmatage peut résulter également des attractions entre solutés et/ ou entre soluté et membrane, le solvant à son tour peut être un facteur favorisant ces attractions (Mohammadi et al., 2003).

Le dépôt de matières entraîne la formation d'une couche à la surface de la membrane ce qui a pour conséquence de réduire le débit de filtration et donc les performances de l'opération.

Indice de colmatage : Nommé en anglais "Fouling Index", cet indice permet de définir et de chiffrer le caractère plus ou moins colmatant d'une eau, c'est-à-dire sa teneur en éléments colloïdaux (entre 0,5 et 0,9 μm) par détermination du degré de colmatage d'une surface poreuse (membrane) de 0,45 μm de porosité.

On peut calculer l'indice de colmatage par la mesure de la différence de temps d'écoulement prise entre 200ml et 400ml.

L'origine des dépôts peut être variée (Aimaret Aptel):

- Concentration trop élevée (soit la concentration moyenne, soit les surconcentrations locales dues aux phénomènes de polarisation) ;
- Présence de matières en suspension qui se déposent sur les membranes par suite de conditions hydrodynamiques favorables (vitesses faibles) ;
- Réaction d'adsorption entre certaines molécules et le matériau membranaire.

III.6.2. Type de Colmatage

Généralement, les quatre principaux types de colmatage se produisant sur une surface membranaire d'osmose inverse, qui peuvent d'ailleurs apparaître simultanément, sont : le colmatage inorganique, le colmatage organique, le colmatage par les matières colloïdales et le bio-colmatage « biofouling » (Visvanathan et al., 2002 ; Vrouwenvelder et al., 2003).

a) Le colmatage organique-

Le colmatage organique nommé aussi « fouling » correspond au dépôt organique tels que les matières en suspension, les acides humiques et fulviques à la surface des membranes. Le dépôt peut contenir de l'huile, protéines, acides humiques dissous. Les dépôts rencontrés le plus fréquemment en dessalement sont principalement la matière organique naturelle, en particulier aux substances humiques constituées de macromolécules qui possèdent un noyau hydrophobe et des groupements anioniques (chargées négativement) (Tamas, 2004).

On peut distinguer deux types d'agents colmatants en fonction de la taille et la nature chimiques :

i) Les composés de poids moléculaire élevé peuvent agir comme des particules et obstruent les pores des séparateurs. Cette obstruction peut être aggravée par la présence des particules minérales telles que l'argile, et les hydroxydes métalliques.

ii) les composés de faible poids moléculaire colmatent les surfaces membranaires par des interactions chimiques, par exemple, les chlorophénols adhèrent sur la surface membranaire par des liaisons hydrogènes ce qui peut provoquer des pertes remarquables en flux de perméat et ce même pour de faibles concentrations.

Le colmatage par dépôt induit souvent une augmentation de la pression différentielle normalisée (perte de charge longitudinale côté concentrat) (Henthorne et Boysen, 2015). L'analyse de cette pression peut aider à prévenir ce type de colmatage. Des rinçages à l'eau à forte vitesse et faible pression peuvent être efficaces pour éliminer ce type de colmatage si les composés du dépôt ne se sont pas adsorbés sur la membrane.

b) Le colmatage par entartrage

Le colmatage inorganique, ou encore appelé encrassement ou entartrage « scaling » qui correspond au dépôt de matériaux inorganiques cristallisant à la surface des membranes lorsque la limite de solubilité des composés inorganiques est dépassée.

Les dépôts rencontrés le plus fréquemment en dessalement sont principalement constitués de carbonate de calcium (CaCO_3), de sulfate de calcium (CaSO_4), de sulfate de baryum (BaSO_4), de sulfate de strontium (SrSO_4), de phosphate de calcium ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), d'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) et de composés à base de silice (Sweity et al., 2014-). En effet, si l'un de ces sels est rejeté par une membrane d'osmose inverse, sa concentration peut dépasser la limite de solubilité et il précipite sur la surface membranaire soit seul, soit en combinaison avec d'autres espèces présentes dans la solution, et par conséquent un dépôt se forme causant un encrassement particulière (Sahachaiyunta et al., 2002 ; Aimar et Aptel).

L'entartrage peut être prévenu par différents traitements chimiques tels la vaccination acide ou l'utilisation d'antitartre spécifique.

Il est également possible que ce dépôt puisse se produire par les effets locaux de la température, du pH de la solution d'alimentation ou par la présence d'autres substances comme dans le cas du colmatage par la silice (Aimar et Aptel).

c) Le colmatage particulaire (Colloïdal)

Le colmatage particulaire est dû à l'accumulation des particules colloïdales sur la surface membranaire ou à l'intérieur des pores. Cette accumulation engendre une résistance hydraulique additionnelle à l'écoulement de l'eau à travers la membrane, ce qui réduit le taux de perméation c'est à dire le flux convectif du perméat.

Les colloïdes peuvent être de nature organique ou inorganique, leur dimension varie entre quelques nanomètres et quelques micromètres.

Les dépôts rencontrés le plus fréquemment en dessalement sont principalement l'argile, les colloïdes de silice, le Fer, l'aluminium, l'oxyde de manganèse, les colloïdes organiques et les précipités du carbonate de calcium.

Ce type de colmatage colloïdal affecte la quantité et la qualité du produit en impactant le flux de perméat et la teneur en solutés (Zhu et al., 1997).

d) lebiocolmatage (biofouling en anglais)

Le biocolmatage est dû à une croissance microbienne sur la surface de séparation des membranes et dans les éléments constituant les modules. Plus précisément, le biocolmatage, d'origine microbiologique, correspond au dépôt, à l'adhésion et à l'accumulation de micro-organismes qui sécrètent notamment in situ des substances polymériques extracellulaires participant à la formation d'un biofilm. Ainsi, La matrice bactérienne s'établit sur la surface membranaire en absorbant et concentrant les nutriments solubles près des parois cellulaires afin de permettre à ces dernières de proliférer (Visvanathan et al., 2002). La prolifération entraîne la formation d'un film biologique « biofilm » qui s'adsorbe sur la surface de la membrane et sur les séparateurs.

Ce type de colmatage est un phénomène majeur en OI. La plupart des auteurs considèrent que le biocolmatage est le type de colmatage le plus difficile à maîtriser en conditions réelles (Vrouwenvelder, 2001 ; Habimana et al., 2014).

III.6.3. Principales origines du colmatage

Un très large spectre d'espèces peut contribuer au colmatage, comme des macromolécules organiques, des substances organiques et inorganiques dissoutes, des particules colloïdales, des particules en suspension et des microorganismes. Le tableau 3.1 regroupe les différentes espèces et leurs mécanismes de colmatage (Caetano et al. 1995).

Tableau 23. Les substances typiques responsables du colmatage des membranes.

Colmatage	Cinétique
Précipités (CaSO ₄ , CaCO ₃ , BaSO ₄ , SrSO ₄)	Lente
Hydroxydes de métaux (Fe, Mn, Al)	Rapide et irréversible
Colloïdes	Lente
Microbiologique	Rapide ou lente

Il existe plusieurs mécanismes de colmatage qui, dans la pratique, sont généralement présents simultanément. On distingue habituellement quatre phénomènes qui peuvent être à l'origine du colmatage des membranes, en séparation liquide-solide.

a) Adsorption

L'adsorption se produit sous l'effet d'interactions entre certains constituants du fluide et la membrane. L'adsorption est un phénomène physico-chimique qui peut prendre place en l'absence même de convection (de filtration donc), et se traduit normalement par le dépôt d'une monocouche de solutés sur les parties du matériau qui lui sont accessibles. De manière générale peut modifier la charge apparente du matériau (adsorption de chlorures ou d'ions calcium)

L'adsorption peut intervenir aussi bien à la surface de la membrane qu'à l'intérieur des pores, et contribue donc à la fois au colmatage externe et au colmatage interne (Duafinet al., 1998). L'adsorption sur une membrane dépend de la nature physicochimique du matériau (les protéines s'adsorbent davantage sur une membrane hydrophobe), du type de molécules, du pH (point isoélectrique, pH_i , pour les protéines), et de la présence des cations spécifiques tels que le calcium. L'adsorption d'un soluté pénétrant par diffusion dans les pores de la membrane, peut se produire sur la surface interne des pores, dont l'aire est bien supérieure à l'aire externe de la membrane.

Ainsi, la diffusion du soluté dans le pore contrôle les cinétiques d'adsorption dépendant aussi des conditions opératoires de la filtration (Duafinet al., 1998). L'augmentation de la concentration des solutés retenus à la paroi par polarisation de concentration, déplace l'équilibre et accélère les cinétiques d'adsorption. L'adsorption des composés peut influencer le caractère hydrophile du matériau membranaire, qui à son tour induit les variations du flux de perméat (Schäfer et al., 2000).

Un bon moyen pour évaluer la compatibilité des membranes avec un fluide à traiter est donc de mettre ces membranes en contact avec le fluide et de mesurer leur perméabilité avant et après cette mise en contact. Une comparaison des résultats obtenus avec quelques membranes peut ainsi guider un premier choix vers un (des) matériau(x) ayant une bonne compatibilité avec le fluide traité.

b) Capture de particules

Un deuxième phénomène à l'origine du colmatage est bien entendu la capture de particules par le milieu poreux : entraînées par le liquide qui filtre à travers la membrane, les particules dont la taille est de l'ordre de grandeur de celle des pores ou supérieure ont tendance à se bloquer à la surface, à l'entrée ou dans les pores, entraînant une obstruction totale ou partielle de ces derniers, et donc une augmentation de la résistance finale de la membrane. Ce phénomène est marqué et important dans les systèmes très dilués, comme les derniers étages de traitement qui permettent d'obtenir de l'eau ultrapure dans les industries de la microélectronique, par exemple.

c) Changement d'état des fluides

Un troisième mécanisme qui conduira à l'apparition d'un dépôt de matière sur ou dans le filtre correspond à un changement d'état des solutions ou dispersions sur concentrées au voisinage de la membrane et qui peuvent, comme évoqué à propos du modèle du gel, former une phase gel ou solide, qui se dépose, obstruant, totalement ou partiellement, le milieu poreux.

Le changement d'état des fluides inclut un phénomène particulièrement gênant en osmose inverse, à cause des concentrations élevées qui y sont rencontrées et de la complexité de la physico-chimie des eaux.

d) Formation de biofilms

Plusieurs paramètres influencent la formation et la croissance d'un biofilm, parmi lesquels le type de bactéries et microorganismes présents, et particulièrement les bactéries planctoniques, mais aussi la concentration en nutriments. Les microorganismes peuvent se multiplier même si leur nombre est fortement réduit, et ils ne le feront que si des nutriments sont disponibles pour apporter de l'énergie et pour la biosynthèse cellulaire.

La matière accumulée selon les mécanismes évoqués ci-dessus est une condition favorable à l'ancrage de micro-organismes sur les membranes ou dans les modules, et on peut alors assister à la croissance d'un biofilm qui lui aussi augmente la résistance hydraulique, dégrade les membranes (acétate de cellulose, en particulier) ou contamine le perméat.

Ces micro-organismes, à la différence d'autres sources de colmatage, se multiplient rapidement, même à partir de colonies très affaiblies et en présence de peu de nutriments.

III. 6.4. Les conséquences de colmatage

Les conséquences principales du colmatage sont répertoriées comme suit :

- ✓ Diminution de la durée de vie de la membrane due au lavage plus fréquent.
- ✓ Dépense supplémentaire de l'énergie liée à l'augmentation de la résistance au transfert.
- ✓ Perte de productivité (diminution de la conversion).
- ✓ Diminution de la sélectivité (taux de rétention).

i) Diminution du flux de perméat

Quand un système membranaire opère à pression transmembranaire constante, la conséquence la plus problématique du colmatage est une diminution, parfois extrêmement accentuée, du flux de perméation dans le temps. La diminution du flux perméasique est décrite mathématiquement par la

généralisation de l'équation de Darcy pour le cas où la résistance au flux est produite par la membrane et les matières accumulées au voisinage, sur et dans la structure de la membrane (Mallevalle, et al., 1996).

ii) Variation de la sélectivité (taux de rétention)

Le colmatage ne provoque pas seulement les pertes en flux de perméat, il entraîne une variation de la sélectivité de la membrane (Maurel, 1993 ; Hoek et al., 2003). Ainsi, Lee et al. (Lee et al., 2004), dans une étude de l'influence du colmatage colloïdal et du taux de conversion sur le taux de rejet des membranes d'osmose inverse et de nanofiltration, ont trouvé que le taux de rejet diminue progressivement avec l'intensité du colmatage. Lee attribue cette diminution à l'augmentation de la concentration près de la surface membranaire, formant un dépôt de colloïdes qui affecte par la suite le mécanisme de transfert des sels.

D'autre part, Ng et al. (Ng et Elimelech, 2004) ont rapporté que le colmatage des membranes d'osmose inverse par l'hydroxyde de fer provoque une diminution en rejet de sels; tandis que le colmatage par les substances humiques a comme conséquence une amélioration du rejet des sels. Ils ont rapporté également que la diminution du taux de rejet, même faible, peut compromettre la qualité et l'utilisation du produit pour les différentes applications.

Il ressort que l'augmentation ou la diminution de la sélectivité, est fonction des conditions d'opération et des solutions traitées.

g) Augmentation de la perte de charge

L'augmentation de la perte de charge résulte de la résistance du dépôt qui présente une faible perméabilité. Pour vaincre cette résistance, on a souvent recours à l'augmentation de la pression pour maintenir un taux de production constant. Donc le colmatage conduit à l'augmentation du coût d'opération par une consommation excessive d'énergie. Une détérioration des éléments membranaires est probable si la pression recommandée par le fournisseur est dépassée (Tamas, 2004).

Dégradation des membranes

Dans le cas du biocolmatage, les microorganismes génèrent des sous-produits acides issus du métabolisme bactérien ; ces produits se concentrent sur la surface causant la dégradation de certains types de matériaux membranaires (Aleem et al., 1998 ; Amjad et al., 1998). Parallèlement à l'action bactérienne, les membranes peuvent être dégradées par les agents chimiques tels que les acides forts qui hydrolysent le polymère constituant la membrane (Cheng, 1990).

D'autres conséquences directes ou indirectes du colmatage sont une diminution de la vie active des membranes, des lavages plus fréquents, et donc des consommations de produits chimiques plus importantes, et des dépenses supplémentaires d'énergie pour compenser la baisse de perméabilité des membranes causée par le colmatage (Tamas, 2004).

A titre illustratif, la formation de biocolmatage peut induire les conséquences suivantes (Flemming, 1997):

- résistance membranaire augmentée et donc production de perméat diminuée,
- consommation énergétique augmentée,
- augmentation de la résistance à l'écoulement tangentiel à la membrane,
- inhibition du transfert par convection à proximité de la membrane,
- polarisation de concentration induite par la réduction du flux tangentiel,
- diminution du taux de rejet en sel,
- dégradation microbienne éventuelle des membranes,
- diminution de la durée de vie du module d'OI en raison des lavages chimiques répétés.

Par ailleurs, cela engendre l'augmentation des coûts d'exploitation en raison de :

- la perte de production,
- l'altération de la qualité du produit,
- l'augmentation des coûts énergétiques,
- l'augmentation de la fréquence des lavages chimiques,
- l'augmentation de la fréquence de remplacement des modules.

Les conséquences du colmatage sur le fonctionnement d'une unité de dessalement sont importantes et diverses:

- augmentation de la perte de charge par suite de la diminution des sections de passage de l'eau à traiter
- entartrage par suite d'une augmentation localisée de la concentration en sels de l'eau à traiter ;
- attaque chimique éventuelle des métaux (corrosion) ou des membranes (acétate de cellulose) par des composés acides produits par les bactéries (acides organiques en général) ;
- diminution du flux de perméat, ce qui provoque l'augmentation de la pression transmembranaire de travail;
- augmentation des fréquences des nettoyages chimiques et donc des quantités d'agents chimiques utilisés ;
- diminution de la durée de vie des membranes.

Tous ces impacts ont des conséquences économiques, puisqu'ils entraînent une augmentation des coûts de production, de maintenance, ce qui se traduit par une hausse du prix de l'eau en sortie de l'usine. Il est primordial pour les industriels de limiter les coûts et par conséquent de trouver des solutions pour réduire le colmatage des membranes.

Le tableau ci-dessous indique, en fonction de l'évolution des paramètres opératoires, la nature du dépôt et du problème (Lueck, 2000).

Tableau 24. Nature des dépôts et leur influence sur les paramètres de fonctionnement d'un osmoseur.

Débit de perméat	Passage de sels	Pression différentielle	Cause directe	Cause indirecte
↓	↑	↑	Entartrage	Mauvaise injection d'antitartres : dosage et qualité
↓	↑	↑	Salissement colloïdal	Prétraitement insuffisant
↓	→	↑	Salissement biologique	Eau d'alimentation de qualité douteuse Prétraitement insuffisant
↓	→	→	Salissement organique	Dosage excessif de polymères, présence d'huiles, présence de matières organiques

III. 6.5. Stratégies de lutte contre le biocolmatage

Le développement du colmatage est difficile à éviter totalement lors d'opérations de filtration tangentielle ou d'osmose inverse. Une interruption de production périodique pour nettoyage est une solution qui génère des pertes en temps, coûte en lessives et en retraitement des effluents.

De nombreuses stratégies sont développées face au problème de colmatage, et nous n'en citerons ici que quelques-unes.

III.6.5.1. Nettoyage

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

a) Retro-lavage

Les retro-lavages sont nécessaires au moment de la filtration pour le but de limiter l'accumulation du dépôt sur les membranes. Leurs principes est basé sur l'envoi de l'eau filtre avec de l'air dans le sens inverse de filtration de la matière en enlevant les particules accumulées à la surface de la membrane.

Ce qui consiste l'eau de mer le rétro-lavage des membranes d'osmose inverse est effectué dans toutes les 60 minutes par 24 heures. La durée de ce traitement est généralement entre 30 et 60 secondes une à deux fois par jour. Pour améliorer le rétro-lavage et limiter le biocolmatage de la membrane on ajoute de Chlore (entre 25 et 100 mg/l).

b) Le nettoyage chimique

Le nettoyage chimique nécessite un arrêt de production périodique, génère des couts en solution de lavages et en traitement des effluents. Il se compose d'une séquence de lavage acide et basique, ainsi que de phase de rinçage.

Le nettoyage chimique des membranes demeure la solution de recours lorsque le colmatage irréversible.

L'ajout du Chlore ou le rétro-lavage optimisé n'est pas suffisant et efficace pour enlever complètement les particules accumulées à la surface des membranes. Il est nécessaire de faire un nettoyage chimique par l'ajout du l'Acide Citrique (Ph faible), la Soude (NaOH) et l'eau de Javel (NaOCl)..

Pour le contrôle du biocolmatage en dessalement d'eau de mer par OI, plusieurs désinfectant sont utilisés (Kim et al., 2009). Le plus courant est l'utilisation de l'hypochlorite de sodium (NaOCl) libérant de chlore libre (HOCl, OCl-).

Dans certains domaines comme le domaine alimentaire, les nettoyages et les désinfections ainsi que leurs fréquences sont imposées réglementairement.

Les nettoyages en place (nommé NEP) sont en général menés à l'aide de formulations disponibles dans le commerce et dont les compositions ont été adaptées par les fabricants à diverses familles d'applications.

Le tableau 25 donne les éléments essentiels qui entrent dans la composition des formulations commerciales et leurs fonctions. Les utilisateurs peuvent également mettre au point leurs propres procédures de nettoyage, en respectant quelques règles simples.

Tableau 25. Familles de composants utilisés pour le nettoyage de membranes, fonctions principales et risques associés

Tableau 3 – Familles de composants utilisés pour le nettoyage de membranes, fonctions principales et risques associés			
Agent de nettoyage	Action supposée	Conditions d'usage	Risques
Solutions alcalines (hydroxydes)	Hydrolyse des protéines, saponification de graisses	pH > 12 40 °C < T < 80 °C	Matériaux polymères (acétate de cellulose, greffages et modifications diverses) peuvent ne pas supporter ce type de traitement
Solutions acides (acide nitrique, sulfurique, chlorhydrique)	Dissolution de sels précipités et dépôt d'hydroxydes	20 °C < T < 50 °C	Corrosion des pompes, capteurs, joints ; dégradation des membranes
Enzymes (papaine, protéases, chymotrypsine, etc.)	Dissolution des protéines et des matières organiques ; pour membranes ou systèmes ne supportant pas les lavages alcalins	0,01 à 0,1 % en masse 40 °C	Dégradation de membranes, difficultés d'élimination au rinçage
Tensioactifs	Élimination des matériaux hydrophobes, peu ou non hydrosolubles		Modification des propriétés de surface des membranes
Complexants	Élimination de cations multivalents et d'ions	Couplés avec un lavage acide	Risques alimentaires
Désinfectants (peroxydes, métabisulfite, hypochlorite)	Destruction de micro-organismes et de biofilms Nettoyage de matière organique (effets oxydants)	Concentration en hypochlorite : 5 à 40 ppm pH préférentiellement alcalin	Corrosion (oxydation) Vieillessement de matériaux

Les nettoyages acides, destinés à dissoudre les sels précipités (hydroxydes et autres) doivent en général être menés en premier. Ils sont généralement suivis de nettoyages alcalins destinés à hydrolyser les matières protéiques ou à saponifier les graisses.

c) Le nettoyage physique :

Le principe du nettoyage mécanique consiste à décoller et retirer la matière accumulée sur la membrane par des forces mécaniques. Le nettoyage mécanique avec une balle de mousse est employé uniquement pour les modules tubulaires et pour le colmatage avec la matière organique des eaux de surface.

d) Le nettoyage enzymatique

Ce type de nettoyage constitue une alternative aux traitements chimiques. Il peut être appliqué dans le cas de membranes sensibles aux réactifs chimiques, au pH ou à la température élevée, ainsi que dans les cas de colmatage avancé (ARZATE, 2008).

III.6.5.2. Prétraitement

Une autre stratégie de lutte contre le colmatage est la mise au point de prétraitements avant OI (Matin et al., 2011). Ainsi, le prétraitement est une étape indispensable à considérer avant de procéder au traitement de l'eau de mer (Voutchkov 2010a,b ;Henthron, 2007-), car il permet de limiter l'accumulation de particules, de sels et de matières organiques sur les membranes.

Les stratégies de prétraitements (Henthorne et Boysen, 2015) peuvent consister à éliminer au maximum leurs nutriments.

Il existe de nombreuses configurations de prétraitements. Tous impliquent la coagulation-floculation et la séparation des particules. Les procédés de séparation des particules (Edzwald et Haarhoff, 2011) peuvent consister en une :

- (1) filtration directe avec milieu granulaire ;
- (2) sédimentation et filtration sur média granulaire ;
- (3) sédimentation et filtration sur membrane à basse pression ;
- (4) flottation à l'air dissous (DAF) et filtration sur média granulaire ;
- (5) DAF et filtration sur membrane à basse pression.

On distingue aujourd'hui deux filières de prétraitement avec OI pour le dessalement des eaux : la filière dite conventionnelle, encore utilisée majoritairement et la filière membranaire, plus récente, qui s'est développé.

Procédés de prétraitement conventionnels

Le prétraitement basé sur des procédés conventionnels (coagulation-floculation -filtration sur medias) est l'approche la plus couramment appliquée à l'heure actuelle (Voutchkov, 2013).

Les procédés conventionnels tels que la coagulation, la floculation, la décantation, la désinfection par le chlore ou par les rayons UV et la filtration sur sable et sur charbon actif, sont actuellement appliqués (Visvanathan et al., 2002).

La filière de prétraitement conventionnel consiste typiquement en la succession d'étapes schématisés dans la figure ci-dessous.

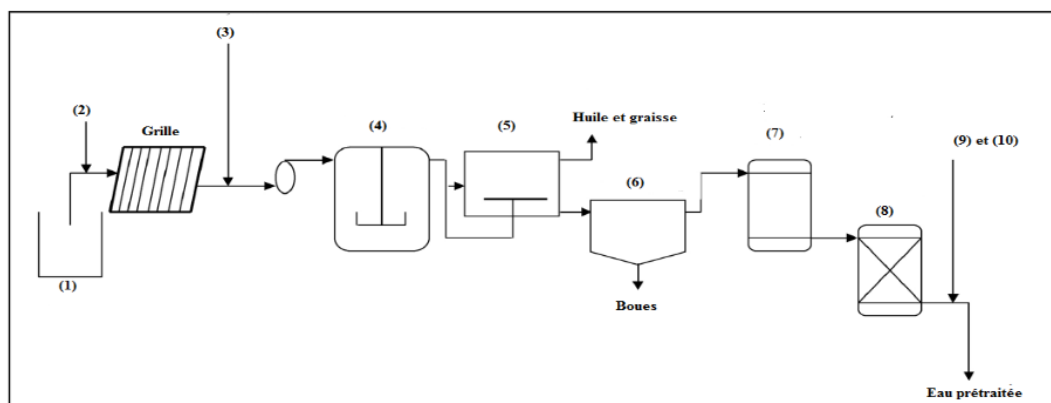


Figure I.4. Prétraitement conventionnel (Kavitha, 2019)

(1)Eau brute ; (2) Désinfection ; (3) Acidification ; (4) Coagulation et Floculation ; (5) Flottation ; (6) Sédimentation ; (7) Filtration sur médias ; (8) Filtration à cartouche ; (9) Déchloration ; (10) ajout d'antitartre

Figure 27 : Prétraitement conventionnel (Source Kavitha, 2019)

a) L'adoucissement

Le procédé d'adoucissement par la chaux (à froid ou à chaud), et l'utilisation des résines échangeuses de cations, sont parmi les procédés communément utilisés pour réduire la dureté de l'eau alimentant les membranes d'osmose inverse.

b) Ajout d'acides

Le dosage d'un acide minéral, à savoir l'acide sulfurique et l'acide chlorhydrique, est parmi les plus anciens traitements utilisés (Vrouwenvelder et al., 2000). Ces traitements peuvent empêcher l'encrassement par les carbonates de calcium. L'injection de l'acide sulfurique dans l'eau d'alimentation permet de réduire son alcalinité et d'éviter la précipitation des carbonates de calcium.

La Tableau ci-dessous propose une synthèse bibliographique succincte concernant l'utilisation du prétraitement conventionnel avant OI. Le tableau synthétise particulièrement l'influence du prétraitement sur la qualité de l'eau en matière de SDI15min et, quand cela a été possible, en matière de taux d'élimination en COT et quantité de bactéries. De plus, lorsque cela a été étudié, l'impact du prétraitement sur les performances de l'OI a été relevé.

Tableau 26. Synthèse bibliographique succincte des principales études du prétraitement conventionnel avant OI d'eau de mer réelle.

Auteurs	Eau de mer	Echelle- Procédés de prétraitement	Qualité de l'eau prétraitée	Influence sur l'OI
Al-Sheikh, 1997	Mer Rouge (Arabie Saoudite)	Industrielle- - Coagulation + Chlore + Filtres granulaires bicouches + antitartres	SDI ₁₅ variable parfois > 6	Colmatage organique et biologique + dégradation des membranes d'OI avec l'utilisation du chlore
Winters, 1997	Golfe du Mexique (Iles Caïmans)	Pilote- conventionnel	Non rétention des MODs	Colmatage organique intensif des membranes d'OI
Brehant et al., 2002	Mer Méditerranée (Espagne)	Industrielle - coagulation + chlore + filtres granulaires bicouches + antitartres	SDI ₁₅ < 4	-
Glueckstern et al., 2002	Mer Méditerranée (Israël)	Industrielle - coagulation + chlore + filtres granulaires bicouches + antitartres	SDI ₁₅ > 2,5	Prétraitement conventionnel non satisfaisant pour qualité d'eau brute particulièrement chargée en particules et MODs
Chua et al., 2003	Mer de Chine (Singapour)	Pilote - coagulation + antitartre + filtre granulaire	SDI ₁₅ = 4 en moyenne	-
Bonnelye et al., 2004	Golfe Persique (Arabie Saoudite)	Industrielle – Coagulation + flottation	0,25 NTU SDI ₁₅ < 3	Taux de conversion maximal en OI de 35%
Leparc et al., 2007	Mer Méditerranée (Espagne)	Industrielle - coagulation + chlore + filtres granulaires bicouches + antitartres	SDI ₁₅ < 3 Rétention des algues Non rétention des bactéries et des MODs	3 nettoyages chimiques nécessaires en 1 an mais très faible concentration en COT dans l'eau brute (< 0,8 mg.L ⁻¹)
Lorain et al., 2007	Mer Méditerranée (France)	Industrielle - coagulation + filtre à sable	SDI ₁₅ = 6 en moyenne	Diminution de la perméabilité de la membrane d'OI de 28% en 30 jours

Procédés non conventionnels dits membranaires

Dans le cas des procédés non conventionnels, l'étape de filtration est remplacée par des membranes poreuses au lieu du filtre à sable. La microfiltration sur membranes fibres creuses est, jusqu'à maintenant, la technique la plus utilisée en prétraitement avant l'osmose inverse. Cependant, les membranes d'ultrafiltration (0,01 – 0,1 µm) commencent à être préconisées dans les prétraitements d'eau de mer préférentiellement aux membranes de microfiltration (10 – 0,1 µm). En effet, plusieurs études ont montré que l'ultrafiltration permet d'obtenir de meilleurs résultats en termes de qualité d'eau et de performances hydrauliques (Vial et Doussau, 2003 ; Brehant et al., 2002 ; Van Hoof et al., 2001). Il existe deux modes de filtration membranaire:

- filtration sous pression ;
- filtration sous vide avec des membranes immergées.

Tableau 27. Synthèse bibliographique succincte des principales études du prétraitement avant OI d'eau de mer réelle par MF (PVDF : Polyfluorure de Vinylidène ; PES : Polyethersulfone)

Auteurs	Eau de mer	Echelle- Caractéristiques UF	Qualité du perméat UF	Influence sur l'OI ou commentaire sur la MF
Chua et al., 2003 / Teng et al., 2003	Mer de Chine (Singapour)	Pilote- Fibres creuses PVDF – 0,1 µm	SDI ₁₅ < 4	Forte augmentation de la PTM de la MF
Vial et Doussau, 2003	Mer Méditerranée (France)	Pilote- Fibres creuses PVDF – 0,1 µm	SDI ₁₅ < 3	-
Jeong et al., 2011	Golfe de Masan (Corée du Sud)	Pilote- Fibres creuses PVDF – 0,05 µm	< 0,1 NTU SDI ₁₅ < 4	En comparaison avec prétraitement conventionnel, taux de conversion de 53% au lieu de 38% pour même pression et taux de rejet supérieur (99% au lieu de 98%).
Al- Mashharawi et al., 2012	Mer Rouge (Arabie Saoudite)	Pilote- Fibres creuses PES – 0,1 µm	< 0,2 NTU SDI ₁₅ < 3 Elimination de 14 % du COT voire 45% avec coagulant FeCl ₃ , 3ppm	-

III.7. FONCTIONNEMENT D'UNE INSTALLATION DE DESSALEMENT PAR L'OSMOSE INVERSE

La filière de traitement d'une station de dessalement d'eau de mer est composée de 4 postes schématisé dans la figure ci-dessous : une prise d'eau, un prétraitement, le procédé de dessalement et le post-traitement (Maurel, 2006-).

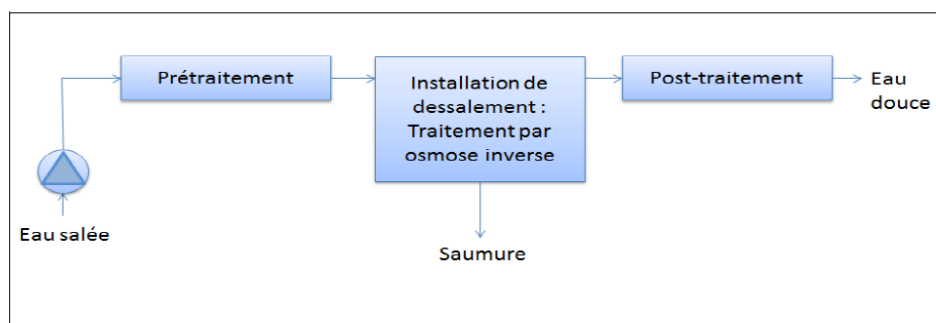
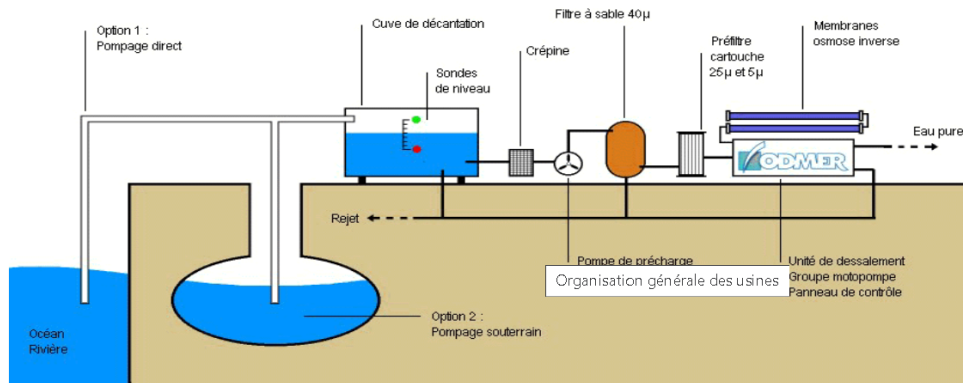


Figure 28 : Schéma général d'une installation de dessalement (source : Maurel, 2006)



Sources : Gilles Morvan, ingénieur en procédés de dessalinisation et process. Responsable ingénierie de la sté Odmer. (http://www.lesnouvelles.org/P10_magazine/16_analyse/16026_dessalinisation.html)

Figure 29 : Conception moderne d'une installation de production d'eau purifiée pompage-le stockage et le tamisage

III.7.1. Poste de prise d'eau : Le pompage-le stockage et le tamisage

a) le pompage

La première étape du processus de potabilisation consiste à pomper l'eau dans son milieu naturel afin de l'acheminer jusqu'à la station.

Lorsque le relief naturel n'est pas adapté, il faut relever les eaux au niveau de l'usine par le biais de pompes ou d'une vis d'Archimède. Cette vis est en réalité une hélice tournant autour de son axe dans une goulotte, permettant ainsi le déplacement des liquides.

Acheminée à la station, l'eau est, ensuite, dégrillée à différents niveaux, comme pour l'assainissement. Elle traverse une première grille, destinée à arrêter les gros corps flottants et à éliminer ainsi les plus gros déchets : c'est le pré dégrillage. Puis, l'eau subit un dégrillage moyen. Enfin, un dégrillage fin est effectué. Suivant les caractéristiques de l'eau à traiter, les différentes grilles peuvent être placées les unes derrière les autres ou séparément.

On distingue les grilles à nettoyage manuel et les grilles à nettoyage automatique. Cet équipement doit être correctement dimensionné de façon à obtenir une vitesse de passage suffisante pour plaquer les déchets contre les grilles afin qu'ils ne soient pas ré-entraînés.

b) Le stockage

Après avoir été dégrillée, l'eau rejoint un bassin de stockage de forte capacité afin de parer aux éventuelles pollutions ou pointes de consommation. Ce stockage est souvent doté d'une autoépuration

naturelle provenant des rayons du soleil, de la faune et de la flore présentent dans le bassin. L'eau pompée reçoit un traitement de pré désinfection au chlore ou à l'ozone permettant de diminuer le taux de bactéries.

c) Le tamisage

L'eau est, ensuite, épurée à l'aide d'un tamis rotatif dont l'écartement des mailles sont compris entre 6 et 0,5 mm. Le fonctionnement est simple : la vitesse du flux est réduite par une boîte d'alimentation. L'eau passe sous une lame siphonide qui élimine les turbulences avant que les liquides et les solides en suspension soient au contact du tamis rotatif. Les solides restent à la surface externe du filtre et sont retirés par une lame. L'effluent traverse le tamis cylindrique de l'intérieur vers l'extérieur assurant ainsi l'auto-nettoyage. Son action est complétée par une rampe de lavage.

III.7.2. Le poste de Prétraitement

III.7.2.1. Objectifs du prétraitement

Le prétraitement est une étape indispensable à considérer avant de procéder au traitement de l'eau de mer (Voutchkov 2010a,b ;Henthron, 2007-), car il permet de :

- i)* limiter l'accumulation de particules, de sels et de matières organiques sur les membranes. Et par conséquent d'éviter le colmatage des modules par les matières en suspension (MES), soit par les micro-organismes, soit par les dépôts de sels.
- ii)* Donner à l'eau des caractéristiques qui soient compatibles avec la nature des membranes: teneur en chlore, pH, température.

Ainsi prétraitement est approprié pour chaque type de colmatage. Le tableau ci-dessous décrit les différents types de colmatage et le prétraitement approprié

Tableau 28. Les différents types de colmatage et prétraitement appropriés

Colmatage	Cause	Prétraitement approprié
Biologique	Bactéries, micro-organismes, virus, protozoaires	Chloration
Particulaire	sable, argile (turbidité, solides en suspension)	Filtration
Colloïdal	Complexes organiques et inorganiques, particules colloïdales, micro-algues	Coagulation + Filtration Optionnel: Floculation/décantation
Organique	Matière Organique (MO): acides humiques et flaviques, bio polymères	Coagulation + Filtration + Adsorption sur charbon actif Coagulation+ Ultrafiltration
Minéral	Calcium, Magnésium, Barium ou Strontium, sulfates et carbonates Anticalcaire	Acidification
Oxydant	Chlore, Ozone, KMnO4	(méta) bisulfite de soude Charbon Actif en Granulés

Le prétraitement dépend de plusieurs paramètres :

- les caractéristiques physico-chimiques de l'eau à traiter : MES, turbidité, COT (Carbone = organique total), hydrocarbures, algues, composition chimique, pH.
- les conditions de fonctionnement des membranes: taux de conversion, pression.
- les types de membranes et de modules utilisés.

III.7.2.2. Étapes du prétraitement

Les étapes clé du prétraitement sont synthétisées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 29. Prétraitement de l'eau de mer avant osmose inverse

1. Chloration	Traitement choc : 7 à 8 ppm de chlore pendant 1 h toutes les semaines
2. Coagulation	FeCl ₃ : dose = 10 g/m ³
3. Floculation	Poly électrolyte anionique ou non anionique Dose = 1 à 5 g/m ³
4. Filtration sur sable	filtre bicouche sous pression vitesse de filtration de 10 à 15 m/h
5. Acidification	H ₂ SO ₄ : 20 - 25 g/m ³
6. Déchloration	NaHSO ₃ : 5- 10 g/m ³
7. Antitartre	Polymères carboxyliques : dose = 1g/m ³
8. Filtration sur cartouches	Cartouches à base de propylène 5 µm

a) Chloration

L'eau de mer contient divers micro-organismes, bactéries, protozoaires qui pourraient contribuer à la formation de biofilm sur la surface de la membrane. Un biofilm est une colonie de bactéries qui croît sur une surface où il y a des nutriments et une source organique. Éliminer les bactéries et les micro-organismes avant l'entrée de l'eau dans les membranes empêcher a toute précipitation biologique. La dose de chlore standard est de 3 mg/L de chlore actif. Ceci est injecté en dosant de l'Hypochlorite de Sodium (NaClO) pour des petites unités ou du chlore gazeux (Cl₂) pour des unités de taille moyenne. Les grandes unités (> 300 m³/h) utilisent l'électro chloration pour produire de l'hypochlorite de sodium (NaClO) à partir du chlorure de sodium en excès (NaCl) présent dans l'eau de mer à 30-40 g/L: NaCl + H₂O + courant direct -->NaClO + H₂Le pH devrait être de l'ordre de 7.5 afin d'avoir un potentiel de désinfection optimal.

b) Clarification

Une étape de CFS (Coagulation Floculation Sédimentation) est nécessaire afin d'éliminer les matières en suspension et une partie du COT (Carbone Organique Total Matière Organique (MO)

- Coagulation : La coagulation a pour objectif de neutraliser les colloïdes, en général chargés négativement, par des composés de deux métaux lourds Al³⁺ et Fe³⁺:

- ✓ Chlorure ferrique FeCl₃
- ✓ Sulfate ferrique Fe(SO₄)₃
- ✓ Sulfate d'aluminium Al₂ (SO₄)₃, 14 H₂O

- Floculation: La floculation permet de résoudre les problèmes liés au faible diamètre des colloïdes. En effet, la masse de ces particules est si petite qu'elle ne permet pas une sédimentation naturelle suffisante. L'ajout de flocculant organique ou naturel tels que : l'alginate de sodium, la silice activée et l'amidon permet l'agglomération des particules colloïdales. En effet, les flocculants ajoutés vont jouer le rôle de colle entre les particules. Les plus fines, contenant les polluants, se rassemblent alors en flocons de plus en plus gros autour du microsable. L'agrégation des particules forme des flocs possédant une masse suffisante pour être décantés. Ces amas de particules emprisonnent d'autres éléments tels que des bactéries pouvant être pathogènes. La vitesse d'agitation est relativement faible afin de ne pas détruire les flocs déjà formés.

- Décantation : La décantation est une opération de séparation mécanique qui, sous l'action de la gravitation, peut séparer soit plusieurs liquides de densités différentes, soit des solides insolubles. Le procédé de décantation dit à « contre-courant » consiste en une séparation des flocs et de l'eau au moyen d'un décanteur à lamelles superposées. Pour obtenir une efficacité maximale, les lamelles sont inclinées de 60°. Ainsi, les flocs se déposent et glissent au fond du bassin. A ce stade, 95 % de la pollution et 100 % des matières en suspension ont déjà été éliminées. L'eau clarifiée est alors récupérée en surface tandis que les particules décantées sont extraites par purges régulières ou centrifugées.

c) Filtration sur sable

La filtration sur sable peut être effectuée sous pression ou de façon gravitaire. La filtration sous pression est utilisée en général pour les débits faibles et moyens (les vitesses de filtration sont d'environ 10 à 15 km/h) alors que la filtration gravitaire est utilisée pour les débits plus élevés (les vitesses de filtration sont d'environ 5 à 8 km/h). La masse filtrante peut être monocouche ou bicouche :

- le filtre monocouche est constitué par une hauteur de sable de granulométrie comprise entre 0,4 et 1 mm sur une hauteur de 1 m.
- le filtre bicouche est constitué par une couche de 0,7 m de sable surmontée d'une couche de 0,3 m d'anhracite.

d) La Désinfection - l'Ozonation

Après sa filtration, l'eau subit une désinfection qui a pour but d'éliminer les germes bactériens résiduels. L'utilisation de procédés chimiques tels que : l'ozonation ou le traitement par ultraviolets sont essentiels.

L'ozonation, quant à elle, est réalisée avec un gaz : l'ozone. L'oxydation, par le chlore ou l'ozone, agit principalement sur les métaux comme le fer et le manganèse ainsi que sur les matières organiques. Il détruit ou inactive les germes vivants, les virus et les bactéries présents dans l'eau.

L'ozonation est un traitement chimique par oxydation permettant d'hydrolyser les grosses molécules carbonées en petites chaînes carbonées biodégradables. L'élimination des pesticides, herbicides, fongicides et micro-algues présentes dans l'eau pouvant altérer les nano membranes est ainsi effectuée. L'utilisation de réactifs chimiques oxydants dans le traitement des eaux a pour visée la stérilisation de l'eau : la destruction des germes pathogènes.

e) Prévention de l'entartrage

La méthode la plus utilisée pour éviter les tartres (CaCO_3 , CaCO_4 , $2 \text{H}_2\text{O}$...) dans les modules d'osmose inverse consiste à injecter dans l'eau brute des inhibiteurs d'entartrage ou antitartres. Les produits utilisés sont :

- Les poly phosphates : ces produits sont efficaces et bon marché mais ils peuvent éventuellement former des dépôts d'orthophosphates par suite de phénomènes d'hydrolyse.
- Les polymères carboxyliques : efficaces sur la plupart des tartres, ces produits ne posent pas de problèmes pour les rejets. Ils présentent l'inconvénient d'être chers. L'acidification de l'eau brute, en provoquant la décomposition des bicarbonates, est aussi un moyen efficace de prévenir les dépôts de CaCO_3 : $\text{H} + + \text{HCO}_3^- = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

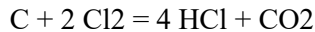
Le calcul de l'indice de La gelier nous apprend que l'eau en entrée est incrustante ($I=0,41 > 0$ donc incrustante). Il est donc nécessaire d'acidifier le pH afin de le ramener à la valeur du pHs. L'ajout d' $\text{H}_2 \text{SO}_4$ permet de ramener le pH à la valeur de pHs calculé soit 7,78 (contre un pH de 8,2 pour l'eau de l'Océan).

f) Déchloration

Compte tenu de la sensibilité des membranes d'osmose inverse en polyamide (membranes les plus utilisés actuellement), il est indispensable d'assurer une déchloration de l'eau l'eau de mer en amont de l'osmose proprement dite. Du bisulfite de sodium est ajouté afin de réduire le chlore : $\text{NaHSO}_3 + \text{Cl}$

$2 + \text{H}_2\text{O} = \text{NaHSO}_4 + 2\text{HCl}$ est la solution la plus utilisée car elle est efficace et d'un coût relativement faible.

Un produit équivalent conviendra du moment que l'eau contient moins de 0,1 mg/L de chlore libre à l'arrivée sur la membrane notamment l'utilisation de charbon actif en poudre ou en grain :



g) Filtration de sécurité sur cartouches

Dans tous les cas, une installation d'osmose inverse doit être protégé par une filtration de sécurité sur cartouches aux environ de 5 µm.

III.7.3. Poste de Pompage et Récupération d'énergie

Le cœur du procédé de dessalement est le procédé d'osmose inverse. Cela consiste en une pompe haute pression suivie d'un système de récupération d'énergie et des membranes d'osmose inverse.

a) Pompe haute pression

Avant d'entrer dans les membranes d'osmose inverse, l'eau de mer clarifiée est pressurisée au moyen de la pompe haute pression généralement entre 55 et 85 bars, en fonction de la température et de la salinité de l'eau.

Les pompes servent à bâtir la pression transmembranaire. Les pompes ou un système d'agitation permettent la circulation de l'eau à traiter dans les modules ou entre les modules. La séparation est assurée dans les modules membranaires. Suivant la manière dont est appliquée la pression membranaire, deux types de systèmes peuvent être distingués :

- Les systèmes de filtration sous pression.
- Les systèmes à membranes immergées.

- ***Les systèmes de filtration sous pression***

Dans le cas d'un système de filtration sous pression, les modules sont installés dans des caissons pressurisés. Une pompe additionnelle peut servir à la recirculation du concentrât à l'entrée des modules. L'ajustement du débit d'alimentation et l'ajustement d'une vanne, située en aval de des modules, permettent de contrôler la pression transmembranaire et le taux de récupération global. Le perméat est généralement à une pression proche de la pression atmosphérique. Les différents types de modules peuvent être mis en œuvre de cette façon. Plusieurs modules peuvent être placés en série dans un même caisson comme dans le cas des modules spiralés où un caisson peut contenir de un à six modules spiralés. Plusieurs caissons peuvent être utilisés en série et / ou en parallèle.

- ***Système à membranes immergées :***

Dans un système à membranes immergées, les membranes sont plongées dans un bassin alimenté avec l'eau à traiter. Le côté alimentation est soumis à une pression hydrostatique et un vide partiel est appliqué du côté perméat. L'agitation de l'eau autour des membranes (écoulement tangentiel libre) réduit l'accumulation de particules à la surface des fibres. La vitesse de soutirage du concentrât à même le bassin contrôle le taux de récupération.

Dans le domaine de l'eau potable, cette configuration n'existe actuellement qu'avec des membranes à fibre creuses de types UMF.

- **Récupération d'énergie:**

La perte de charge à travers les membranes d'OI est d'environ 1.5 à 2 bar, en fonction du nombre d'éléments par tube de pression, le concentrât sort donc à haute pression. Grâce au système de récupération d'énergie, il est possible de réutiliser l'énergie du concentrât. Le concentrât est dirigé vers le système de récupération d'énergie, où il transmet directement son énergie à une partie de l'eau d'alimentation. Il existe deux principaux concepts de récupération d'énergie:

- ✓ Turbine à récupération d'énergie
- ✓ Échangeur de pression

III.7.4. Poste de dessalement d'Osmose inverse proprement dite

III.7.4.1. Poste de post-traitement

Dans la grande majorité des cas, tout ou partie de l'eau produite est destinée à la consommation humaine et doit donc être conforme à la réglementation locale des eaux potables. Un traitement complémentaire (échange d'ions, electro-désionisation) sera nécessaire mais plus ou moins important suivant la salinité résiduelle, sachant que la distillation peut produire une eau contenant moins de 5 mg/L de sels dissous, alors que l'osmose inverse sera limitée à 100-250 mg/L TDS. Il arrive que certains pays n'aient pas de réglementation concernant la qualité des eaux potables. On se conforme alors aux recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS), lesquelles font référence au sein de la Communauté internationale. Celle-ci classe les critères de potabilité d'une eau en cinq groupes. Ceux qui intéressent le producteur d'eau dessalée concernent :

- les caractéristiques physique: température, limpidité, odeur, teneur en matières en suspension (MES) ;
- les caractéristiques chimiques: salinité, chlorures, pH, etc. Pour chaque critère, l'OMS précise une valeur guide, par exemple :

- salinité inférieure ou égale à 1 000 mg/L ;
- chlorures inférieurs ou égaux à 250 mg/L.

Ce deuxième critère étant le plus contraignant. Le facteur clé du dessalement est évidemment la salinité finale recherchée. Toutefois, des critères plus pointus sont parfois requis tels que les teneurs en B,Br, métaux lourds nécessitant des aménagements, voire un post-traitement.

III.7.4.2. Reminéralisation

- Reminéralisation par l'ajout de CaCl₂ et NaHCO₃ - Ajustement de Ph

Cette méthode consiste essentiellement à additionner directement à l'eau osmosée des solutions de bicarbonates de sodium (NaHCO₃) et des chlorures de calcium (CaCl₂) avec des doses bien définies afin de régler le TAC, le pH, le TH et le Ca²⁺ et par conséquent, aboutir à une eau bien équilibrée. La reminéralisation par cette méthode est facile et immédiate mais elle pose des problèmes au niveau de stockage des produits. Dans les grandes stations, ce procédé de reminéralisation demande une grande quantité des réactifs. Ce qui impose l'approvisionnement des réactifs et la disponibilité des espaces convenables pour ces produits afin d'éviter toute rupture de stock.

- Reminéralisation par passage à travers un lit calcite

Cette reminéralisation consiste à passer l'eau osmosée à travers un lit à calcite du bas vers le haut afin que l'eau produite soit reminéralisée. La reminéralisation par cette méthode est efficace et simple. Elle ne demande pas d'efforts dans son exploitation. En plus, la dissolution de la calcite est facile et nécessite une quantité de CO₂ inférieur à celle demandée par la chaux.

- Reminéralisation de l'eau osmosée par l'ajout de la chaux Ca(OH)₂

L'eau osmosée (le perméat) est reminéralisée par l'injection de l'eau de chaux Ca(OH)₂ préparée dans un saturateur de chaux afin d'obtenir une eau équilibrée.

III.7.5. Poste de Contrôle, Rejets, sécurité-Lavage d'un osmoseur

a) Contrôle

- les paramètres physico-Chimique à contrôler d'une manière permanente sont :
- MES: élimination préalable des particules de 100-500 µm; + pré-élimination des 1-25 µm;
- Tartre : Impact des carbonates et des sulfates
- Croissance de biofilms, Encrassement des membranes; Dégradation des membranes
- Fer et manganèse : Doivent être maintenu dans leur état réduit (dissout dans l'eau).

- pH : La membrane doit résister aux conditions de pH imposées membranes à base de cellulose d'acétate : 4-6.5, Polyamine : 4-10
- Température : Altération des membranes; Variation de la viscosité dumilieu, Variation de la solubilité.

b) Appareils de contrôle

Pour suivre le fonctionnement des installations de l'osmose inverse on va utiliser des dispositifs de régulation et des différents capteurs du système.

- Un conductimètre à la sortie du perméat et du concentrât qui permet de surveiller la qualité de l'eau.
- Un manomètre à l'entrée des modules pour surveiller la pression en entrée. Elle doit être inférieure à la pression maximale supportée par la membrane et supérieure à la pression osmotique afin de permettre la séparation de l'eau et des sels. Les changements de température de l'eau peuvent affecter la pression à la sortie de la pompe. Il est donc important de contrôler ce paramètre constamment pour ajuster la fréquence de la pompe pour satisfaire les paramètres du procédé.
- Un débitmètre en entrée permet d'éviter de dépasser le débit maximal accepté par la membrane. Un débitmètre à la sortie du perméat permet de connaître le taux de conversion et de vérifier le colmatage de la membrane.
- Un thermomètre permet de mesurer la température en entrée de l'usine. Il servira à calculer les débits et pressions standardisés qui permettent de connaître les performances de l'installation en toute circonstance.

Les membranes sont sensibles au chlore. Il faut donc réduire la concentration en chlore à moins de 0,1mg/L. Lors de l'étape précédente la concentration en chlore est déjà largement diminuée. Le chlore résiduel sera éliminé grâce à du bisulfate de sodium.

L'eau de fracturation est traitée afin de ne pas être contaminée par des bactéries et virus enfouis en profondeur. Les risques de prolifération bactérienne dans les membranes sont donc limités.

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE I :

MATERIEL ET METHODE

CHAPITRE I : MATERIEL ET METHODE

Ce chapitre est consacré à la présentation le matériel et les méthodes utilisées au cours des travaux de thèse. Il est structuré en trois (3) parties: la première présente la station de dessalement et ses caractéristiques, son emplacement, comment elle fonctionne, son objectif, la méthode sur laquelle elle se base dans le processus de dessalement ; la seconde est consacré pour la description des matériaux à savoir le soluté étudié, la membrane analysé; la dernière expose le protocole suivi durant les travaux de thèse l'approche analytique mis en place pour analyser les membrane, le colmatage et les solutés.

I.1. LA STATION DE DESSALEMENT DE L'EAU DE MER (CAP DJINET)

La station de dessalement de l'eau de mer de Cap Djinet (W. Boumerdès) est l'une des stations de dessalement de l'eau de mer en Algérie, qui a été retenue par l'État comme projet et l'une des solutions durables pour approvisionner la région et ses environs en eau potable.

I.1.1. Situation géographique de la station de dessalement

A 45 km de l'est de la capitale (Alger), la wilaya de Boumerdes a fait l'objet de l'installation d'une station de dessalement d'eau de mer (Figure 30 et 31), dans la région de Cap Djinet. Cap Djinet est une petite ville côtière algérienne, située dans le littoral de la daïra de Bordj Menaïel, entourée par Sidi Daouad et Lagata. Elle est située à 15 km au Nord-Est de Bordj Menaïel.

La station de dessalement Cap Djinet se situe au bord de la mer, près de la ville de Boumerdès ; à 30 km à l'est du chef-lieu de wilaya. La mise en service date d'octobre 2010, et sa capacité est de 100000 m³/J (Figure 32). Ce sont les entreprises Sonatrach et Sonelgaz qui ont investi dans cette station avec un taux de 49 %. Deux entreprises espagnoles se sont jointes à elles, INIMA et Aqualia, qui détiennent chacune 25.5 % de cet investissement.

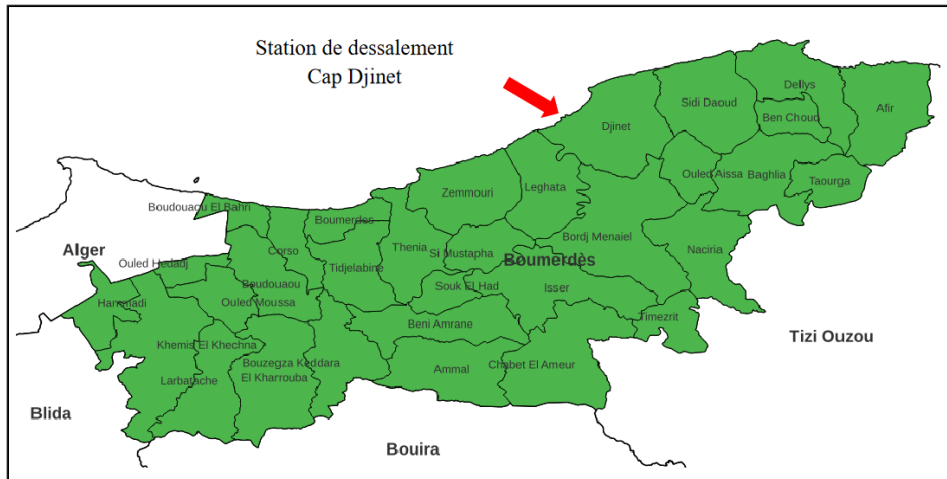


Figure 30 : Localisation de la station de dessalement Cap Djinet



Figure 31 : Situation géographique de la station



Figure 32 : Station de dessalement Cap Djinet

I.1.2. Présentation de la station de dessalement Cap Djinet

La mise en service finale de la station de dessalement Cap Djinet était en Aout 2012 dont la capacité de production est de 100 000 m³/j par la technique d'osmose inverse, assurant l'approvisionnement en eau potable de plusieurs communes (Alger, Borj-menail, Zemmouri, Dellys, Afir, Tizirt, Azefoun) ainsi que les agglomérations urbaines de Boumerdes, soit une population d'environ 400.000 habitants.

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

I.1.3. Caractéristiques de l'usine de dessalement « Cap Djinet »

I.1.3.1. Généralités

- ✓ **Mise en service partielle** : Octobre 2010,
- ✓ **Mise en service finale** : Août 2012
- ✓ **Capacité** : 100000 m³/j par la technique d'osmose inverse,
- ✓ **Coût du projet** : 133 millions de dollars,
- ✓ **Objectif** : renforcement des ressources en eau et l'amélioration de la qualité des eaux distribuées, production, traitement et transport,
- ✓ **Distribution** : gestion et entretien du réseau d'eau potable (Alger, Bordj-Menail, Zemmouri, Boumerdès, Dellys, Afér, Tizirt, Azfoun),
- ✓ **Les travailleurs de L'usine** : sont formés et sensibilisés à tout ce que concernent les objectifs de l'usine et leur travail,
- ✓ **La station** : concernant le système de qualité, l'activité du laboratoire d'Ecoprogress s'est déroulée selon les normes UNE-EN-ISO-17025. L'entreprise dispose actuellement du Certificat UNE-EN ISO 9001 :2000 en tant que système de gestion de la qualité pour la réalisation d'analyses environnementales (Certificat Num. 113/ER/04/05) [1].

I.1.3.2. Les activité et fonctionnement de la station

a) Les activités de la station

- ✓ **Consistance du projet** : Prise de l'eau de mer directe, station de dessalement et rejet de la saumure,
- ✓ Procédé de traitement : Osmose Inverse avec 8512 Membranes,
- ✓ Débit de captation : 222444 m³/ jour,
- ✓ Taux de conversion : 45 %,
- ✓ Emissaire de captation : DN 1800 mm, longueur 1 ,8 km, profondeur 20 m,
- ✓ Emissaire de rejet de saumure : DN 1200 mm, longueur 1,2 Km, profondeur 8 m.

b) Procédés d'osmose inverse

- ✓ Marc des membranes : film tec (S.W :40ie),

- ✓ Nombre de membrane /tube de pression : 7 unités,
- ✓ Nombre de tube de pression/châssis : 152 U,
- ✓ Nombre totale de châssis : 8 U,
- ✓ Nombre totale de membrane : 8512 U,
- ✓ Module : SW 30HRLE-400i,
- ✓ Matériel : polyamide aromatique,
- ✓ Forme : roulement en spirale,
- ✓ Diamètre : 200 mm,
- ✓ Pression de pompe haute pression : 60 bars [2].

c) **Captage de l'eau de mer**

- ✓ Emissaire de captage DN 1800 mm
- ✓ Longueur 1,8 km,
- ✓ Profondeur 20.
- ✓ Saumure DN 1200 mm
- ✓ Longueur 1,2 km,
- ✓ Profondeur 8 m.

d) **Pompage à haute pression**

- ✓ (4+1) pompes haute pression,
- ✓ 85 bars,
- ✓ Système de récupération de l'énergie,
- ✓ Pompes BOOSTER,
- ✓ Débit maximale : 120480 m³/j,
- ✓ Rendement garanti : 99 %.

e) **Prétraitement chimique**

- ✓ L'injection et le stockage de produits :
- ✓ Hypochlorite de sodium,
- ✓ Permanganate de potassium,
- ✓ Acide sulfurique,
- ✓ Coagulant (Chlorure Ferrique (FeCl₃)),
- ✓ Flocculant (poly-électrolytes),
- ✓ Métabisulfite de sodium,
- ✓ Inhibiteur d'incrustation.

f) **Zone des filtres**

- ✓ 12 Filtres à Sable et anthracite,
- ✓ 8 filtres à sable,
- ✓ 9 filtres à cartouches (chaque filtre comporte 360 cartouches).

g) **Zone de production**

- ✓ 08 Pompes de recirculation,
- ✓ 04 unités d'Osмосe Inverse,
- ✓ 05 Pompes HP.

I.2. PROCESSUS DU DESSALEMENT APPLIQUE DANS LA STATION DU DESSALEMENT DE CAP DJINET

La station de dessalement de l'eau de mer de Cap Djinet repose dans son processus de dessalement sur plusieurs étapes. Après avoir reçu l'eau de mer, elle subit un prétraitement chimique et physique avant de passer à l'étape la plus importante du processus de dessalement, qui est l'osmose inverse jusqu'à ce que nous atteignons l'étape de reminéralisation dans laquelle l'eau devient potable.

La station reçoit un débit quotidien de la mer estimé à environ de 222444 m³/j, elle produit un débit de 100000 m³/j et les 122444 m³/j restants, ce sont des rejets qui remontent à la mer.

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

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

I.2.1. Captage de l'eau de mer

Cette phase a pour objectif de capter l'eau de mer par gravité dans un réservoir de réception, éliminer les particules grossières et préparer l'eau pour la phase de filtration.

La première opération s'effectue au niveau de « la tour de captage de l'eau de mer » à partir d'un émissaire de captage dont le diamètre nominal est de 1800 mm, placé à une profondeur de 20 m sur une longueur de 1,8 Km, l'écoulement vers le réservoir d'eau de mer est gravitaire (Figure 33).

Cette eau est ensuite pompée par le biais de 05 pompes centrifuges horizontales dont une de réserve (veille), au débit de 222 000 m³/j (Figure 34). La pression d'entrée de l'eau de mer dans la station est de 2 à 4 bars.

Le tableau ci-dessous (Tableau 31) présente les caractéristiques de ces 05 pompes :

Tableau 30. Caractéristiques des pompes de captage d'eau de mer

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

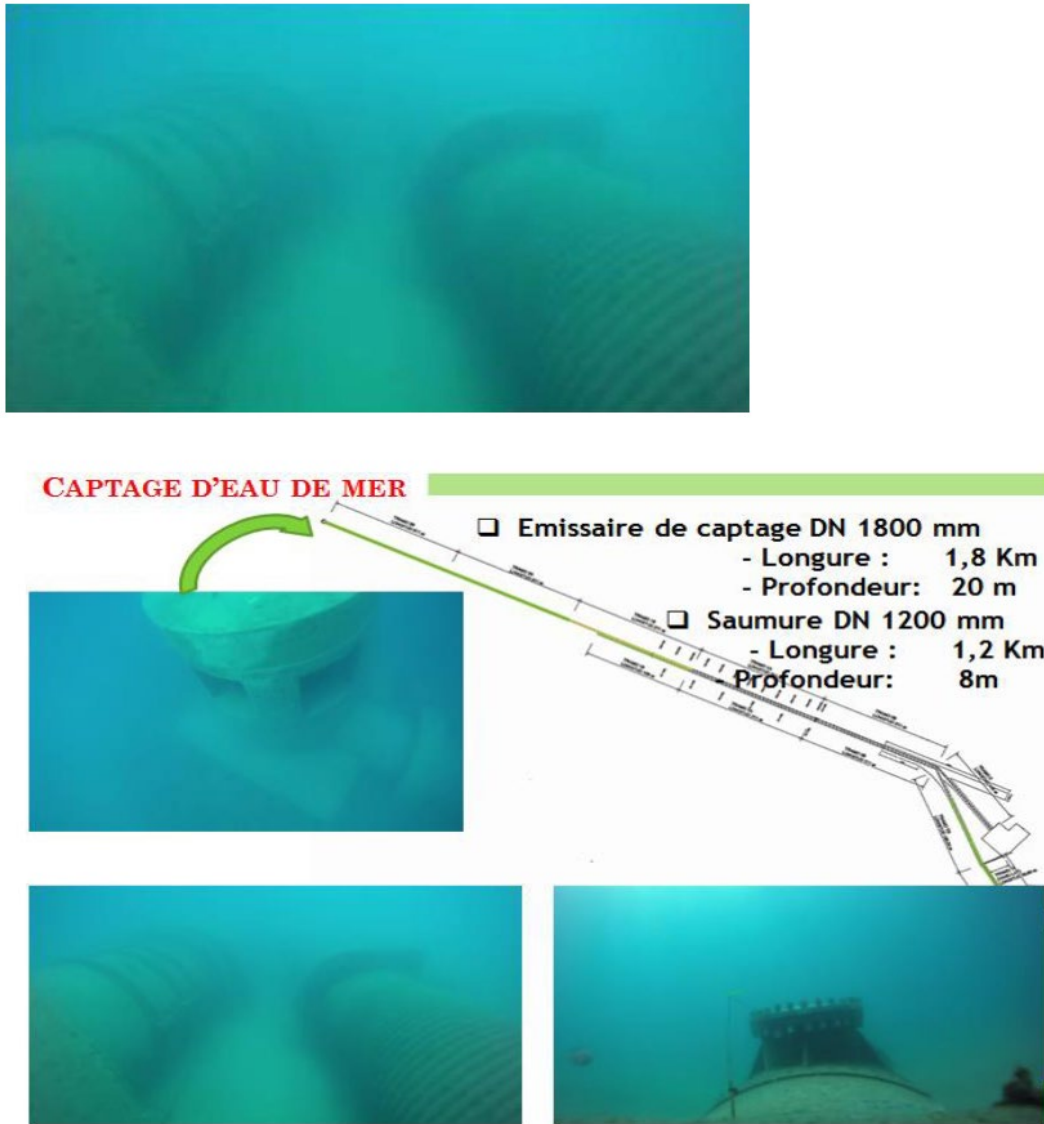


Figure 33 : Captage d'eau de mer



Figure 34 : Station de pompage de l'eau de mer

I.2.2. Le Prétraitement

Le prétraitement de l'eau de mer est une étape essentielle, c'est la deuxième étape du processus de dessalement (Figure 35) dont le but est d'éliminer :

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

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



Figure 35 : Etape de prétraitement chimique

Cette étape comporte deux types de prétraitements :

I.2.2.1. Le prétraitement chimique

Cette opération s'effectue au niveau de la tour de captage de l'eau de mer ou après refoulement des pompes à eau de mer ainsi qu'à la sortie des filtres. Elle consiste à l'injection d'hypochlorite de sodium (NaOCl), Acide sulfurique (H₂SO₄), Chlorure Ferrique (FeCl₃), poly-électrolytes, Permanganate de Potassium (KMnO₄), Bisulfite de Sodium (NaHCO₃) et d'inhibiteur d'incrustations.

a) Traitement par hypochlorite de sodium (eau de javel)

Cette étape se fait grâce à deux tanks (réservoirs) de NaOCl d'une capacité de 50m³ chacun et une dose maximale de 4 ppm, munis de 3(2+1) pompes doseuses (Q_u=150 l/h) destinées à injecter l'hypochlorite de sodium au niveau de la tour de captage d'eau de mer et après la station de pompage.

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

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

b) Traitement par Permanganate de Potassium (KMnO₄)

Deux autres tanks de dilution avec vannes mélangeuses de KMnO₄ d'une capacité de 5 m³ chacun, munis de 3(2+1) pompes doseuses (Q_u=200 l/h) qui sont utilisées pour injecter le KMnO₄ avec une dose maximale de 1 mg/l au niveau du système de pompage de l'eau de mer. Cette injection a pour but d'oxyder la matière organique.

c) Traitement par Acide sulfurique (H₂SO₄)

L'injection d'acide sulfurique avec une dose maximale de 25 ppm au niveau du système de pompage de l'eau de mer, de même que les autres agents chimiques à partir d'un seul tank d'une capacité de 60 m³, muni de 4(2+1+1) pompes doseuses (Q_u= 70l/h) et 1 pompe de transfert (Q = 25m³ /h). Cet acide Joue le rôle d'un catalyseur dans la coagulation/floculation.

Un dosage de l'acide sulfurique est effectué au niveau de système de pompage, de même que les autres agents chimiques ; son rôle est un catalyseur dans la coagulation/floculation.

d) Traitement par coagulant et floculant

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

e) Traitement par Bisulfite de Sodium (NaHSO_3)

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

f) Traitement par inhibiteur d'incrustations (anti-scalant)

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

I.2.2.2. Prétraitement physique

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

Le mouvement de l'eau dans ces filtres est vertical, pénétrant par la partie supérieure du filtre et descendant à travers les couches filtrantes qui retiennent les matières solides dans sa partie

inférieure. Des collecteurs munis de buses recueillent l'eau filtrée.

a) Filtration à sable et anthracite

Ce système illustré dans la figure ci-dessous (Figure 36) élimine la plupart des particules en suspension, huile et graisses qui restent dans l'eau de mer, Il est réparti en deux phases :

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

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

- i) Isoler le filtre à nettoyer en fermant toutes les vannes ;
- ii) Baisser le niveau d'eau jusqu'au sable ;
- iii) Barboter avec de l'air en utilisant des compresseurs ;
- iv) Faire un lavage à contre-courant à l'aide des pompes centrifuges en refoulant de la saumure
- v) Faire une vidange des filtres vers un réservoir de stockage de sous-produits de lavage.



Figure 36 : Filtres à sable et anthracite

b) Filtration à cartouche

Afin de filtrer et d'éliminer les particules de dimensions supérieures à $5 \mu m$ et protéger le système d'osmose inverse et pour assurer une meilleure qualité de l'eau nous faisons la dernière étape du

prétraitement qui est la microfiltration, c'est une étape une fois l'eau a reçu les dosages des réactifs appropriés et qu'elle a été filtré.

C'est une microfiltration assurée par des cartouches en polypropylène à membrane de 25 microns et d'un diamètre de 61mm, dans des réservoirs métalliques en position verticale qu'on appelle « filtre à cartouche ».

Le nombre de ses derniers est de 9 filtres comportant 360 cartouches chacun (Figure 37). Son rôle est l'élimination des microorganismes pour la protection des membranes, entre le collecteur d'entrée et de sortie, il y'a un manomètre différentiel muni de contact électrique pour alarme, qui indiquera quand il sera nécessaire de remplacer les cartouches filtrantes. La période de remplacement varie de 3 à 6 mois.



Figure 37 : Filtre à cartouche

I.2.3. Procédé osmose inverse

Après le prétraitement de l'eau, cette dernière arrive l'étape de l'osmose inverse qui est la partie principale du processus. L'eau préfiltrée arrive au système de pompage de haute pression puis envoyée vers les membranes d'osmose inverse.

I.2.3.1. Pompe à haute pression

Avant d'entrée dans les membranes d'OI, l'eau prétraitée arrive au système de pompage de haute pression généralement entre 55 et 85 bars (Figure 38).

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



Figure 38 : Pompe à haute pression

Les caractéristiques de la pompe HP sont présentées dans le tableau 32 ci-dessous.

Tableau 31. Caractéristiques des pompes à haute pression

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

I.2.3.2. Systèmes de membranes d'osmose inverse

L'installation se compose de quatre unités, chaque unité est répartie en deux châssis. Chacun de ses derniers comporte 152 tubes de pressions avec une pression de 60 bars (Figure 39).

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

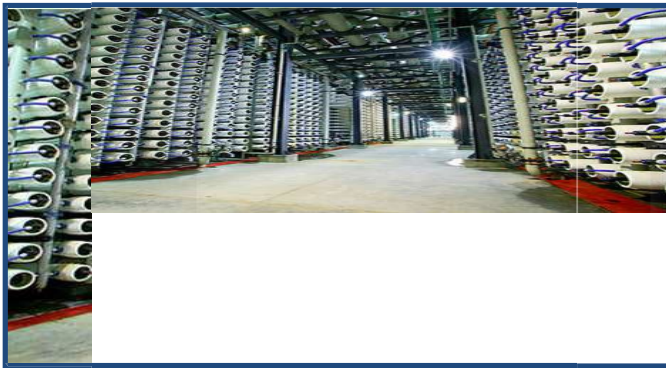


Figure 39 : Tubes de pression et Châssis d'osmose inverse

I.2.4. Récupération d'énergie

Dans les stations de dessalement principalement, comme mentionné précédemment où elle fonctionne avec des pressions comprises entre 55 et 85 bars, la récupération de l'énergie contenue dans le débit de rejet, est obligatoire pour des raisons énergétiques-économiques.

I.2.4.1. Présentation du système de fonctionnement

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

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

Le principe de base est de transmettre la pression de la saumure à la même quantité d'eau de mer nouvelle entrant dans le circuit (Figure IV.9) et ainsi de réduire la taille de la pompe haute pression à un débit correspondant non plus au débit d'eau de mer (222 000 m³/j dans notre cas) nécessaire au bon fonctionnement des membranes, entraînant ainsi un gain important de puissance (Figure 40).

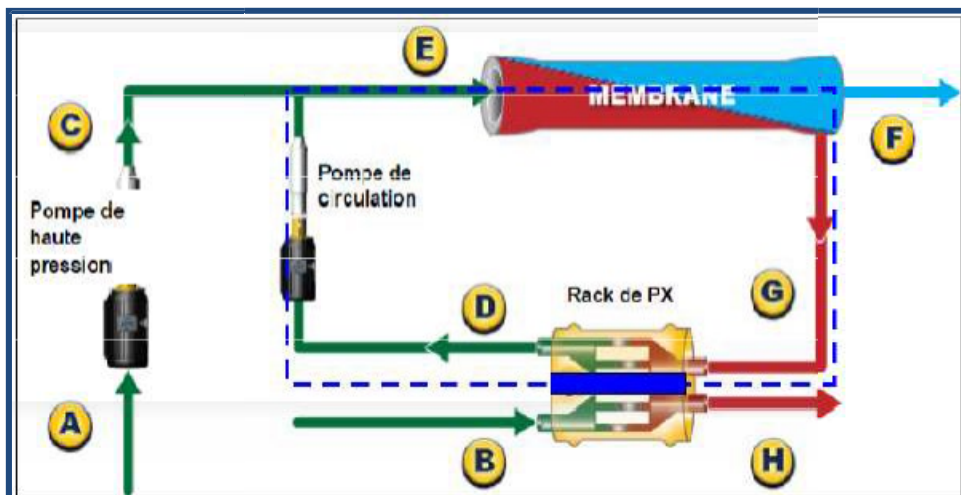


Figure 40: Installation avec échangeur de pression PX(WWW.BENISAFWATER.COM).

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

Chaque châssis de membranes d'osmose inverse possède un système de récupération d'énergie avec 15 modules échangeurs de pression placés entre une conduite d'eau de mer en haut et une conduite de concentrat en bas (Figure 41).

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

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

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

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



Figure 41 : Emplacement des échangeurs de pression

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

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

La zone étanche sur les couvercles se comporte tels des vannes (Figure 42). Dans le PX, au lieu que les vannes s'ouvrent et se ferment, les vannes sont fixes et se sont les tuyaux qui se déplacent.

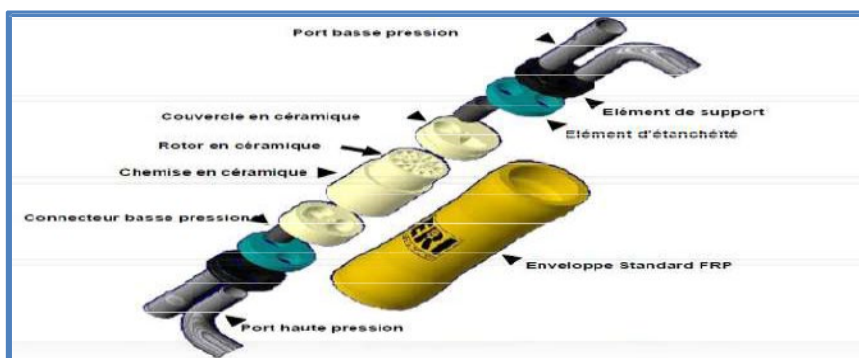


Figure 42 : Constitution d'un système PX (WWW.BENISAFWATER.COM).

I.2.4.2. Principe de fonctionnement du système

I.2.4.2.1. Pompes BOOSTER

Chaque unité d'osmose inverse contient une pompe HP, deux châssis de membranes d'osmose inverse et deux pompes BOOSTER qui sont reliées à la pompe HP par le même axe de rotation (Figure 43)

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



Figure 43 : Pompes BOOSTER

I.2.4.2.1. Poste de nettoyage chimique

a) Lavage des membranes

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

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

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

L'efficacité relative d'une membrane est un paramètre qui sert d'indicateur pour guider le cycle de

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

b) Conditions limites de nettoyage

Les conditions limites de nettoyage des membranes sont :

- La température maximale et le pH recommandés par les fabricants des membranes doivent être respectés lors du rinçage au filtrat et des lavages chimiques.
- N'utiliser que des solutions compatibles avec les membranes.
- Utiliser un temps adéquat de nettoyage pour éviter le contact prolongé des produits chimiques avec les membranes.
- Respecter le débit et la pression nécessaires pour faire un nettoyage.
- Les modules sont installés en série, le rinçage et le lavage chimique doivent être réalisés de façon indépendante afin de maximiser l'efficacité de la solution de lavage et d'éviter que les agents colmatants retirés du premier module se retrouvent dans les modules subséquents.

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

c) Procédure de nettoyage des membranes

La procédure de nettoyage des membranes suit les étapes suivantes :

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

d) Rejet de saumure et produits chimiques

La saumure est récupérée dans un réservoir (Figure 44) et ensuite utilisée pour lavage des filtres à sable à contre-courant, puis acheminée vers un deuxième réservoir ou elle sera évacuée par un

émissaire marin pénétrant jusqu'à 1200 m dans la mer dans le but d'assurer une meilleure dilution et d'éviter les conséquences indésirables sur l'environnement (Figure 45).



Figure 44 : Bâtiment de la saumure



Figure 45 : Stockage (a) et injection (b) des produits de prétraitement

I.1.4.4. Post-traitement

C'est la dernière étape de traitement où se fait la reminéralisation de l'eau produite pour les rendre appropriées à la consommation humaine.

L'eau issue du traitement de l'osmose inverse est débarrassée de tous les minéraux, c'est-à-dire non consommable, une reminéralisation est nécessaire pour rendre cette eau potable. Dans l'usine de Cap Djinet les étapes de post traitement sont basées essentiellement sur :

- i) Une reminéralisation par calcite (carbonate de calcium) et avec un apport de dioxyde carbone. : L'injection automatique avec une dose de 25 ppm de CO₂ pour réduire le pH à une valeur proche de 5 qui permet de rendre plus efficace le processus de reminéralisation. Ce dernier est réalisé dans la chambre CO₂

- ii) L'eau est ensuite acheminée vers la tour de reminéralisation qui comporte à l'intérieur 32 lits de calcite (carbonate de calcium) de 2 m de hauteur (Figure 46), équipés par des tuyaux de distribution. A travers ces lits de calcite l'eau traitée passe et s'enrichie du carbonate de calcium qui se dissout dans l'eau pourra atteindre le fond (réservoir) par un canal à l'intérieur de la tour.



Figure 46 : Lits de calcite

- iii) Une fois passée la réaction de reminéralisations, on obtient l'équilibre calco-carbonique. Après cela pour désinfecter l'eau contre toute contamination microbienne éventuelle et pour le protéger lors de son stockage et de son transport, il y aura un ajout d'hypochlorite de sodium (15 l/h) à partir d'un tank (citerne) de capacité de 20 000 L, à l'aide d'un doseur automatique et on ajoute parfois aussi l'hydroxyde de sodium « la soude NaOH » pour la correction de pH.
- iv) Après la désinfection et la reminéralisation, l'eau traitée est pompée vers le réservoir de stockage à l'aide des pompes afin de la distribuer par l'entreprise concernée « l'algérienne des eaux (ADE) »

La station de pompage de l'eau produite comporte 3 pompes de type centrifuge horizontale, de marque FLOWERVE et modèle 14LPH34, dont deux sont en marche et une de réserve. Les Conditions opérationnelles et le Fonctionnement de ces pompes sont représentés dans le tableau ci-dessous (tableau 33).

Tableau 32. Caractéristiques des pompes d'eau produite

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

Tableau 33. Résumé des phases de prétraitement et post traitement au cours de la production d'eau potable par dessalement de l'eau de mer « OI » (PNUE, 2001)

Phase de prétraitement	Objet	Produits Chimiques	Devenir des produits
Ajustement du pH à 7	Diminue-la concentration de carbonate (et laprécipitation de carbonate). Protège-la membrane contre l'hydrolyse	Acide (H ₂ SO ₄)	Modifie le pH de l'eau produite et de la saumure concentrée, le sulfate est retenu dans la saumure concentrée
Antitartre	Prévient la formation de tartre sur les membranes	Agents chélateurs et dispersants	Les complexes formés sont retenus dans la saumure concentrée
Coagulation-filtration	Prévient les salissures et l'encrassement des membranes	Coagulants-Floculants	Les agents floculants formés se séparent par décantation et sont éliminés par filtration
Désinfection	Prévient l'encrassement biologique et l'élimine les microorganismes qui se nourrissent des matières des membranes	Chlore (biocides)	Chlore également réparti dans le perméat et la saumure concentrée
Déchloration	Protège les membranes sensibles au chlore	Bisulfate de sodium ou charbon actif granulaire	Réagit avec le chlore pour former du sulfate et du chlorure qui sont retenus dans la saumure
Ajustement du Ph à 7	Prévient la corrosion du système de distribution, protège la flore et la faune aquatiques en cas de rejet en surface	Noah, carbonate de sodium anhydre, chaux	Accroît le niveau de sodium dans l'eau produite et dans la saumure concentrée
Désinfection	Prévient la prolifération bactérienne dans le système de distribution, protège la flore et la faune aquatique si nécessaire	Chlore	Le chlore est retenu dans l'eau produite et dans la saumure concentrée
Réduction du niveau de chlore	Élimine le chlore et d'autres oxydants	Bisulfite de sodium ou CAGE	Accroît les niveaux de sulfates et de chlorures dans l'eau produite et dans la saumure concentrée
Élimination d'autres formes chimiques	Diminue tous les polluants susceptibles d'être présents dans l'eau produite et dans la saumure concentrée	Est fonction des formes chimiques	

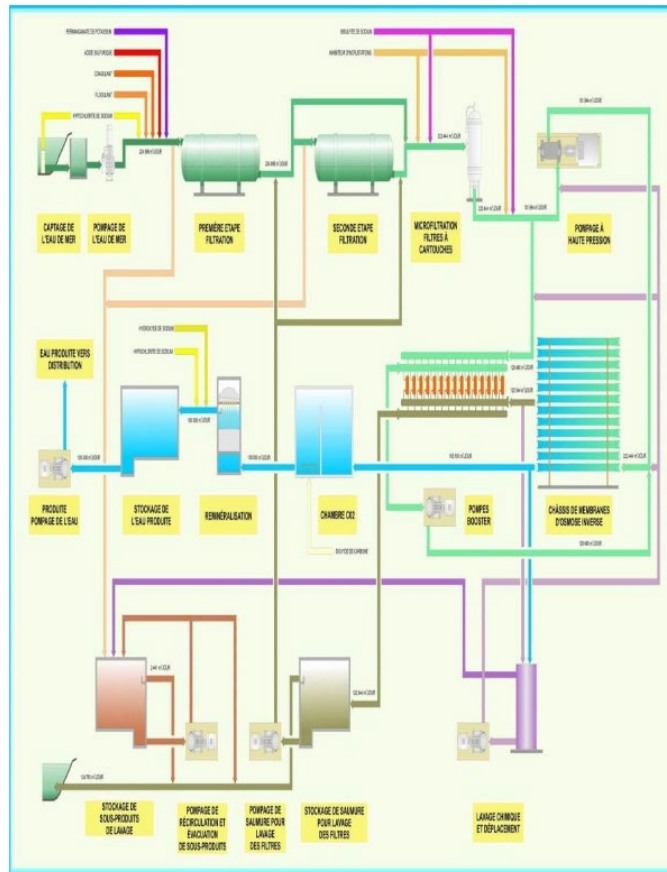


Figure 47 : Schéma de fonctionnement de la station de dessalement

I.3. MATERIAUX DE FILTRATION

I.3.1. La solution étudiée

The Table 1 described the analysis results of the seawater used as feed to the reverse osmosis (RO) plant. For instance, the analysis revealed seawater consists of about 35 g/L - 39 g/L total dissolved solids. It presents a variable concentration of Sodium (Na) and Chlorides (Cl) reaching respectively 12051 mg/L and 22115 mg/L. The feed water temperature varied between 14°C and 27 °C according season.

Tableau 34. Analyse de l'eau de la station cap djenet

Parameters	Result	Units	Method
Turbidity	0,3	UNF	Nephelometry
pH/T°	8,0/23,2	u.pH/°C	Electrometry
Conductivity	56.400	µS/cm	Electrometry
TDS	39.654	mg/L	Calculated
Total Hardness	7.261	mg/L CaCO ₃	Calculated
Calcium	450,2	mg/L Ca ²⁺	Volumetry
Magnesium	1.491	mg/L Mg ²⁺	Volumetry
Sodium	12.051	mg/L Na ⁺	I.Chromatography
Potassium	333,5	mg/L K	I.Chromatography
Total Iron	0,13	mg/L Fe ³⁺	Colorimetry
Aluminium	<0,008	mg/L Al ³⁺	Colorimetry
Total Manganese	0,094	µg/L Mn	Colorimetry
Sulphates	3.035	mg/L SO ₄ ⁻²	I.Chromatography
Chlorides	22.115	mg/L Cl ⁻	I.Chromatography
Fluorides	0,22	mg/L F ⁻	Electrometry
TA	0	°F	Volumetry
TAC	13,2	°F	Volumetry
Bicarbonates	161	mg/L HCO ₃ ⁻	Volumetry
Carbonates	0	mg/L CO ₃ ⁻²	Volumetry
Hydroxides	0	mg/L OH ⁻	Volumetry
Nitrates	15,3	mg/L NO ₃ ⁻	I.Chromatography
Silica	1,4	mg/L SiO ₂	Colorimetry
o-Phosphates	<0,01	mg/L PO ₄ ⁻³	Colorimetry

I.3.2. Caractéristiques de la membrane

I.3.2.1. Origine de la membrane

Dans notre travail de thèse nous avons étudié les performances de la membrane SW30HRLE-400 i fabriquée par la firme Filmtech DOW Chemical Company (USA). D'après le fabricant, cette membrane possède une fine couche active constituée intégralement de polyamide aromatique (Figure

48) synthétisée sur une couche de polysulfone, l'ensemble étant supporté sur une couche non tissée de polyester (Dow Technical Manual, 2005).

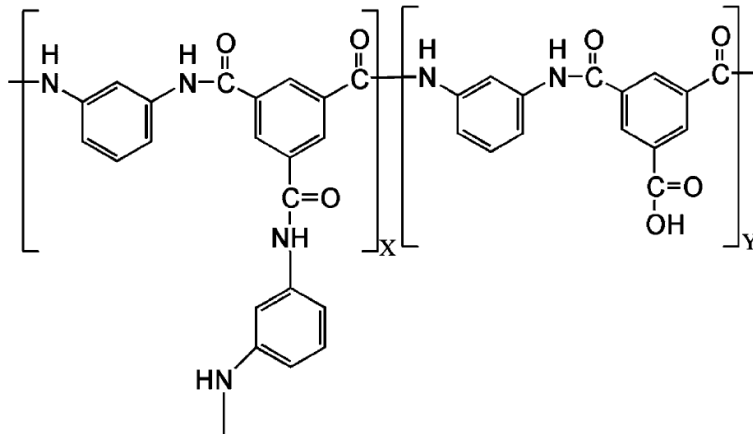


Figure 48 : Structure chimique du polyamide aromatique d'une membrane OI composite comportant des groupements réticulés (fraction X) et linéaires (fraction Y) (Source : Kwon, 2008).

I.3.2.2. Nomenclature de la membrane

L'élément SW30HRLE-400i se caractérise par un diamètre inférieur à 8 inch (20.3 cm) pour cela la première partie indique l'utilisation typique de la membrane ainsi que la structure de la surface, dans notre cas (SW 30) présente (Seawater de la structure FT30) ; la deuxième partie du nom indique la taille de l'élément, pour notre cas ; (400) indique la surface active de la membrane 400 ft² (37m²)

I.3.2.3. Performance de la membrane

Ce travail de thèse est réalisé à l'aide d'une membrane d'osmose inverse SW30HRLE-400i fournie par (Dow-Filmtech). Cette membrane est montée en module spiralé d'une surface membranaire active de 37 m².

Cette membrane se caractérise par un débit de perméat de 28 m³/jour et un taux de rejet des sels de 99,8% ; sous les conditions de fonctionnement qui sont présentées dans le tableau.

Une membrane d'osmose inverse composite (OI), de référence SW30HRLE-400, fabriquée par Dow FilmtecTM a été utilisée pour l'intégralité des essais en osmose inverse. Cette membrane est couramment employée dans les usines de dessalement et peut opérer à des pressions de plus de 60 bars. Les performances de cette membrane et les conditions d'utilisation recommandées par le fabricant sont regroupées dans le tableau 36.

Tableau 35. Caractéristiques principales en osmose inverse de la membrane SW30HRLE- 400 et recommandations d'utilisation fournies par le fabricant.

Paramètre	Valeur
Flux de perméation*	31,5 L/h/m ²
Rétention NaCl*	99,8 %
Rétention Bore*	92 %
Pression appliquée maximale	83 bar
Température maximale alimentation	45 °C
pH (plage d'utilisation conseillée)	2-11
Exposition totale au chlore actif	< 0,1 mg.L ⁻¹

* Performances d'osmose inverse obtenues sur un module 8" à 55 bar, 25 °C, pH 8,0 et avec un taux de conversion de 8 % durant l'osmose inverse de 32 g.L⁻¹ de chlorure de sodium et de 5 mg.L⁻¹ de bore.

D'après le fabricant, cette membrane possède une fine couche active constituée intégralement de polyamide aromatique (Figure 49) synthétisée sur une couche de polysulfone, l'ensemble étant supporté sur une couche non tissée de polyester (Dow Technical Manual, 2005).

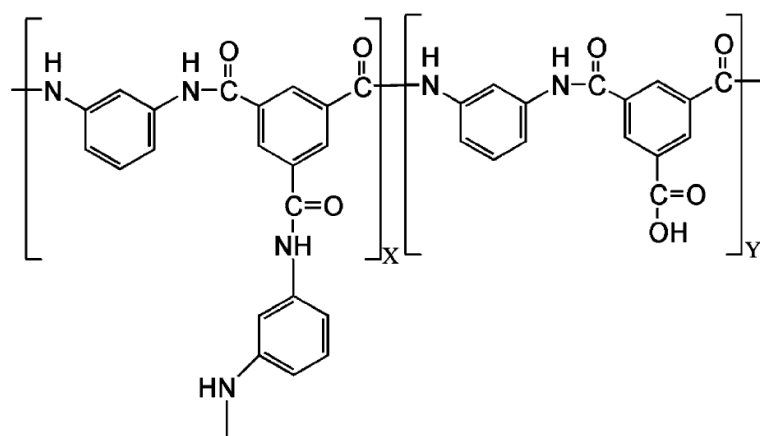


Figure 49 : Structure chimique du polyamide aromatique d'une membrane OI composite comportant des groupements réticulés (fraction X) et linéaires (fraction Y) (Source : Kwon, 2008).

Une représentation de la structure composite de cette membrane peut être observée à partir d'une coupe obtenue par microscopie électronique à balayage (Figure 50).

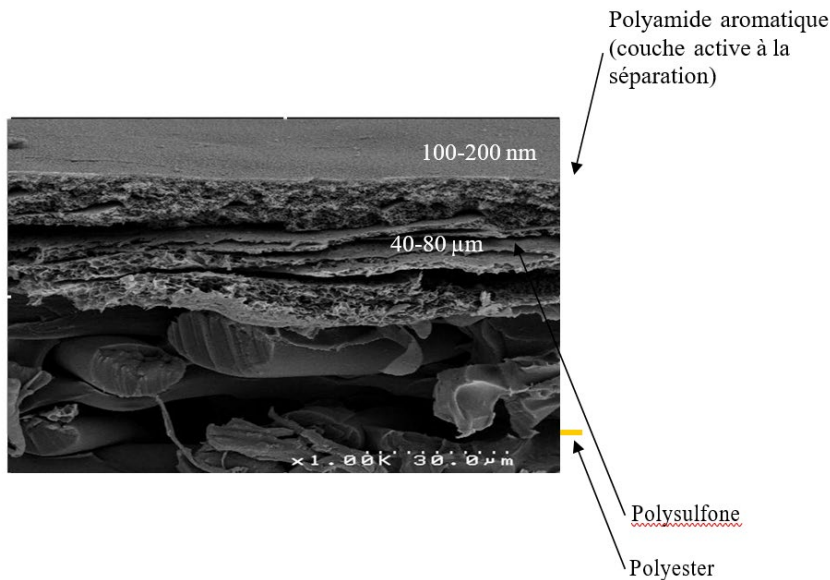


Figure 50 : Coupe MEB d'une membrane d'osmose inverse composite (Source : Rapenne, 2006)

I.3.2.4. Nettoyage de la membrane

Dans l'usine de Cap djenet, parmi les nombreuses méthodes de nettoyage (par exemple, physique et chimique), le processus de nettoyage est principalement chimique.

Le nettoyage commence lorsque la chute de pression augmente de 15% ;

À l'heure actuelle, notre nettoyage périodique des membranes n'utilise que des nettoyants alcalins pour éliminer l'encrassement organique, y compris les matières biologiques.

Notre processus de nettoyage suit 6 étapes :

- 1) Préparation de la solution de nettoyage ;
- 2) Pompage de la solution de nettoyage mélangée dans la cuve à faible débit et à faible pression pour déplacer l'eau de traitement ;
- 3) Pendant le nettoyage, suivre le comportement de la solution et ajuster certains paramètres (température et pH) ;
- 4) Arrêter la pompe et laisser les éléments s'imbiber ;
- 5) Pompage à haut débit : Alimenter la solution de nettoyage pendant 30 à 60 minutes.
- 6) Rinçage de la solution de nettoyage en utilisant le perméat de l'osmose inverse.

I.4. PROTOCOLE D'ANALYSE

Cette étude concerne l'évolution physico-chimique des membranes d'osmose inverse au cours du temps en fonction d'un certain nombre de paramètres. Il s'agit de voir la dégradation chimique de la membrane en contact avec les produits chimiques en particulier le HOCl (NaOCl). La détermination de cette évolution exige des analyses approfondies la structure de la membrane et des dépôts colmatant. D'autres paramètres sont importants à déterminer tels que la perméabilité, la sélectivité et le seuil de coupure.

Dans un premier temps, nous avons effectué des analyses physico-chimiques de l'eau de mer avant passage sur la membrane d'osmose inverse, ainsi que des analyses physico-chimiques du perméat et des analyses sur la saumure. Dans un deuxième temps, une analyse destructive de la membrane colmatée est réalisée pour identifier l'ampleur et la nature des agents colmatant présents sur une surface membranaire.

I.4.1. Prélèvement et Echantillonnage

I.4.1.1. Eau de mer et perméat

a) Sites de prélèvements

La station de dessalement de l'eau de mer de Cap Djnet est dotée de deux sites de prélèvement, à savoir :

- Au niveau du réservoir d'eau de mer.
- Au niveau du réservoir de l'eau traitée (potable)

b) Mode de prélèvement

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

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

Les analyses des paramètres physico-chimiques tels que : pH, température, conductivité, TDS, Cl₂, turbidité, dureté total, calcium, magnésium, alcalinité total, carbonate, bicarbonate, LSI, sont effectuées au niveau de laboratoire de contrôle de la qualité de la station de dessalement de Cap Djnet

I.4.1.2. Membrane et le dépôt colmatant

Dans notre étude, les membranes situées en première position (DOW FILMTEC SW30 HRLE-400i, numéro de série F4810019) a été autopsié. Nous avons retiré un élément de membrane d'une usine de dessalement pour effectuer des analyses destructives.

Pour identifier la nature des substances comatantes et sa caractérisation de la première membrane, les échantillons de la première membrane colmatée par collecte du dépôt colmatant présent sur la surface membranaire.

I.4.2. Description des techniques d'analyse des eaux d'alimentation et de perméat

I.4.2.1. Caractérisation des paramètres organoleptiques

a) Test de la couleur

Le contrôle de la coloration des échantillons se fait par simple observation de l'eau contenue dans des flacons de verre transparent.

b) Test de l'odeur et la saveur

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

c) Mesure de la Turbidité

La mesure de la turbidité a été effectuée à l'aide d'un Turbidimètre (HACH LANGE) qui est étalonné d'avance à trois points 0,10 et 500 NTU. L'échantillon sera analysé en utilisant des cubes en verre bien nettoyés et bien séchés, remplis de l'eau à analyser et le résultat est affiché en NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

I.4.2.2. Paramètres physicochimiques

a) Mesure de la Température

Pour mesurer la température de l'eau, la station de dessalement est équipée par un thermomètre numérique introduit directement au niveau de la canalisation. Cette mesure de T° est effectuée aussi

sur les échantillons à l'aide d'un appareil multi-paramètres (HACH LANGE, waterproof) au niveau du laboratoire.

b) Mesure de pH

Le pH-mètre utilisé (HACH SESSION pH/mv mètre) provient de HACH LANGE : la sonde pH est directement plongée dans les solutions pour les mesures après avoir été calibrée dans des solutions tampons dont le pH est égal à 4,01 ; 7,01 et 10,01.

Le pH est mesuré au niveau du laboratoire, à l'aide d'un appareil multi-paramètres qui mesure la pH et la T° au niveau du laboratoire.

✓ Matériels et réactifs

- Un Becher.
- Un pH mètre
- Tampon pH=9, Tampon pH=7, Tampon pH=4.

✓ Mode opératoire

Après avoir étalonné le pH-mètre avec les trois tampons ; Mettre ensuite environ 100 mL d'eau à analyser dans un bécher, dans lequel on plonge l'électrode du pH-mètre pour mesurer la valeur du pH.

c) Mesure de conductivité (salinité)

Les mesures de la conductivité des solutions sont réalisées avec un conductimètre de terrain (hq 40 d Hach lange).

La conductivité, mesurée à une température T, est corrigée pour l'exprimer à 20°C. La correction de la température est effectuée à l'aide de tables contenant des facteurs de correction de température.

A l'aide d'un conductimètre multi-paramètres (hach lange) à électrode constitué de deux lames carrées de platine de 1cm² de côté. La mesure nécessite :

✓ Matériels et réactifs

- Un Becher.
- conductimètre
- solution d'étalonnage

✓ Mode opératoire

Après avoir étalonné le conductimètre ; mettre ensuite environ 100mL d'eau à analyser dans un bécher, dans lequel on plonge l'électrode du conductimètre pour mesurer la conductivité exprimée en µs/cm.

d) Mesure de l'Alcalinité

Titre alcalimétrique simple (TA)

L'alcalinité d'une eau correspond à la somme des concentrations des ions carbonates (CO₃²⁻) et des ions hydroxydes (OH⁻). La mesure alcalimétrique TA se fait par méthode titrimétrique, cette détermination est basée sur la neutralisation d'un certain volume d'eau à analyser par l'acide chlorhydrique (HCL) dilué en présence de phénophtaléine (RODIER,2009).

✓ **Matériel et Réactif**

- Erlenmeyer
- Burette
- solution d'HcL 0.02N
- solution de phénophtaléine 0.5%

✓ **Mode opératoire**

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

$$TA \text{ (meq/L)} = (NHCL \times V \text{ HCL}) \times 1000 / VO$$

- NHCL : normalité de HCL
- V HCL : volume de HCL
- VO : volume de l'échantillon

Titre alcalimétrique complet (TAC)

Le TAC mesure la teneur en hydrogénocarbonate, hydroxyde libre et en carbonate contenus dans l'eau. Cette détermination est basée sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par l'acide chlorhydrique (HCL) dilué en présence de méthyle orange (RODIER, 2009).

✓ **Matériel et Réactif**

- Erlenmeyer
- Burette
- solution d'HcL 0.02N
- solution de méthyle orange 0.2%

✓ **Mode opératoire**

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

Les résultats sont exprimés par la formule suivante :

$$\text{TAC (meq/l)} = (\text{NHCL} \times \text{V HCL}) \times 1000 / \text{VO}$$

- NHCL : normalité de HCL

- V HCL : volume de HCL

- VO : volume de l'échantillon.

e) Détermination des bicarbonates (HCO₃⁻) et Carbonates (CO₃²⁻)

Les carbonates sont les sels de l'acide carbonique, les sels ont en commun l'anion (CO₃²⁻). Le carbonate le plus abondant est le carbonate de calcique (CaCO₃). Les bicarbonates sont des sels dérivés de l'acide carbonique qui contiennent l'anion (HCO₃⁻). Les carbonates totaux dissous dans les eaux sont liés à l'acide carbonique par des équilibres acide-base : H₂CO₃ = HCO₃⁻ + H⁺ p_{ka} (25°C) = 6,35 HCO₃⁻ = CO₃²⁻ + H⁺ p_{ka} (25°C) = 10,33.

Le dosage des carbonates totaux peut être réalisé très simplement par la détermination de l'alcalinité et plus précisément des titres TA et TAC, dans ce cadre ; on utilise la méthode potentiométrique (selon le tableau 3.3) : i) on prend un volume V d'eau à analyser à pH 4,5, ii) soit V₁ le volume d'acide utilisé, iii) continuer le titrage jusqu'à pH 4,2, iv) soit V₂ le volume total d'acide employé [100] :

$$\text{TAC} = ((2V_1 - V_2) \cdot N \cdot 1000) / V$$

Avec N correspond au titre d'acide utilisé.

Tableau 36. Les cas les plus fréquents des valeurs comparatives de TA, TAC pour les eaux naturelles. (RODIER, 2009).

Espèce carbonaté	Valeurs respectives des titres TA, TAC		
	Si TA=0	Si TA < TAC/2	Si TA = TAC/2
CO ₃ ²⁻	0	2TA	TAC
HCO ₃ ⁻	TAC	TAC-2TA	0

f) Mesure de la Dureté Total (TH)

Appelée aussi le titre hydrométrique (TH), détermine la concentration en sel de calcium et du magnésium dissout dans l'eau. Les alcalino-terreux présents dans l'eau sont amenés à former un complexe de type chélate par le sel disodique de l'acide éthylène diamintetracétique (EDTA). A pH=10 la disparition des dernières traces d'éléments libres à doser est décelée par le virage d'un indicateur spécifique, le noir d'Eriochrome. En milieu convenablement tamponné pour empêcher la précipitation du magnésium, la méthode permet de doser la somme des ions calcium et magnésium (RODIER, 2009).

✓ Matériel et Réactif

- Erlenmeyer
- Burette
- pH -mètre
- solution de NaOH
- d'Eriochrome T (N.E.T)
- solution d'EDTA.

✓ Mode opératoire

Dans un Erlenmeyer de 250 mL, mettre 50 ml d'eau à analyser et ajouter 4 ml de la solution tampon de NaOH (pH = 9.5 à 10) et trois gouttes d'indicateur coloré Noir d'Eriochrome T (NET). La solution se colore en rouge foncé ou violet, a ce stade, une agitation avec un titrage par la solution d'EDTA 0,02 N jusqu'au virage au bleu permet de mesurer la TH.

Les résultats sont exprimés par la formule suivante :

$$TH (f^\circ) = (N \text{ EDTA} \times V \text{ EDTA}) \times 1000/V_0$$

g) Mesure de chlore libre

La concentration en Chlore peut être exprimée en Chlore Libre, Chlore Combiné et Chlore Total. La mesure du Chlore Libre est généralement la plus importante dans la plupart des applications possibles. La méthode au DPD Palintest permet de mesurer le Chlore Libre, Combiné et Total.

Les réactifs sont dans cette méthode fournis sous forme de pastilles afin de simplifier l'utilisation. Le Chlore Libre réagit avec la molécule DPD (Diéthyl-p-Phénylène-Diamine) afin de produire une coloration rosâtre. L'intensité de cette couleur produite est proportionnelle à la concentration en Chlore Libre recherchée (RODIER, 2009).

✓ Matériel et Réactif

- cuve propre

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

✓ **Mode opératoire (Méthode Colorimétrique)**

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

h) Mesure de TDS (Total Dissolved Solides)

Les sels dissous totaux représentent une évaluation totale des sels minéraux contenus dans l'eau (en solution). Le total des matières solides dissoutes estime le résidu total qui reste après évaporation d'un échantillon d'eau. Evaluer les solides dissous totaux : consiste à une mesure de la teneur combinée de tous les minéraux et organiques des substances contenues dans l'eau.

Après mesure à l'aide d'un conductivimètre (hach sension) puis conversion ; on utilise l'expression suivante [100] :

$$TDS = \lambda \cdot 0,6$$

Tel que :

λ : La conductivité (\square S/cm)

0,6 : Facteur de conversion

Méthode 1

La méthode classique utilisée pour mesurer cette dernière est basée sur l'évaporation comme nous présentons ci-dessous :

Après avoir pesé un bécher vide m_0 , on prend un volume v : 10 ml d'échantillon d'eau saumâtre au même bécher; on l'évapore dans une plaque chauffante, puis on le pèse une deuxième fois m_1 , et on utilise l'expression suivante:

$$TDS = \frac{(m_1 - m_0)}{v}$$

Tel que :

m_0 : La masse vide du bécher.

m_1 : La masse après évaporation.

v : Le volume d'eau traitée.

Méthode 2-

Au niveau de laboratoire de la station de dessalement, la mesure de la concentration des solides dissous se fait par le rapport entre conductivité (μ S/cm) et concentration ionique (ppm), qui s'exprime par :

2 x (conductivité) en $\mu\text{s}/\text{cm}$ = 1 x (TDS) en ppm (partie par million), où 1 ppm = 1 mg/l correspond à la concentration en solide dissous. et même à l'aide appareil multi-paramètre (hach sension).

✓ **Matériels et réactifs**

- Un Becher.
- conductimètre

✓ **Mode opératoire**

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

I.4.2.3. Paramètres chimiques

a) Dosage de Nitrite (NO₂-)

Le dosage de nitrites comprend :

- la solution mère SM
- Contrôle de qualité :

Prélever 1 ml de (SM) dans une fiole jaugée de 50 ml, puis complété avec l'ED. Prélever à partir de cette solution 0.36 ml dans une autre fiole jaugée de 50 ml, et ajouter 1 ml de réactif coloré pour NO₂, ensuite on complète avec l'eau distillée (ED). Une incubation à 25 °C pendant 20 mn.

Après incubation, prélever 10 ml dans une cuve propre, et faire introduire dans le spectrophotomètre. La valeur doit être comprise entre [0.036 et 0.026].

- Le blanc

Dans une fiole jaugée de 50 ml, on met quelques millilitres d'eau distillée et 1 ml de réactif chloré et on complète jusqu'au trait de jauge. Après une incubation à 25 °C pendant 20 mn, on introduit environ 2 ml de cette suspension (le blanc) dans une cuve et la mettre dans le spectrophotomètre ; l'appareil doit afficher la valeur de zéro.

✓ **L'échantillon**

Prélever 40 ml d'eau à analyser dans une fiole jaugée de 50 ml et ajouter 1 ml de réactif coloré. Compléter avec l'eau distillée. Après incubation à 25 °C pendant 20 mn, on met 2 ml de cette solution dans une cuve, et introduire cette dernière dans le spectrophotomètre, la lecture du taux de nitrite se fait à une longueur d'onde de 540nm.

b) Dosage des chlorures

Les chlorures sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent en présence de chromate de potassium. La fin de la réaction est indiquée par l'apparition de la teinte rouge caractéristique du chromate d'argent.

Dans ce cadre : on introduit 100 ml d'eau à analyser, on ajoute 2 à 3 gouttes d'acide nitrique pur, puis une pincée de carbonate de chaux et 3 gouttes de solution de chromate de Potassium à 10 %. Verser alors au moyen d'une burette la solution de nitrate d'argent jusqu'à l'apparition d'une teinte rougeâtre, qui doit persister 1 à 3 minutes (Rodier, 2009).

Dosage de sodium et de potassium

La méthode de dosage du potassium et du sodium par spectrométrie d'émission de flamme est souvent suffisante pour les eaux naturelles ; qui consiste à :

- Nébuliser l'échantillon dans une flamme air-acétylène en intercalant de l'eau permutée entre chaque solution.
- Effectuer les lectures au spectromètre de flamme à la longueur d'onde : de 589 nm pour le sodium, et de 766,5 nm pour le potassium.
- Régler le zéro de l'appareil avec de l'eau dé-ionisée.
- Se reporter à la courbe d'étalonnage : préparer, à partir de la solution fille, des dilutions dans l'eau dé-ionisée ou ultra-pure (acidifiée à $\text{pH} < 2$ par l'acide nitrique) couvrant la gamme de concentrations souhaitées (utiliser des tampons pour le potassium ainsi que pour le sodium), mais pour préparer les solutions mère on utilise des sels des chlorures de sodium et des chlorures de potassium (Rodier, 2009).

c) Dosage des sulfates

L'ion sulfate précipite dans l'acide chlorhydrique contenant le chlorure de baryum de manière à former des cristaux de sulfate de baryum (Rodier, 1996). L'absorbance de la suspension de sulfate de baryum est mesurée avec un turbidimètre. Une courbe d'étalonnage entre la lecture du turbidimètre et la concentration de la solution de sulfates standard a été préparée, elle sera linéaire sur la plage des concentrations étudiées.

Cette courbe sera utilisée pour calculer les concentrations de l'ion sulfate dans les solutions d'alimentation et dans les solutions de perméat. Trois échantillons de solution de sulfate ont été préparés pour des concentrations allant de 10 à 80 mg/l.

d) Dosage de sulfate

Pour le dosage de sulfate on a utilisé des gélules de sulfates commercialisées dans des pochettes. Le dosage de sulfate comprend :

- ✓ Le blanc

Prélever 10 ml d'ED dans une cuve, et incuber à 25 °C pendant 5 mn. Introduit la cuve dans le spectrophotomètre. L'appareil doit afficher la valeur de zéro.

✓ L'échantillon

Prélever 10 ml d'eau à analyser dans une cuve, et ajouter une gélule de sulfate. Une incubation pendant 5 mn à 25 °C, après avoir mettre le spectrophotomètre en marche. On introduit la cuve dans le spectrophotomètre, la lecture du taux de sulfate se fait à une longueur d'onde de 680 nm

e) Dosage du calcium et du magnésium

On utilise la méthode titré-métrique à l'EDTA pour le cas de la dureté totale selon les étapes suivantes :

- i) introduire 50 ml d'eau à analyser dans une fiole conique de 250 ml,
- ii) ajouter 4 ml de solution tampon et trois gouttes de solution de noir ériochrome T: la solution se colore en rouge foncé ou violet, le pH doit être de 10, en maintenant une agitation, verser la solution d'EDTA rapidement au début puis goutte à goutte lorsque la solution commence à virer au bleu,
- iii) vérifier que la coloration ne change plus par l'addition d'une goutte supplémentaire d'EDTA.

La concentration totale en calcium et magnésium s'exprime comme suit :

$$1000. c. \frac{V_1}{V_2}$$

Tel que:

c = Concentration en milliéquivalents par litre de la solution d'EDTA.

V1 = Volume en ml de la solution d'EDTA.

V2 = Volume en ml de l'échantillon.

De la même façon ; on déduit la dureté calcique. La différence entre la dureté totale et la dureté calcique indique la concentration de magnésium de notre échantillon (Rodier, 2009).

f) Mesure de calcium (Ca +2)

Pour déterminer la dureté calcique on utilise l'EDTA comme complexant, auparavant le dosage se fait à un pH élevé (12-13) où le magnésium est précipité sous forme Mg(OH)₂ et n'intervient pas dans la réaction. L'indicateur utilisé est le calcone carboxylique ou le Murixide qui est sensible aux seuls ions Ca⁺² pour former un complexe rouge (Rodier, 2009).

✓ Matériel et Réactif :

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

✓ Mode opératoire

Prélever 50 ml d'eau à analyser dans un Erlenmeyer de 250 ml, et ajouter 3 ml de la solution NaOH (0.1N) et une pincée de Murexide, puis remuer soigneusement pour homogénéiser la solution, une couleur rose se produit. Un titrage par l'EDTA (0.02N) à lieu jusqu'au virage vers le rose au pourpre.

La dureté calcique est calculée par la formule suivante :

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

- NHCL : normalité de HCL
- V HCL : volume de HCL
- VO : volume de l'échantillon
- 20: masse atomique de Calcium.

g) Mesure de Magnésium (Mg²⁺)

Le magnésium peut être estimé par la différence entre la dureté de l'eau et le calcium exprimé en CaCO₃ (RODIER, 2009).

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

La dureté magnésienne est calculée par la formule suivante :

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

I.4.3. Autopsie de la membrane

L'une des méthodes les plus probantes pour détecter le biocolmatage est l'autopsie membranaire qui est une technique destructive (Femming, 1997 ; Vrouwenvelder et al., 2008 ; Lee et Kim, 2011).

Dans ce travail, nous avons réalisé une autopsie de la membrane pour identifier les différentes causes d'une mauvaise performance de la membrane.

Afin de déterminer la nature de l'encrassement de la membrane présent à sa surface, nous avons effectué plusieurs techniques analytiques. L'autopsie d'une membrane d'osmose inverse comprend une étude exhaustive de la surface de la membrane et de l'espaceur de rejet des aliments, une analyse chimique et microbiologique du dépôt qui recouvrait la surface de la membrane.

I.4.3.1. Analyse de la membrane autopsiée

I.4.3.1.1. Contrôle visuel de la membrane autopsiée

Afin d'évaluer l'état externe et interne de la membrane, nous avons effectué une inspection de la membrane pour vérifier les dommages physiques de l'enveloppe, les dépôts sur l'enveloppe externe, le télescopage, les dépôts aux extrémités de la membrane et leurs dimensions. Nous avons également inspecté l'état interne, y compris l'étendue de l'encrassement, les dommages à la surface de la membrane, l'état des lignes de colle, l'état du matériau d'écartement et l'état du matériau de support.

L'analyse de l'encrassement retiré de la surface de la membrane est très utile pour distinguer les composants de la membrane et les composants de l'encrassement et parce que c'est un moyen de concentrer les composants de l'encrassement et d'avoir une identification plus précise de celui-ci.

I.4.3.1.2. Intégrité de la membrane

Un certain nombre de tests ont été effectués afin de vérifier les dommages physiques et chimiques de la membrane. Le test au bleu de méthylène a été effectué pour détecter si la membrane est endommagée, puis le test de Fujiwara a été utilisé pour détecter les niveaux significatifs de composés polyhalogénés.

En outre, nous avons effectué une analyse par spectroscopie infrarouge (ATR/FTIR) pour étudier les conditions des bandes de polyamide sur une surface de membrane propre afin de détecter les dommages structurels/oxydation. La spectrométrie de réflexion interne fournit des informations relatives à la présence ou à l'absence de groupes fonctionnels spécifiques. La spectrométrie infrarouge à réflectance totale atténuée (ATR/IR) peut fournir des informations précieuses sur la structure chimique de la membrane, elle est donc très utile pour détecter d'éventuels dommages structurels sur la composition de la membrane.

En général, l'identification des dommages de la couche de polyamide par IR, doit considérer les bandes suivantes :

- Coude N-H de l'amide II : 1540 cm^{-1}
- Vibrations cycliques C=C : près de 1610 et 1448 cm^{-1}

L'intensité de ces bandes sur l'échantillon de membrane doit être comparée à celle d'une membrane vierge afin de vérifier s'il y a un changement significatif sur l'échantillon de membrane.

Afin de vérifier l'intégrité de la couche de polyamide de la membrane autopsiée, un nettoyage mécanique de la surface de la membrane a été effectué. Les spectres IR obtenus à partir de la surface nettoyée en première position sont comparés au spectre d'une membrane vierge.

I.4.3.2. Analyse du dépôt colmatant

I.4.3.2.1. Analyse des composants organiques

La teneur en matière organique du polluant a été estimée par la méthode de la perte au feu (LOI). Perte au feu - La perte au feu (LOI) est une méthode courante et largement utilisée pour estimer la teneur en matières organiques des matières polluantes. La matière organique est oxydée à 500-550 °C en dioxyde de carbone et en cendres. La perte de poids au cours de cette réaction est facilement mesurée en pesant l'échantillon sec (LOI 105 °C) avant et après le chauffage et est étroitement corrélée à la matière organique.

I.4.3.2.2. Analyses chimiques

Microscopie à balayage électronique - Analyse par rayons X à dispersion d'énergie (SEM-EDX) : il s'agit de l'outil analytique le plus puissant pour obtenir un aperçu de la composition de l'encrassement. L'outil analytique le plus puissant pour obtenir une composition de l'encrassement.

La méthode microscopique à balayage électronique (MEB) est la plus répandue. Cette technique produit des images qui montrent clairement les dépôts de tartres et les couches de biofilm sur la surface de séparation, permettant ainsi de détecter les changements des propriétés physiques de ces membranes (Chen, 1990).

La spectroscopie des photoélectrons en rayons X « XPS », est une autre méthode qui a été utilisée avec succès pour déterminer les petites quantités des espèces présentes sur la surface de la membrane. L'analyse aux rayons X à dispersion d'énergie (SEM-EDX) est basée sur l'analyse des rayons X produits par l'excitation d'une zone de l'échantillon par un faisceau d'électrons. Cette technique permet d'analyser un échantillon dans des zones sélectives. La profondeur limitée de l'analyse (généralement quelques microns) et la possibilité de sélectionner une zone d'intérêt très spécifique permettent une analyse locale qui révèle les différences de composition. L'identification et la mesure des intensités des pics individuels dans le spectre des rayons X sont effectuées à l'aide d'un analyseur multicanaux informatisé.

Le SEM-EDX est utilisé dans notre étude pour obtenir une vue générale et détaillée de la surface de la membrane (extension de l'encrassement, marques d'abrasion, etc.) et pour obtenir une détermination élémentaire de la composition de l'encrassement.

En outre, nous avons utilisé la spectroscopie infrarouge (ATR/FTIR) qui identifie les groupes fonctionnels caractéristiques afin d'identifier les composants organiques et inorganiques de l'encrassement.

I.4.3.2.3. Analyses microbiologiques

En raison du fonctionnement continu des membranes avec de l'eau de mer, la présence de certains microorganismes sur la surface de la membrane est attendue (bactéries aérobies par exemple). Quatre paramètres microbiologiques caractéristiques sont quantifiés afin d'obtenir une approche de la charge microbiologique à la surface des membranes : i) Bactéries aérobies ; bactéries sulfito-réductrices; *Pseudomonas Sp.* ; moisissures et levures.

CHAPITRE II :

RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE II: RESULTATS ET DISCUSSION

Dans une première étape, nous allons présenter les résultats et une discussion de notre étude. Dans un premier temps, nous décrirons les caractéristique chimique, physico-chimique de l'eau de mer, de l'eau produite et la saumure.

Par la suite, nous donnerons l'évolution de différents paramètres à savoir : la conductivité, le flux et le taux de conversion pour les deux modes de fonctionnement évoqués dans le chapitre

II.1. CARACTERISTIQUE DE L'EAU TRAITEE PAR L'UNITE DE « CAP DJINET »

II.1.1 Paramètres organoleptiques

a) Couleur

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

b) Odeur

La perception des substances responsables des odeurs est un critère indispensable aussi.

Après traitement, l'eau devient inodore et ne présente aucune odeur désagréable.

c) Goût

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

d) Turbidité

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

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

II.1.2 Paramètres physico-chimiques

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

Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 37. Les concentrations des paramètres physico-chimiques des échantillons analysés de l'eau produite

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

a) Chlore libre

Le chlore résiduel est le chlore resté libre après 30 minutes de contact ; il constitue une forme de sécurité pour traiter des petites contaminations éventuelles de l'eau. Le taux de chlore libre fluctue entre 0,40 et 0,43 ppm (Figure 51), avec une valeur moyenne mensuelle de 0,42 ppm. Cette valeur est largement inférieure à la valeur préconisée par l'OMS qui est de 5ppm.



Figure 51 : Variations mensuelles de la teneur en Chlore libre

b) Dureté totale

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

Dans les eaux étudiées (Figure 52), cet élément présente une dureté allant de 69,61 à 70,09 mg/l en CaCO_3 avec une valeur moyenne mensuelle de 69,85 mg/l. Les valeurs enregistrées s'avèrent supérieures à la valeur minimale admissible recommandée par les normes de l'OMS qui est 65 mg/l.

La présence des ions Ca^{2+} dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles :

- soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3),
- soit la dissolution de formations gypseuses (CaSO_4).

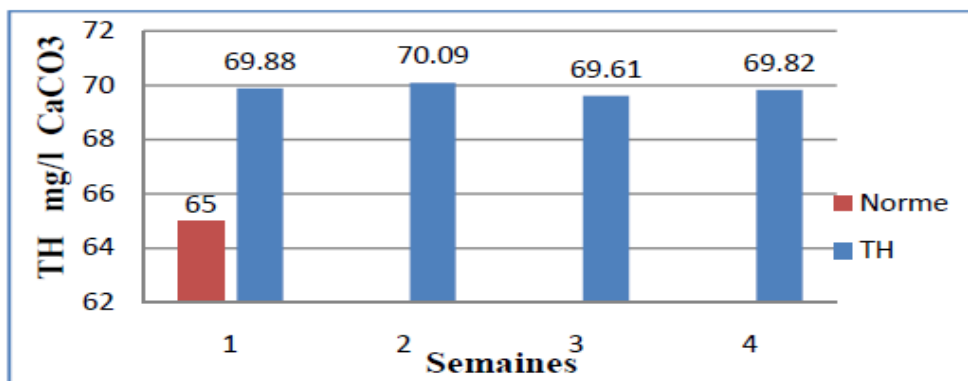


Figure 52 : Variation du titre hydrotimétrique

Sur une semaine, les mesures de la dureté totale de l'eau traitées sont comprises entre 65,31 et 65,98 mg/l en CaCO_3 avec une valeur moyenne de 65,65 mg/l (Figure 53). Les valeurs enregistrées s'avèrent légèrement supérieures à la valeur minimale admissible recommandée par la norme de l'OMS qui est 65 mg/l et inférieures à la valeur maximale admissible recommandée par la norme algérienne (NA) qui est 500 mg/l.

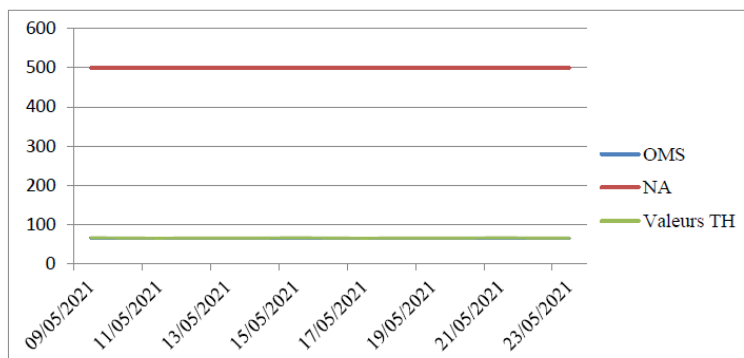


Figure 53 : Variations mensuelles du titre hydrotimétrique

c) Total des solides dissous (TDS)

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

Les résultats obtenus après l'analyse des eaux de consommation ont montré que le taux du TDS varie entre 306 et 343 ppm (Figure 54), soit une valeur moyenne mensuelle de 327 ppm. Les valeurs de TDS se révèlent conformes aux normes préconisées par l'OMS qui sont de 150 à 500 ppm dans les eaux traitées par dessalement.

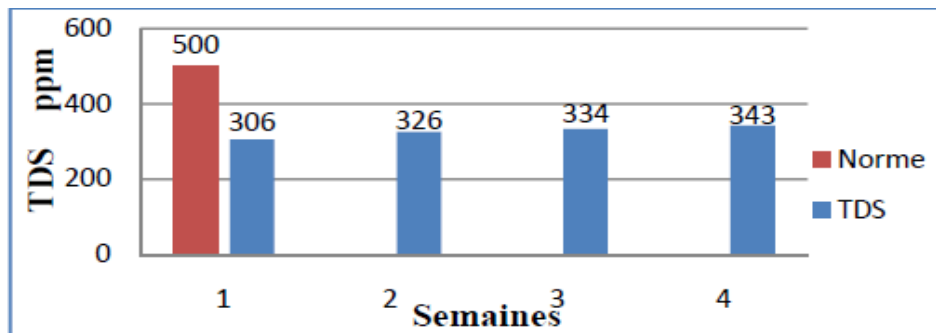


Figure 54 : Variations mensuelles de la teneur en Total des solides dissous

Les variations sur une semaine indiquent que le taux du TDS varie entre 219 et 246 ppm, soit une valeur moyenne mensuelle de 232,5 ppm. Ces valeurs sont conformes aux normes préconisées par l'OMS qui sont de 150 à 500 ppm dans les eaux traitées par dessalement (Figure 55).

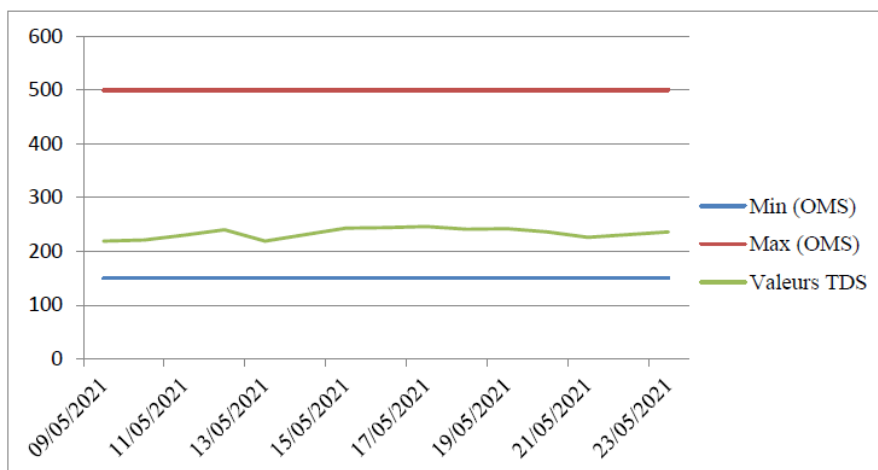


Figure 55 : Variations mensuelles du Total des solides dissous

d) Potentiel d'hydrogène (pH)

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

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

Les valeurs du potentiel Hydrogène des eaux traitées sont comprises entre 8.35 et 8.39

(Figure 56) avec une valeur moyenne mensuelle de 8,7. Se référant aux normes de qualité de l'eau potable, les valeurs du pH des eaux traitées sont conformes à la norme de l'OMS dont les valeurs sont fixées de 6,5 à 8,5.

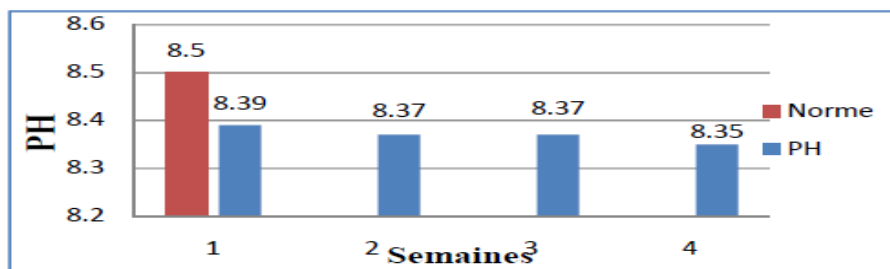


Figure 56 : Variations du potentiel hydrogène

Les variations des valeurs du pH des eaux traitées sur une semaine se situent entre 8,28 et 8,36 avec une valeur moyenne de 8,32 ; ces valeurs sont conformes à la norme de OMS et à la norme algérienne (NA) dont les valeurs sont fixées de 6,5 à 8,5 et de 6,5 à 9 respectivement (Figure 57).

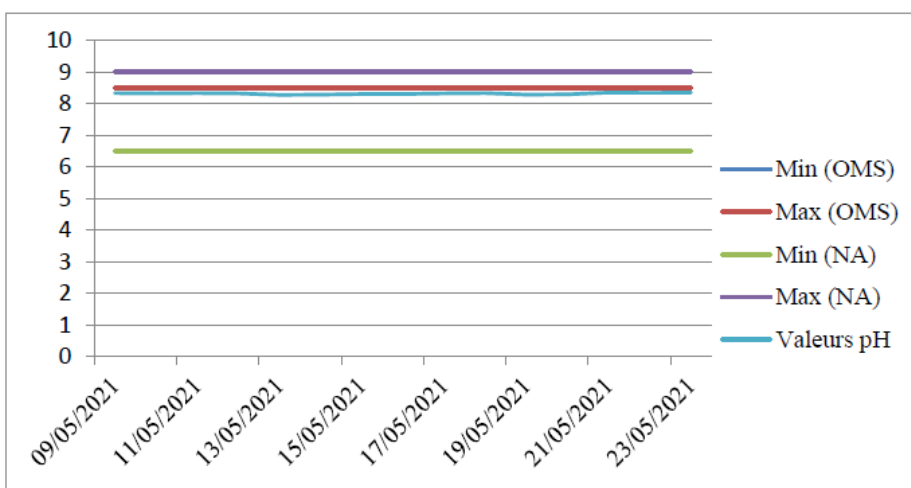


Figure 57 : Variations mensuelles du potentiel hydrogène

e) La température

La température de l'eau produite varie entre 18,4 et 21,3 °C (Figure 58). L'OMS ne mentionne aucune référence concernant la température de l'eau potable. La norme algérienne indique une valeur maximale de 25 °C, donc ces résultats sont conformes.

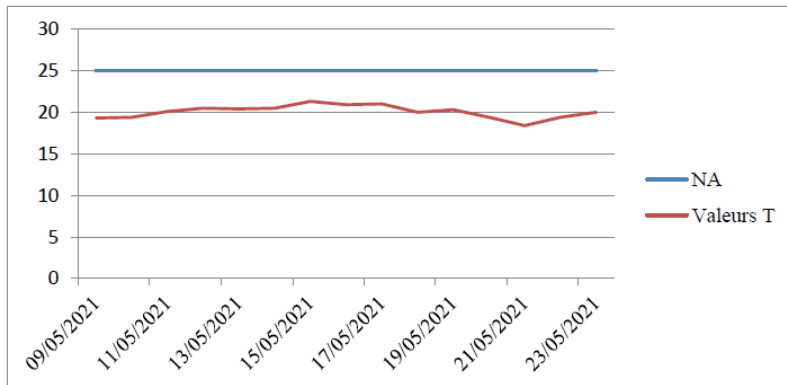


Figure 58 : Variation de la température

f) Conductivité électrique

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

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

Les valeurs enregistrées pendant les analyses sont entre 615 et 685 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figure 59), avec une valeur moyenne mensuelle de 655 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

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

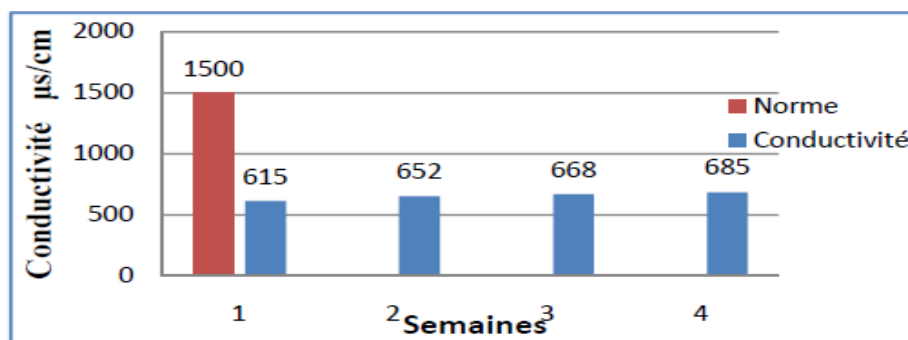


Figure 59 : Variations mensuelles de la conductivité

Les mesures de la conductivité électrique de l'eau traitée sur une semaine sont comprises entre 438 et 492 $\mu\text{s}/\text{cm}$ avec une valeur moyenne de 465 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Ces valeurs sont conformes à la norme de l'OMS, et même pour la norme algérienne dont les concentrations maximales admissibles respectivement sont inférieures à 1500 $\mu\text{s}/\text{cm}$ et 2800 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (Figure 60).

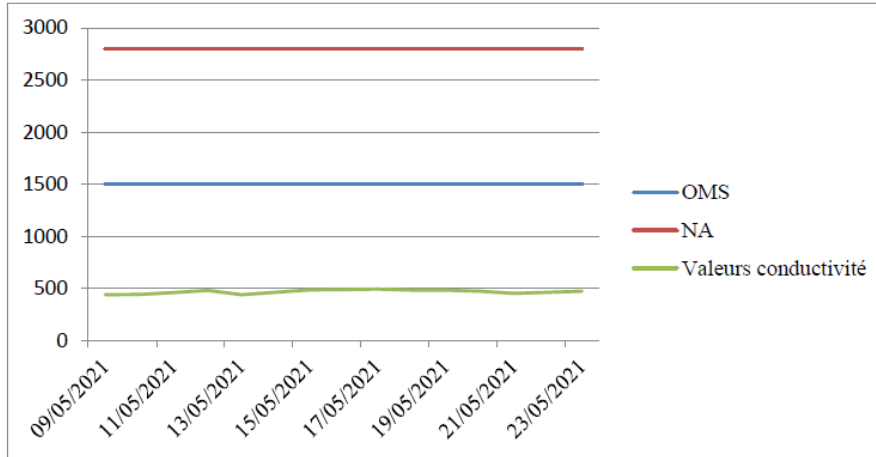


Figure 60 : Variations mensuelles de la conductivité électrique

g) Dureté calcique

Le calcium est présent dans les eaux de mer et contribue de façon importante à leur dureté. Les résultats montrent des valeurs comprises entre 55,21 et 60,55 $\text{mg}/\text{l CaCO}_3$ (Figure 61) avec une valeur moyenne mensuelle de 58,84 $\text{mg}/\text{l CaCO}_3$. Ces valeurs sont également conformes aux normes de l'OMS dont les concentrations maximales admissibles sont inférieures à 75 mg/l .

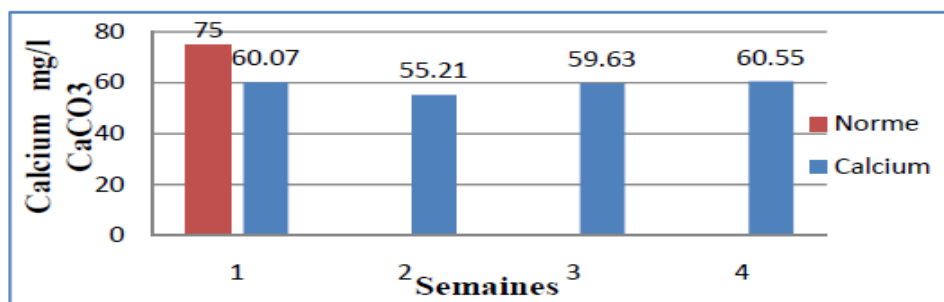


Figure 61 : Variations mensuelles de la teneur en CaCO_3

h) Dureté magnésienne

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

Les valeurs enregistrées pendant les analyses sont entre 9,26 et 14,88 mg/l en CaCO₃

(Figure 62), avec une valeur moyenne mensuelle de 10,96 mg/l.

Les valeurs de la dureté magnésienne pour l'eau de consommation sont conformes à la norme de l'OMS, dont les concentrations maximales admissibles sont inférieures à 150 mg/l en CaCO₃.

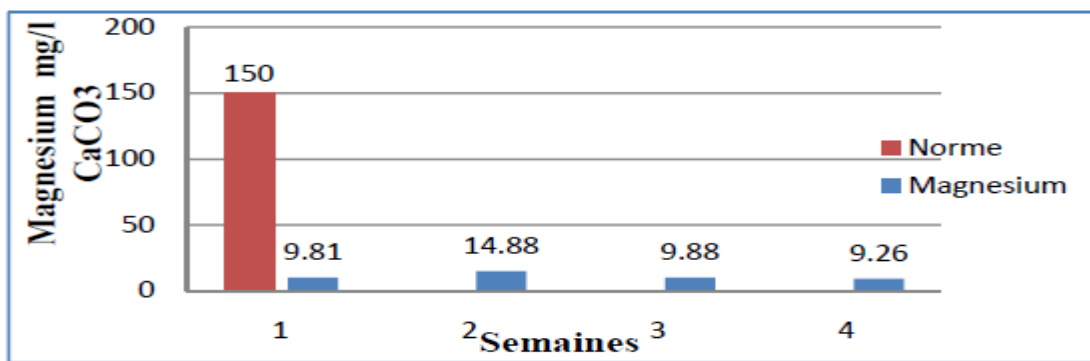


Figure 62 : Variations mensuelles de la teneur en Magnesium

i

Les résultats montrent des valeurs comprises entre 2,51 et 2,89 ppm CaCO₃ (Figure 63) avec une valeur moyenne mensuelle de 2,71 ppm en CaCO₃. L'OMS ne mentionne aucune référence quant au titre alcalimétrique TA de l'eau potable.

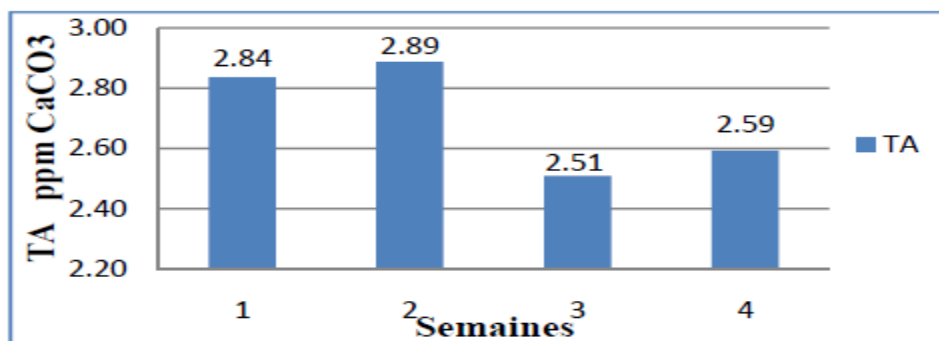


Figure 63 : Variations mensuelles de la teneur en TA

j) Titre alcalimétrique complet TAC

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

Nos résultats d'analyses montrent une présence du titre alcalimétrique complet qui varie entre 60,05 et 60,26 ppm (Figure 64) avec une valeur moyenne mensuelle de 60,17 ppm. Ces valeurs sont également conformes aux normes de l'OMS qui limitent le taux de titre alcalimétrique complet des eaux de consommation de 50 à 65 ppm en CaCO_3 .

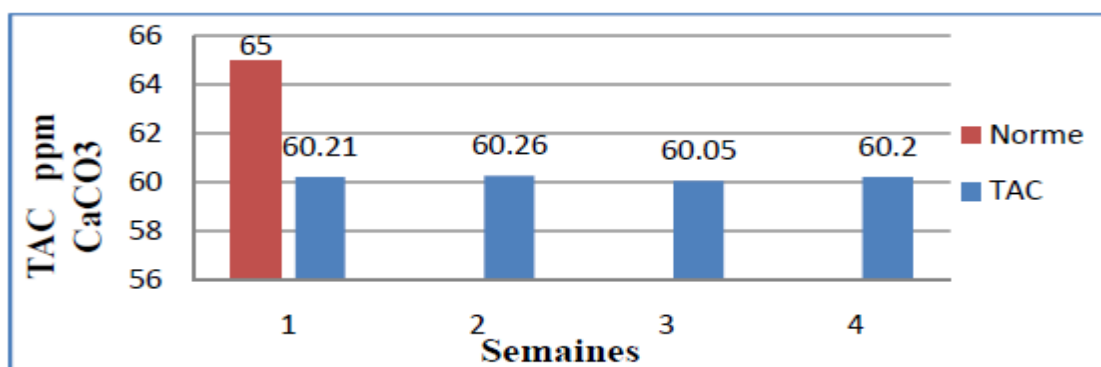


Figure 64 : Variations mensuelles de la teneur en TAC

II.1.3. Paramètres chimiques

Les concentrations des différents paramètres chimiques sont représentées dans le tableau 39 récapitulatif de la série de données effectuées pendant la période d'échantillonnage.

Tableau 38. Les concentrations des différents paramètres chimiques

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

a) Teneur en Bore

La concentration en Bore des échantillons analysés varie entre un minimum de 0,8 ppm et un maximum égal à 0,9 ppm (Figure 65). Selon le contrat d'achat de l'eau, la teneur en Bore doit être inférieure à 1 ppm, avec une valeur moyenne mensuelle de 0,84 ppm. Les concentrations quotidiennes obtenues ne dépassent pas les lignes directrices fixées par l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable.

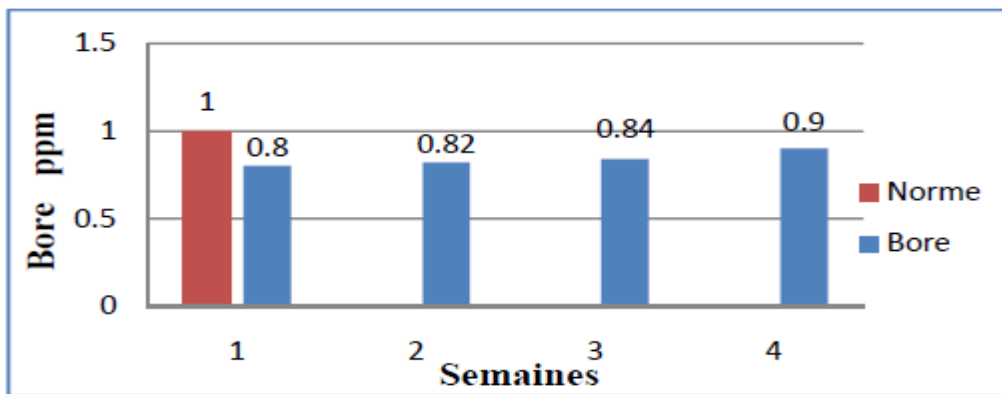


Figure 65 : Variations mensuelles de la teneur en Bore

Le bore est présent avec des teneurs respectives de 0,665 mg/l comme valeur minimale ; 0,733 mg/l comme valeur maximale et 0,699 mg/l comme valeur moyenne (Figure 66). Les concentrations quotidiennes obtenues ne dépassent pas les lignes directrices fixées par l'OMS et la norme algérienne (NA) en ce qui concerne la qualité de l'eau potable.

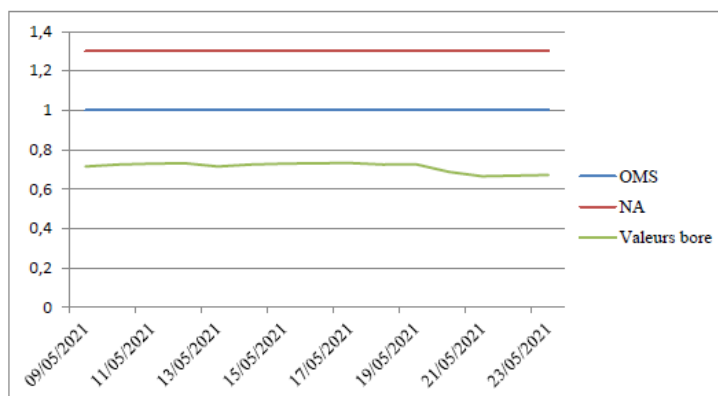


Figure 66 : Variation mensuelle du bore

b) Chlorures

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

Nos résultats d'analyses montrent une présence d'une teneur en chlorure qui varie entre 143 et 169 mg/l (Figure 67). Cette variation est due à l'étape de poste chloration qui enrichie également cette eau en chlorures.

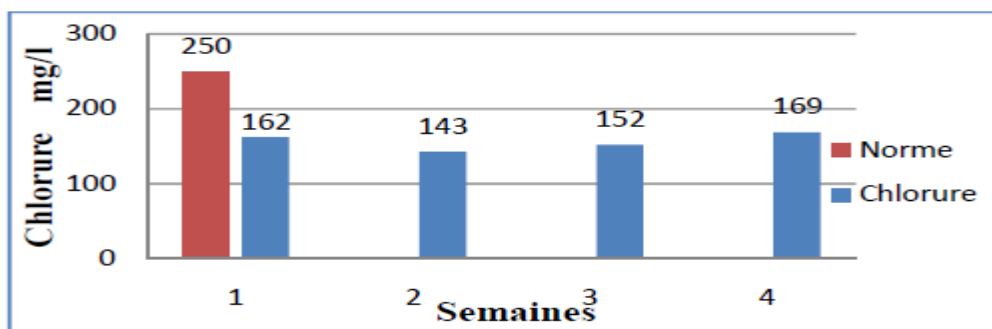


Figure 67 : Variations mensuelles de la teneur en Chlorure.

Le chlore est l'un des réactifs le plus utilisés lors de la désinfection. Les eaux destinées à la consommation humaine, ont une teneur en chlorure inférieure à 250 mg/l selon la norme OMS et 500 mg/l selon la norme algérienne (NA). Les résultats de chlorures mesurés dans les échantillons de la station de dessalement se situent entre 110 et 120 mg/l avec une moyenne de 115 mg/l (Figure 68) et sont conformes et inférieurs aux valeurs limites fixées par les normes OMS et algériennes.

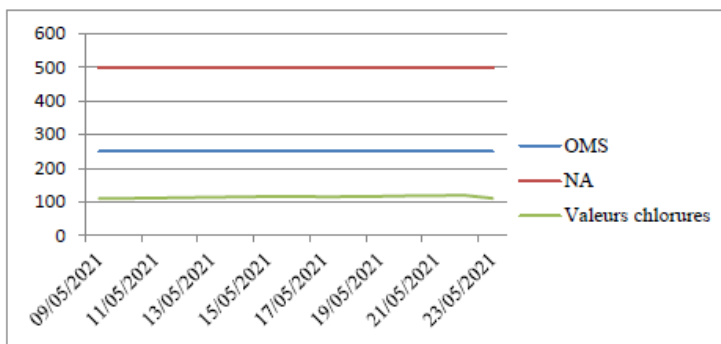


Figure 68 : Variations mensuelles du chlorure

c) Nitrites

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

La mesure des teneurs en nitrites montre des valeurs de 1,2 à 2,3 mg/l, soit une valeur moyenne mensuelle de 1,85 mg/l (Figure 69). Ces valeurs restent relativement inférieures à la valeur recommandée en nitrites selon l'OMS, fixée à 3 mg/l.

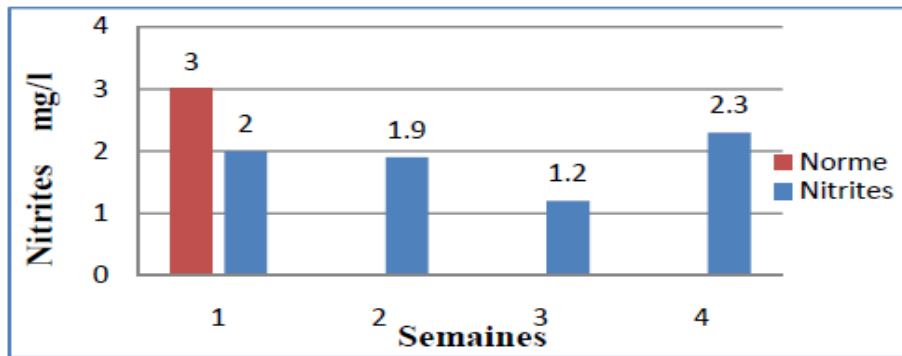


Figure 69 : Variations mensuelles de la teneur en Nitrites

d) Nitrates

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

Cependant les eaux traitées ne sont pas assujetties à un risque de pollution par les nitrates du fait que les valeurs enregistrées lors des analyses oscillent entre un minima de 33,8mg/l et un maxima de 39,9 mg/l (Figure 70) et qui restent d'ailleurs inférieures à la valeur admissible de la norme de l'OMS.

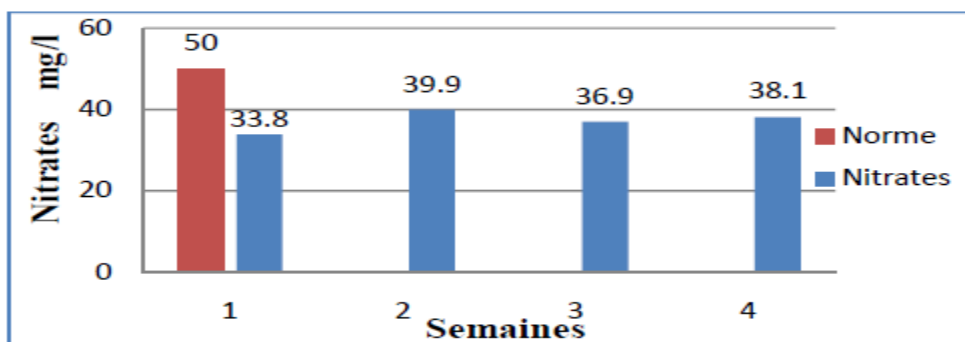


Figure 70 : Variations mensuelles de la teneur en Nitrates

e) Sulfates

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

La présence des sulfates résulte de l'oxydation des sulfures répandus dans les roches.

Notre eau a une teneur en sulfate qui varie entre 60 et 67,8 mg/l (Figure 71). Les teneurs élevées en sulfates dépendent généralement de l'étape de dosage de réduction du chlore par le bisulfite de sodium qui enrichit également cette eau en sulfate.

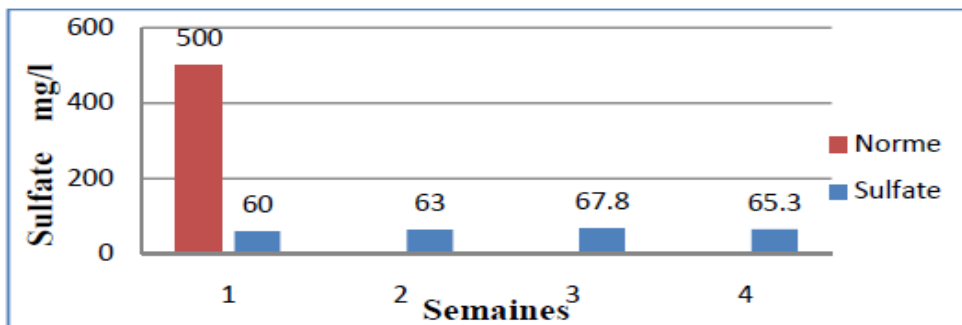


Figure 71 : Variations mensuelles de la teneur en Sulfates

f) Sodium

Il s'agit d'un élément indispensable, en petites quantités, à tous les organismes vivants.

Une concentration élevée de sodium peut procurer à l'eau un goût sale. Le sodium présent dans l'eau potable peut avoir des effets nocifs sur la santé des personnes qui suivent un régime appauvri en sel.

Nos résultats d'analyses montrent une présence d'une teneur en sodium qui varie entre 34 et 42 mg/l (Figure 72) avec une valeur moyenne mensuelle de 38,5 mg/l. Ces valeurs sont également conformes aux normes de l'OMS qui limitent le taux de sodium des eaux de consommation à 200 mg/l.

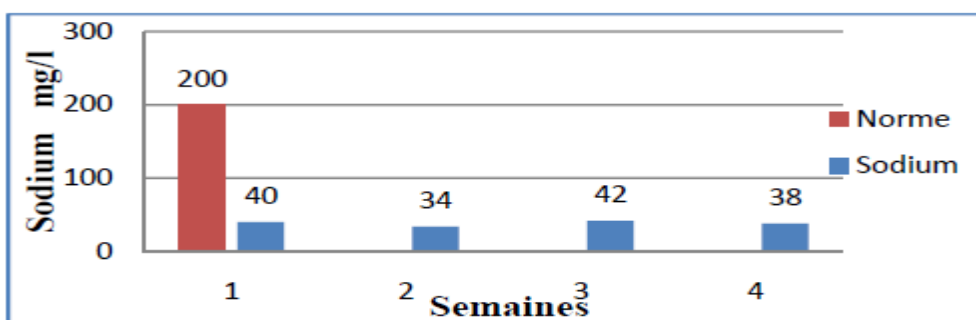


Figure 72 : Variations mensuelles de la teneur en Sodium

g) Potassium

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

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

La mesure des teneurs en potassium montre des valeurs variant de 11,7 à 14,9 mg/l, soit une valeur moyenne mensuelle de 13,05 mg/l (Figure 73). Ces valeurs restent relativement inférieures à la valeur recommandée selon l'OMS, fixée à 20 mg/l.

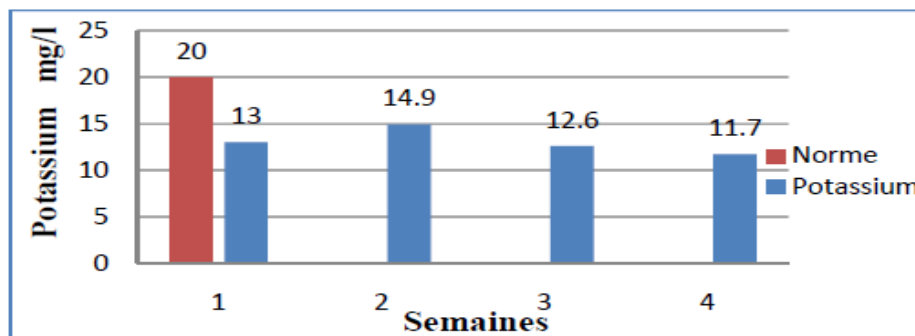


Figure 73 : Variations mensuelles de la teneur en Potassium

h) Fer

Les concentrations des eaux traitées en Fer varient de 0,1 à 0,24 mg/l (Figure 74), soit une teneur moyenne mensuelle de 0,18 mg/l. L'OMS ne mentionne aucune référence quant à la valeur admissible en Fer dans l'eau potable. Ces valeurs sont inférieures à la norme algérienne de potabilité de l'eau qui est de 0.3mg/l.

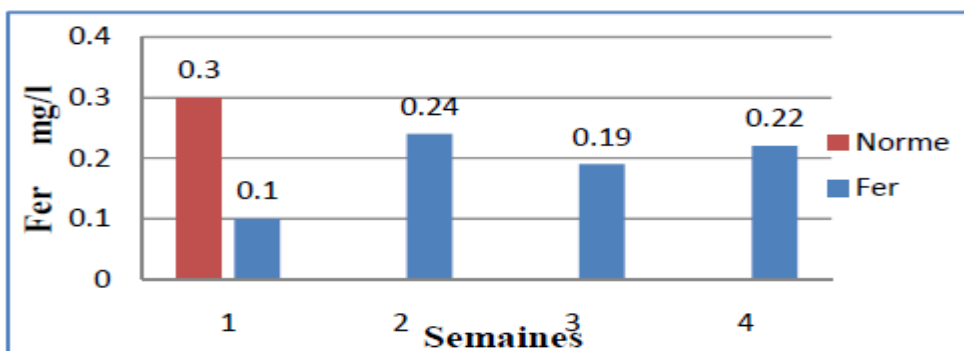


Figure 74 : Variations mensuelles de la teneur en Fer

II.1.4. Comparaison des caractéristiques de l'eau de mer et de la saumure

Les résultats des analyses chimiques et physico-chimiques de l'eau de mer et de saumure pour les échantillons prélevés le même mois que l'eau traitée sont présentés dans le tableau 40 suivant :

Tableau 39. Les concentrations des paramètres chimiques et physico-chimiques de AEI'eau de mer et de la saumure

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

a) Température

C'est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision.

En effet celle-ci joue un rôle dans la solubilité des gaz, dans la dissociation des sels dissous et dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et les mélanges éventuels, etc.

Les valeurs de température sont entre 18,4 et 19,7 °C. L'OMS ne mentionne aucune référence quant à la température de l'eau potable. Dans la zone d'étude, nous avons remarqué que la température indique les 18,9 °C (figure 76).

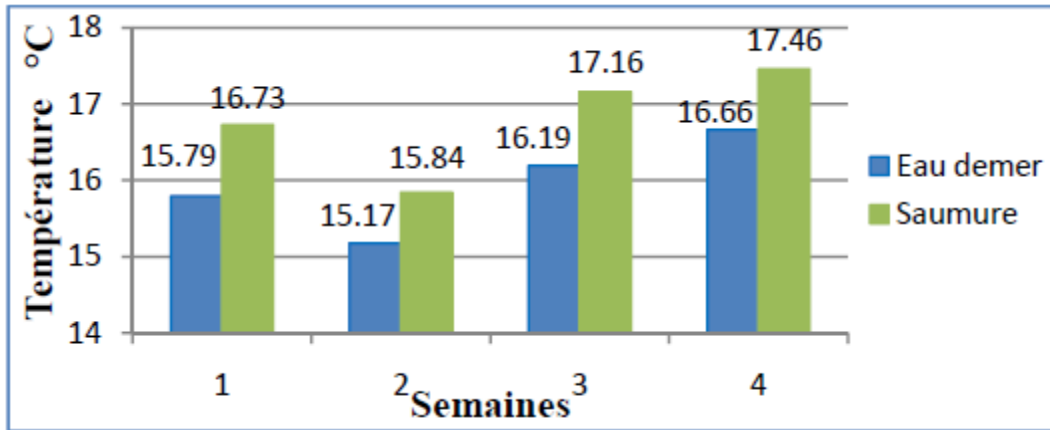


Figure 75 : Variations mensuelles de la Température pour l'eau de mer et la saumure

b) Total des solides dissous

La valeur moyenne de TDS est élevée pour l'eau de mer ainsi que la saumure (Figure 76), elle varie de 35,31 à 36,11 g/l pour l'eau de mer et de 68,1 à 68,61 pour la saumure, avec des valeurs moyennes mensuelles respectivement de 35,73 g/l et 68,34g/l, cela est due à la forte présence d'ions dans l'eau de mer.

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

A partir des valeurs moyennes mensuelles de TDS des deux eaux, on déduit que le taux rejeté est de l'ordre de 91,27%. Ce dernier est légèrement inférieur à la valeur pour laquelle le système d'osmose inverse est conçu et qui est de 99%, nous l'expliquons par un colmatage négligeable des membranes.

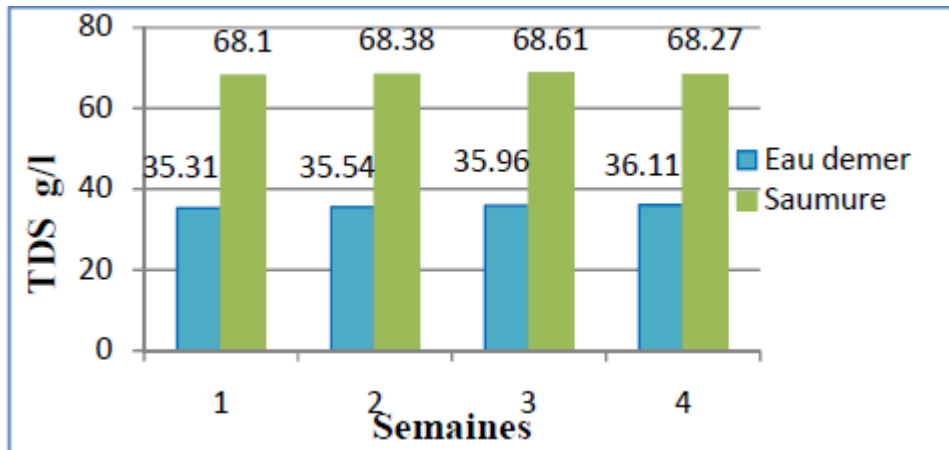


Figure 76 : Variations mensuelles du TDS pour l'eau de mer et la saumure.

c) pH

Le pH des eaux de mers n'est pas fixe car leur contenu en carbone varie. Le PH des eaux superficielles est généralement compris entre 8,18 et 8,2 (Figure 77). Il peut s'élever à 8,5 quand la consommation du carbone par l'activité photosynthétique est forte.

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

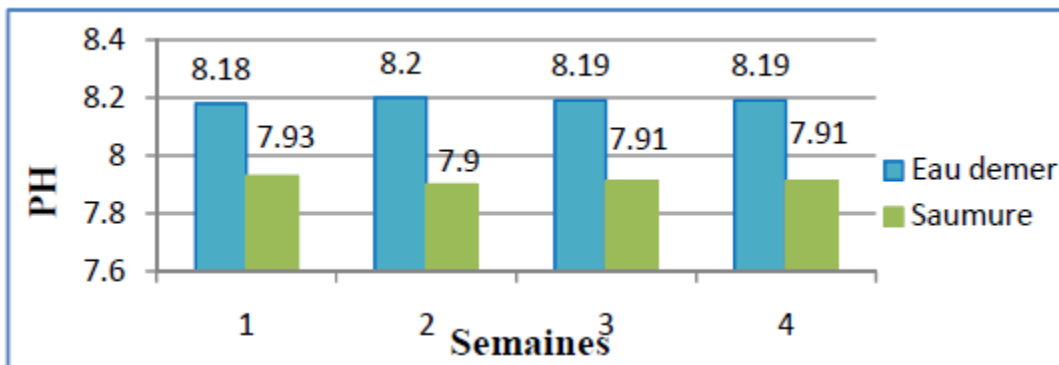


Figure 77 : Variations mensuelles du TDS pour l'eau de mer et la saumure.

d) Conductivité

Nous constatons facilement sur la (Figure 78) que les valeurs de la conductivité sont élevées pour l'eau de mer avec une valeur moyenne mensuelle de $56,13 \mu\text{s/cm}$ et beaucoup plus pour la saumure avec une valeur de $92,35 \mu\text{s/cm}$, cela est due à la forte présence d'ions liés contenus dans ces eaux.

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

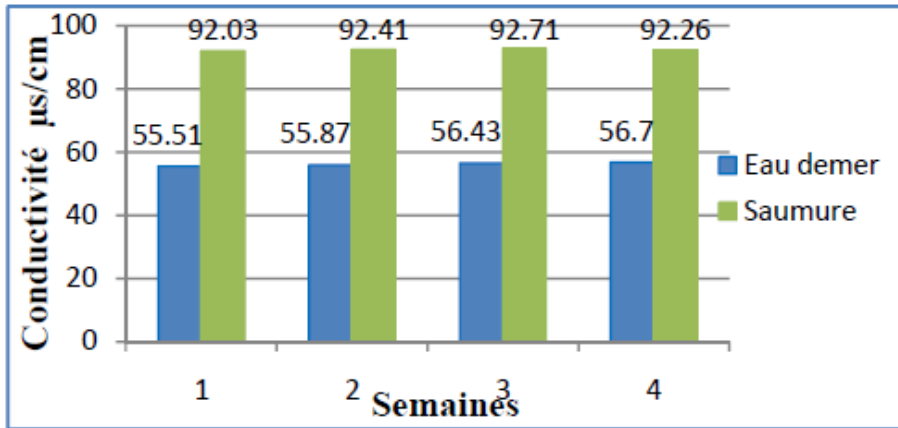


Figure 78 : Variations mensuelles de la conductivité pour l'eau de mer et la saumure.

3.2.4 Température

La température moyenne varie de 15,17 à 16,66 °C pour l'eau de mer et de 15,84 à 17,46°C pour la saumure (Figure 79). Nous constatons donc une petite variation de température moyenne mensuelle qui est de 0,85 °C, cela est dû à l'énergie mécanique nécessaire pour le processus de dessalement qui est l'osmose inverse.

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

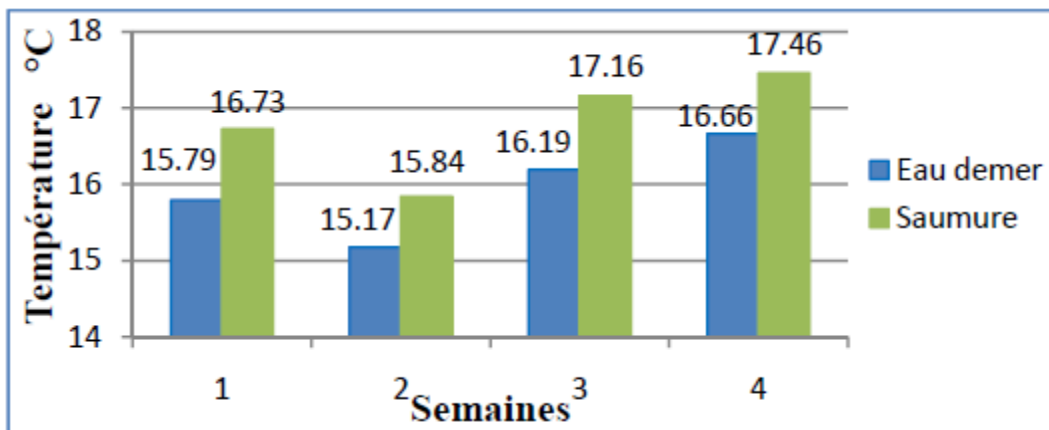


Figure 79 : Variations mensuelles de la Température pour l'eau de mer et la saumure.

e) Turbidité

La Figure 80 ci-dessous montre que La turbidité de l'eau de mer (0,82 NTU à 2,46NTU) et saumure (de 0,49 NTU à 0,54 NTU) sont faibles, notons que ce paramètre physique peut changer au cours du

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

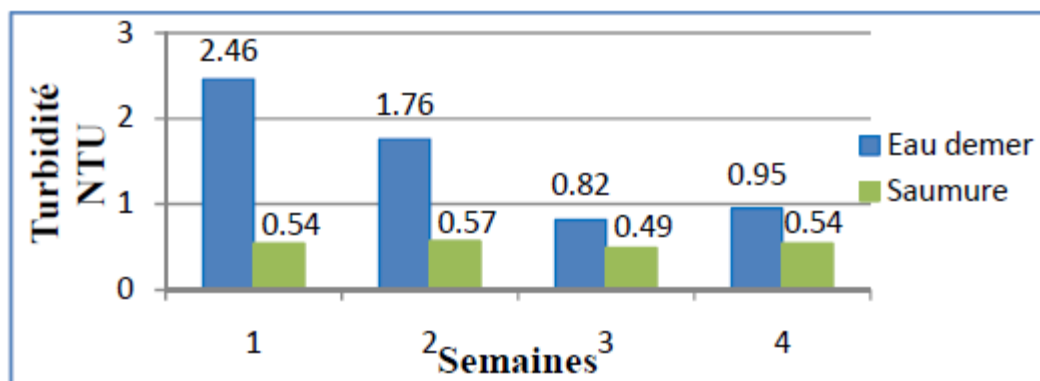


Figure 80 : Variations mensuelles de la turbidité pour l'eau de mer et la saumure.

f) Fer

Le fer est un élément métallique présent dans l'eau de mer avec une teneur qui varie entre 0,13 et 0,14 mg/l (Figure 81) tandis que dans la saumure on note une valeur stable qu'est de 0,05 mg/l. Cette variation est due à la passation du fer à travers les membranes qui retient une quantité minimale du fer.

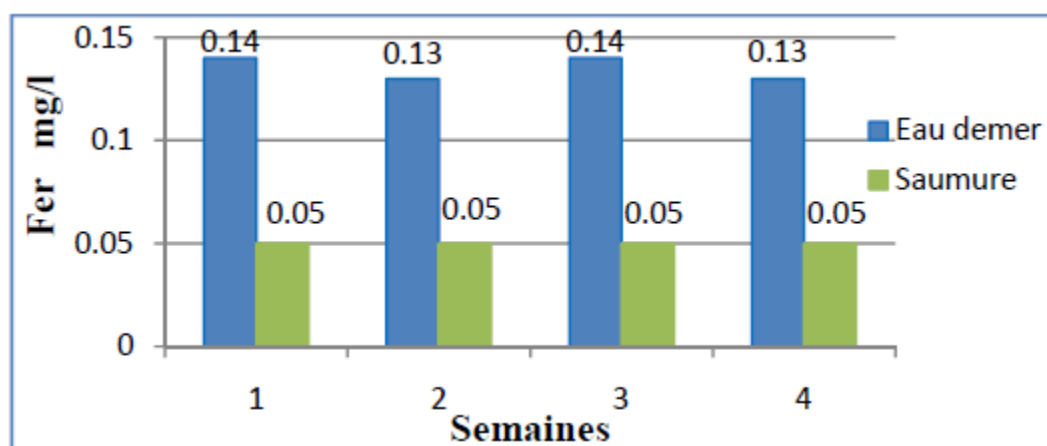


Figure 81 : Variations mensuelles de fer pour l'eau de mer et la saumure.

g) Matières en suspension

La Figure 82 montre que le taux de MES pour l'eau de mer est de 6,34 à 9,37 mg/l avec une valeur moyenne mensuelle de 7,41 mg/l, cette dernière est inférieure dans la saumure qui ne dépasse pas une valeur de 2,99 mg/l.

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

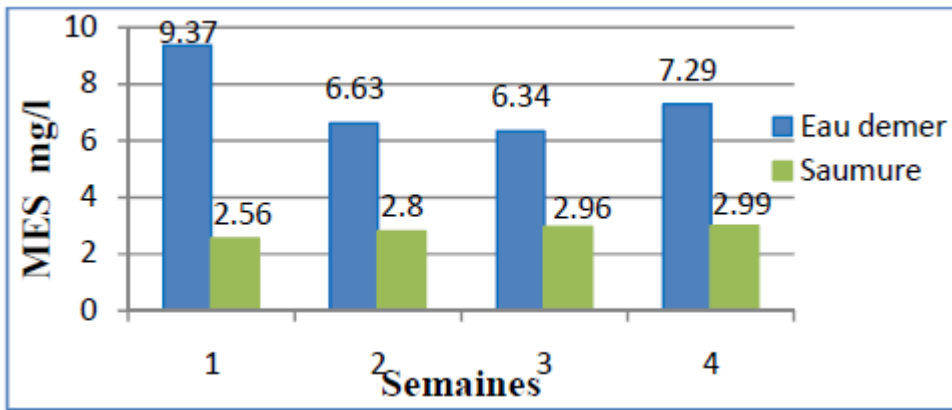


Figure 82 : Variations mensuelles de MES pour l'eau de mer et la saumure.

h) Résidus sec à 180 °C

Les concentrations en résidus secs sont de 37,84 à 39,99 g/l pour l'eau de mer et de 70,31 à 71,32 g/l pour la saumure (Figure 83), ces valeurs sont élevées pour les deux eaux, c'est dû à la forte présence des minéraux dissous, des minéraux non dissous et des matières organiques.

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

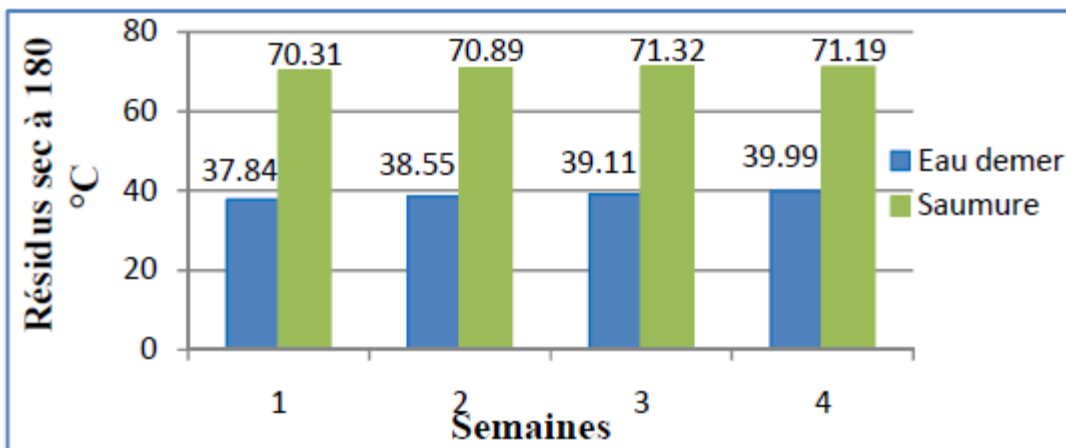


Figure 83 : Variations mensuelles de Résidus sec à 180° C pour l'eau de mer et la saumure.

II.2. CARACTERISATION DE LA MEMBRANE ET DU DEPOT

II.2.1. Inspection visuelle de la membrane

II.2.1.1. Inspection de l'extérieur

Pour l'autopsie, deux membranes en première et septième position ont été retirées : des membranes encrassées provenant d'une station d'eau de mer utilisée depuis cinq ans. Une deuxième membrane neuve a été analysée comme référence.

Le tableau 2 décrit l'inspection externe et interne de la membrane encrassée (en position 1 et 7) et de la membrane de référence.

L'inspection visuelle externe de la membrane encrassée en position 1 montre (Figure 84) :

- quelques fissures ont été détectées sur le boîtier externe (extrémité d'alimentation).
- la présence de quelques particules qui ont été observées sur l'élément côté alimentation (photographies 3 et 5).
- aucun télescopage ou saillie significative de l'espaceur n'a été détecté.

Figure 84 : Résultats de l'inspection visuelle externe de la membrane en position 1

L'inspection visuelle externe de la membrane encrassée en position 7 (Figure 85) montre :

- des éléments dans les bonnes conditions pour l'étude, bien que certaines fissures aient été détectées sur le boîtier externe (extrémité d'alimentation).
- Aucune protubérance télescopique ou importante n'a été détectée ;
- Absence de particules/dépôts sur les extrémités des membranes.

Figure 85 : Résultats de l'inspection visuelle externe de la membrane en position 7

Tableau 40. Résultats de l'inspection visuelle des membranes en 1^{ère} et 7^{ème} position

ATD: Antitelescoping devices

PWT: Product water tube

II.2.1.2. Inspection interne

Cette inspection visuelle interne de la membrane en position 1 encrassée montre (cf. Figure 86) :

- La présence d'un encrassement brun a été détectée sur toute la surface. Le même type d'encrassement a été observé sur le matériau d'espacement, principalement du côté de l'alimentation.
- Présence d'une masse noire qui, à première vue, ressemble à une colonie bactérienne. Des résultats similaires ont été observés par des études précédentes. Certaines études suggèrent que ce phénomène a été attribué aux salissures qui se sont déposées sur la surface de la membrane plutôt que d'être formées par un mécanisme de précipitation.

Des résultats similaires ont été observés dans l'inspection visuelle de la membrane en position 1 côté alimentation de la station de dessalement de Mostaganem (Mechenguel, 2019). Les auteurs ont noté la présence d'un encrassement orange/brun sur toute la surface de la membrane, concentrée sur les zones de support d'espacement. L'image détaillée de l'espacement indique la présence de particules du côté de l'alimentation. Sur certaines enveloppes, les auteurs ont remarqué la présence de points noirs, signe d'une croissance microbienne probable.

Dans une autre étude analysant les membranes de l'unité de production de la boisson gazeuse les auteurs ont constaté un dépôt sur la surface externe des modules, ce dépôt est d'autant plus épais que l'on passe de l'entrée du module à sa sortie, il se présente comme une poudre blanchâtre (Bakhti, 2006).

Des études antérieures (Gwon et al., 2003 ; Chen et al., 2004) ont confirmé cette constatation. Ainsi, les membranes placées à la sortie du module, traitant une solution plus concentrée, sont les plus colmatées par rapport à celles placées à l'entrée du tube de pression. De plus, il a été rapporté dans l'étude de (Shih et al. 2005) que la forme et la structure du dépôt à la sortie du tube d'écoulement est plus complexe par rapport à celui développé à l'entrée.

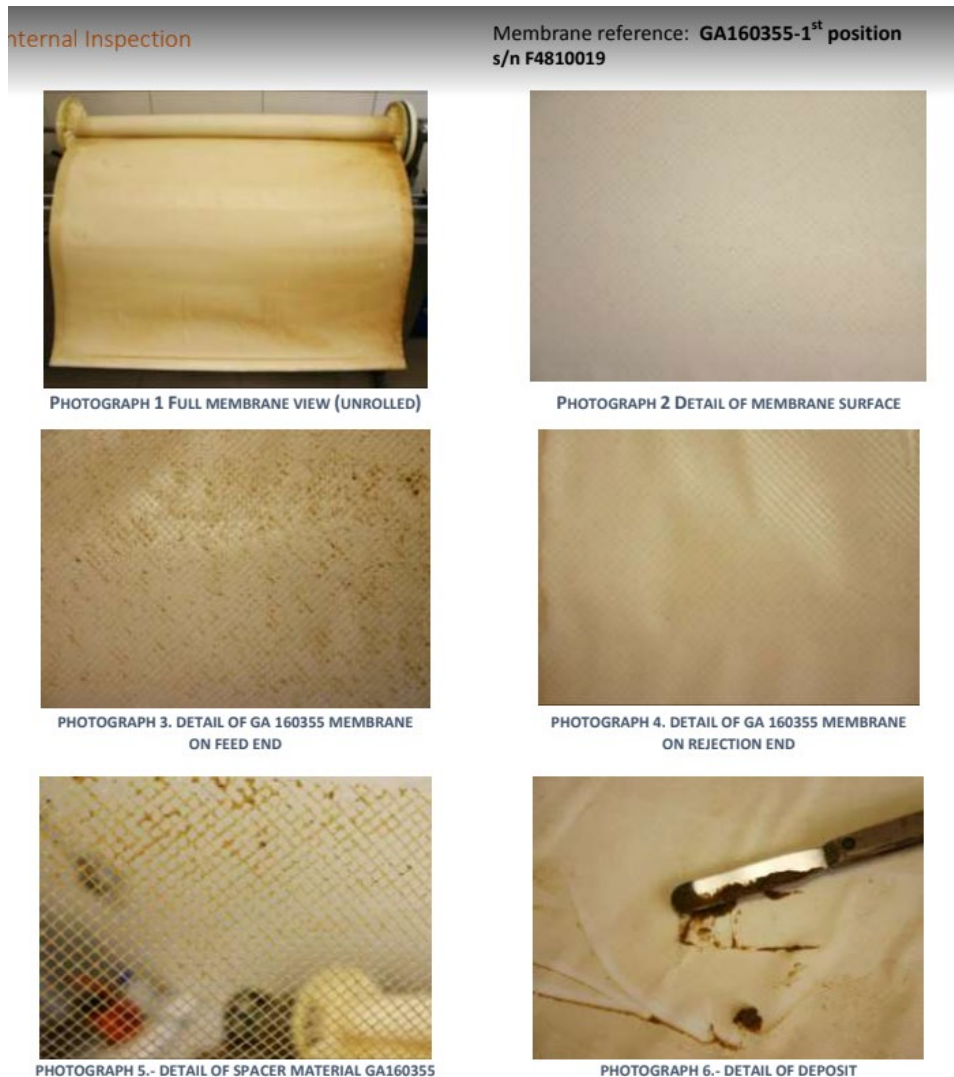


Figure 86 : Inspection visuelle interne de la membrane en position 1 encrassée de la station de dessalement du cap Djenet

L'inspection visuelle interne de la membrane en position 7 encrassée n'a montré aucune présence d'encrassement ni sur la surface ni sur le matériau d'espacement. Aussi, aucun détail supplémentaire n'a été observé sur la surface de la membrane. Aucune défaillance significative n'a été détectée.

A l'inverse, d'autres études ont révélé que lors du contrôle interne de la membrane en position 7 (cf. figure 87), les auteurs ont noté la présence d'un mince d'espacement brun sur toute la surface de la membrane, concentrée sur les zones de support d'espacement. Le matériau d'espacement a été trouvé propre.

EbyOuld Mohamedou et al., 2010 ont étudié l'état de vieillissement d'une membrane d'osmose inverse (OI) usagée prélevée en Mauritanie sur une unité de dessalement installée par la coopération canarienne à Teichitt dans le parc national du banc d'Arguin et de lui appliquer une démarche

d'autopsie L'analyse topographique par AFM de la surface de la membrane usagée en comparaison de la membrane neuve laisse apparaître des « cavités » à plusieurs endroits de la surface usagée traduisant la dégradation physique de celle-ci. De plus, la rugosité de surface de la membrane usagée avec 74 nm est apparue supérieure à celle de la membrane neuve avec 54 nm. Il apparaît un peu partout sur la surface de la membrane usagée des cavités de dimensions micrométriques d'environ 5 µm de diamètre et De plus, la rugosité de la membrane usagée est apparue supérieure(74 nm) à celle de la membrane neuve (54 nm).

Il est possible d'attribuer cette différence à l'évolution de l'état de surface de la membrane, qui peut s'encrasser en se recouvrant de matières colmatantes (protéines, bactéries, acides humiques, etc.) mais aussi laisser apparaître des porosités. Pour les mettre en évidence, des analyses plus poussées seraient nécessaires, tel qu'il est rapporté récemment par HER et al. (2007).

Internal Inspection



PHOTOGRAPH 1 FULL MEMBRANE VIEW (UNROLLED)



PHOTOGRAPH 3. DETAIL OF GA 160355 MEMBRANE ON FEED END



PHOTOGRAPH 5.- DETAIL OF SPACER GA160355

Membrane reference: **GA160356- 7th position**
s/n F4802860



PHOTOGRAPH 2 DETAIL OF MEMBRANE SURFACE



PHOTOGRAPH 4. DETAIL OF GA 160355 MEMBRANE ON REJECTION END



PHOTOGRAPH 6.- DETAIL OF DEPOSIT

Figure 87 : Inspection visuelle interne de la membrane en position 7 encrassée de la station de dessalement du cap Djenet

II.3. ETUDE DE LA SURFACE DE LA MEMBRANE ET DE L'ENCRASSEMENT

III.3.1. Analyse des Composés organiques

La figure 88 décrit les données de LOI obtenues pour les données d'encrassement. Compte tenu de ces résultats, l'encrassement de la surface de la membrane présente un contenu organique et inorganique similaire.

Figure 88 : Résultats de la Loi obtenus à partir de l'encrassement de la membrane en Position 1

II.3.2. Analyse de la surface de la membrane et de l'encrassement

II.3.2.1. Encrassement (Le dépôt)

II.3.2.1.1. SEM/EDS- Résultats chimiques

L'analyse de l'encrassement retiré de la surface de la membrane est très utile pour distinguer les composants de la membrane des composants de l'encrassement et parce que c'est un moyen de concentrer les composants de l'encrassement et d'avoir une identification plus précise de celui-ci.

Ainsi, un échantillon d'encrassement de la surface des membranes en position 1 et 7 ont été prélevé pour être analysés par cette technique. Les particules de la membrane d'alimentation du ont également été analysées.

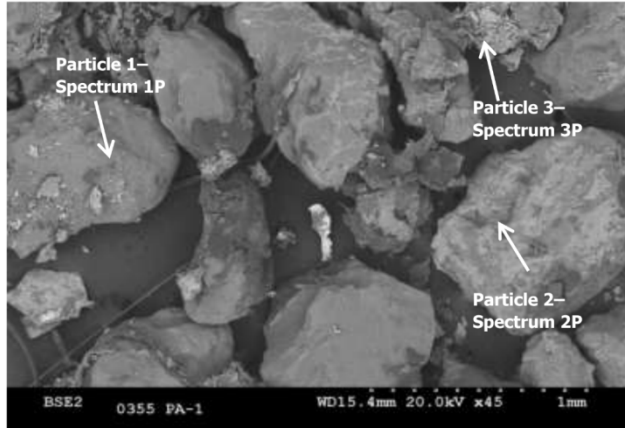
Les figures 89 et 90 décrivent les différentes microphotographies et spectres obtenus lors de ces analyses et les observations réalisées pour chaque échantillon.

La micrographie SEM de l'encrassement de la surface de la membrane en position 1 montre un encrassement organique mélangé à du chlorure de sodium provenant de l'eau de mer. On note également la présence d'aluminosilicates et d'éléments communs sur les membranes d'eau de mer (Figure 89 (a) et (b)).

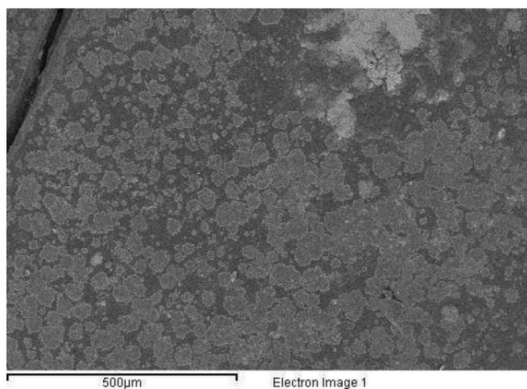
La microphotographie SEM 2F de l'encrassement de la membrane en position 1 montre que l'encrassement est d'apparence organique avec la présence de structures cristallines inorganiques (Figure 89 (b)). La micrographie MEB des particules de l'extrémité d'alimentation a montré des grains avec la présence de matière organique, de chlorure de sodium, de silice et de composants métalliques.

Il s'agit probablement de grains de silice encrassés (Figure 89 (c)).

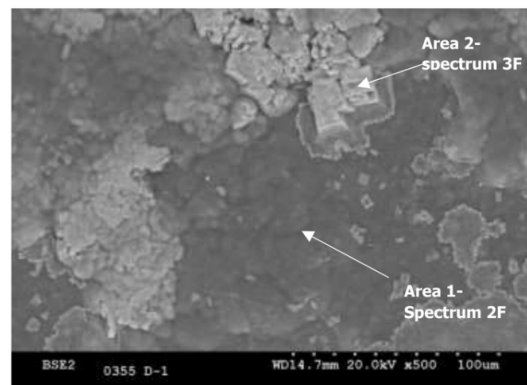
La micrographie SEM de l'encrassement de la surface de la membrane en position 7 montre également un encrassement organique mélangé à du chlorure de sodium provenant de l'eau de mer. Par contre on ne note pas la présence d'aluminosilicates et d'éléments communs sur les membranes d'eau de mer (Figure 90B, a,b).



Microphotograph 1.- General view of GA160355 particles from 1st position membrane feed end

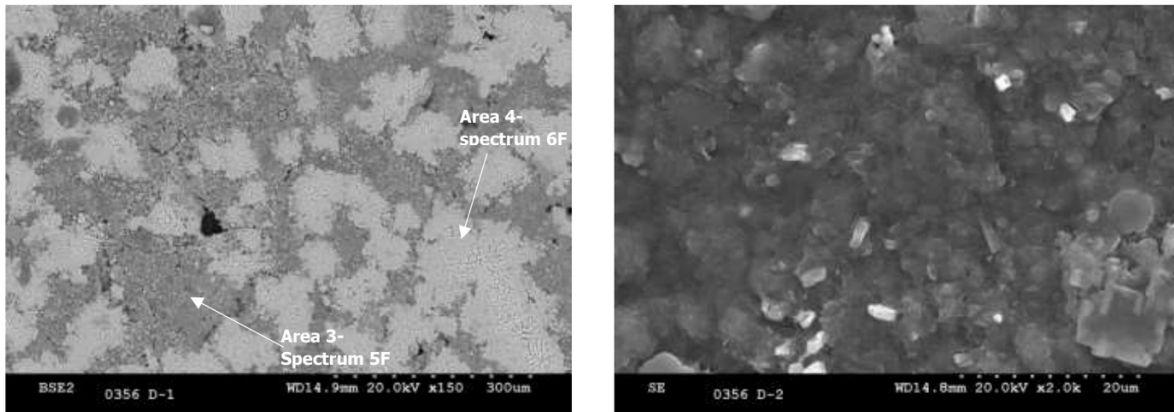


Microphotograph 1F.- General view of GA160355 (1st position) fouling from membrane surface– General analysis: Spectrum 1F



Microphotograph 2F.- Detail of GA160355 (1st position) membrane fouling. Fouling looks organic with presence of inorganic crystalline structures.

Figure 89 : SEM Microphotograph of membrane fouling; Microphotograph 1F- General view of fouling from membrane surface– General analysis: Spectrum 1F (a); Microphotograph 2F. Détail de l'encrassement de la membrane: Spectre 2F (b); Microphotographie 1 Vue générale des particules (c).



Microphotograph 3F.- General view of GA160356 (7th position) fouling from membrane surface– General analysis: Spectrum 4F

Microphotograph 4F.- Detail of GA160356 membrane fouling. Fouling looks organic with presence of inorganic crystalline structures.

Figure 90 : SEM Microphotograph of membrane fouling; Microphotograph 1F- General view of fouling from membrane surface– General analysis: Spectrum 3F (a); Microphotograph 4F. Détail de l'encrassement de la membrane: Spectre 3F (a); Microphotographie 4F.

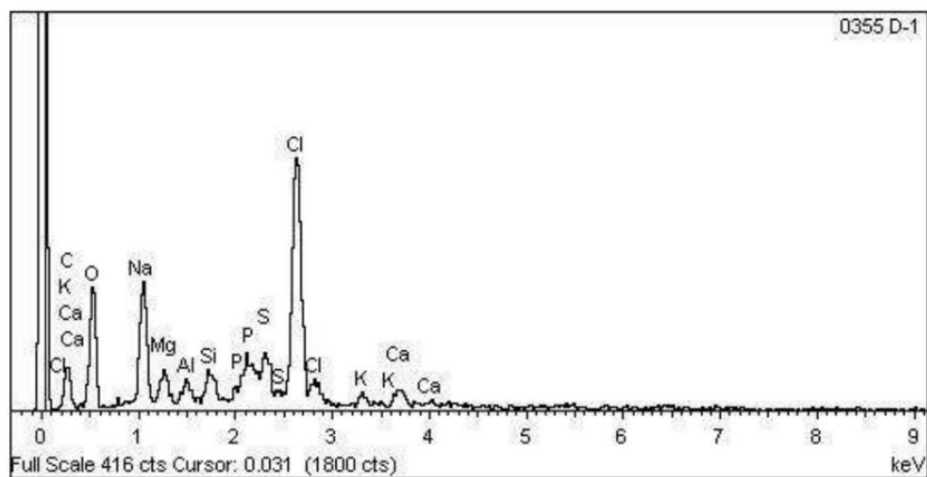
II.3.2.1.2. Résultats de l'EDS

Les analyses EDS du dépôt de la membrane en position 1 sont présentées dans la figure 91 et la figure 92. L'analyse générale de l'encrassement des membranes indique que l'encrassement est composé d'un composant organique, de chlorure de sodium, d'aluminosilicates, de calcium et d'éléments communs à l'encrassement des membranes d'eau de mer comme le soufre, le magnésium, le phosphore et le potassium (figure 91). Alors que l'analyse de la zone 1 sur l'encrassement des membranes indique que l'encrassement est composé d'un composant organique avec du chlore, du chlorure de sodium et de petits pourcentages du reste des éléments détectés sur l'analyse générale effectuée sur l'échantillon de surface de la membrane (Figure 92). L'analyse de la zone 2 sur l'encrassement des membranes indique que l'encrassement est composé de sodium Chloride (Figure 92)

L'analyse EDS des particules du dépôt de la membrane en position 1 est présentée dans les figures ci-après.

L'analyse de la particule 1, 2 et 3 de la membrane en position 1 sont décrit en figure 93, 94. L'analyse de la particule 1 a montré que les principaux constituants sont le chlorure de sodium et la silice.

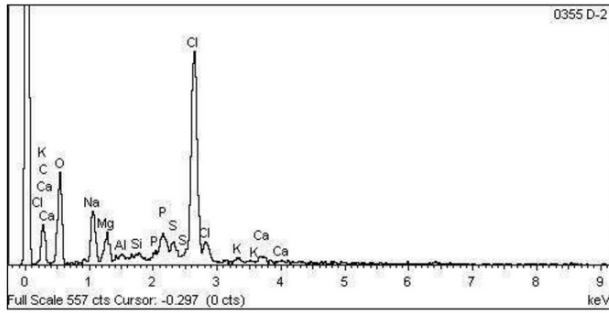
L'analyse de la particule 2 de la membrane est principalement composée de silice, avec de petits pourcentages de chlorure de sodium et de fer et d'aluminosilicates (Figure 94a). Alors que la dernière particule 3, particule métallique était composée de titane avec de petits pourcentages de chrome et de fer. Nous avons également trouvé la présence de chlorure de sodium, de phosphore de calcium, de Magnésium (Figure 94b)



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	3.30	0.1310	31.59	7.24	42.85
O K	10.53	0.3180	41.47	4.60	42.23
Na K	4.14	0.6705	7.75	0.94	5.49
Mg K	0.73	0.5845	1.57	0.29	1.05
Al K	0.40	0.6968	0.71	0.18	0.43
Si K	0.72	0.7995	1.14	0.20	0.66
P K	0.28	1.1961	0.29	0.24	0.15
S K	1.22	0.7989	1.92	0.34	0.98
Cl K	6.84	0.7157	11.98	1.35	5.51
K K	0.35	0.9006	0.49	0.16	0.20
Ca K	0.77	0.8745	1.10	0.21	0.45

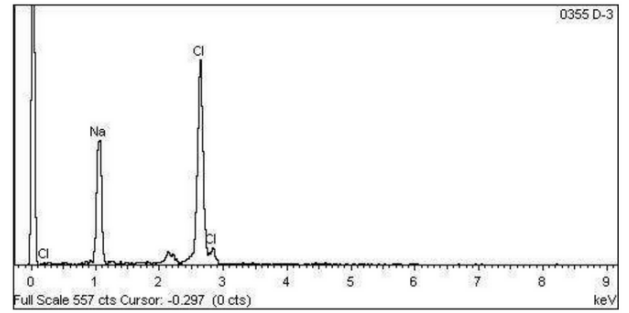
Spectrum 1F.- General analysis of GA160355 membrane fouling (Analysis of area shown at microphotograph indicates that fouling is composed by an organic component, sodium chloride, aluminosilicates, calcium, and cor water membranes fouling as sulphur, magnesium, phosphorous and potassium.

Figure 91 : Analyse générale de l'encrassement des membranes en position 1 (Spectre 1F)



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	6.74	0.1388	38.47	5.10	50.09
O K	14.64	0.2908	39.81	3.48	38.92
Na K	3.55	0.6612	4.26	0.44	2.89
Mg K	1.16	0.6140	1.49	0.20	0.96
Al K	0.17	0.7232	0.19	0.09	0.11
Si K	0.17	0.8270	0.16	0.09	0.09
P K	0.88	1.2392	0.56	0.16	0.28
S K	1.18	0.8175	1.14	0.19	0.56
Cl K	12.05	0.7295	13.07	1.14	5.77
K K	0.37	0.9002	0.33	0.09	0.13
Ca K	0.57	0.8736	0.51	0.11	0.20

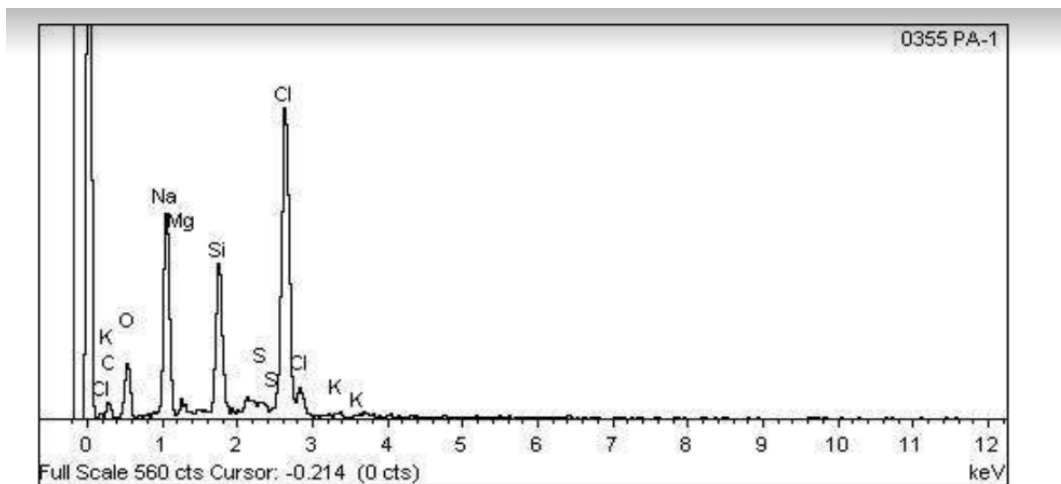
Spectrum 2F.- Analysis of area 1 on GA160355 membrane fouling (microphotograph 2F): organic component with chlorine, sodium chloride small percentages of the rest of elements detected on the general analysis carried out on membrane surface sample.



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
Na K	31.24	1.0687	37.93	1.04	48.52
Cl K	36.96	0.7733	62.07	1.04	51.48

Spectrum 3F.- Analysis of area 2 on GA160355 membrane fouling (microphotograph 2F): sodium chloride

Figure 92 : Analyse de la zone 1 sur l'encrassement de la membrane en position 1 (Spectre 2F) et zone 2 sur l'encrassement de la membrane en position 1 (Spectre 3F)



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	5.02	0.0880	30.37	5.78	44.55
O K	13.61	0.2776	26.07	2.74	28.71
Na K	21.82	0.7900	14.69	1.34	11.26
Mg K	0.88	0.5852	0.80	0.20	0.58
Si K	11.05	0.8193	7.18	0.68	4.50
S K	0.86	0.7780	0.59	0.20	0.32
Cl K	26.64	0.7102	19.96	1.76	9.92
K K	0.57	0.8668	0.35	0.12	0.16

Spectrum 1P.- Analysis of particle 1 from GA 160355 membrane feed end.
Mainly composed of sodium chloride and silica.

Figure 93 : Analyse de la particule 1 de l'alimentation de la membrane

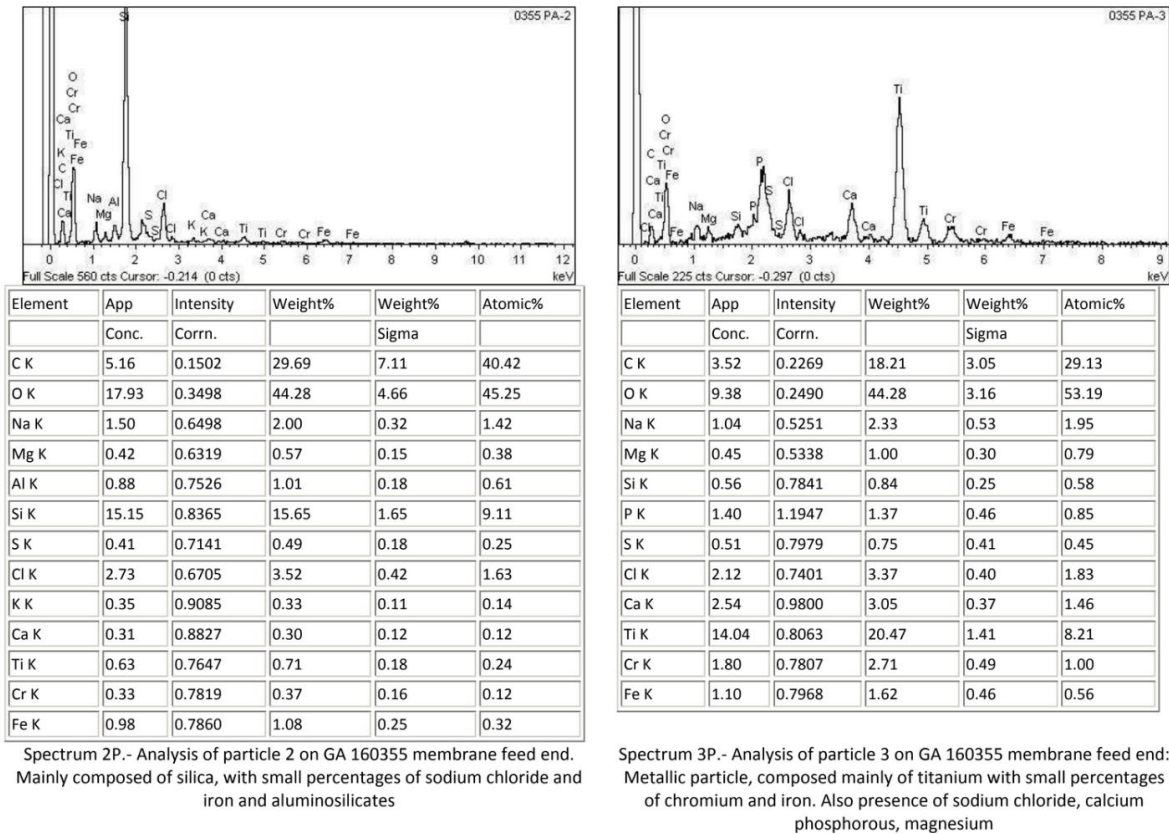
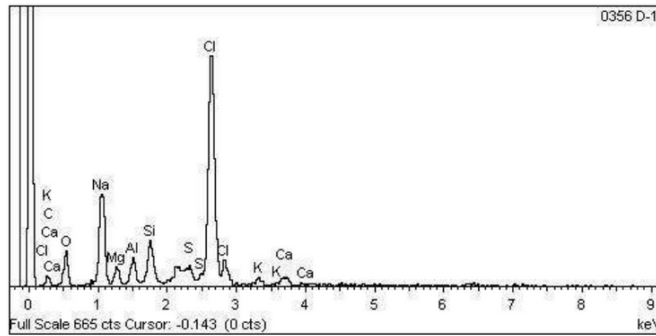


Figure 94 : Analyse de la particule 2 (a) et 3 (b) de l'alimentation de la membrane

Les analyses EDS du dépôt de la membrane en position 7 sont présentées dans la figure 95 et la figure 96. L'analyse générale de l'encrassement des membranes indique que l'encrassement est composé d'un composant organique, de chlorure de sodium, d'aluminosilicates et d'éléments communs à l'encrassement des membranes d'eau de mer comme le soufre, le magnésium, le calcium et le potassium (figure 96).

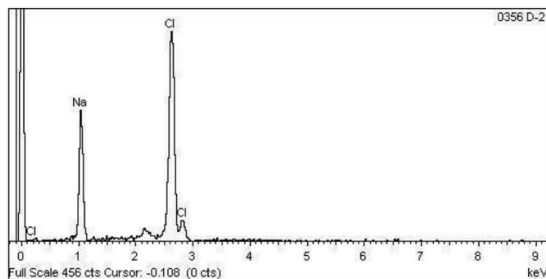
Alors que l'analyse de la zone 3 sur l'encrassement des membranes indique que l'encrassement est composé de sodium chloride et l'analyse de la zone 4 indique que l'encrassement est composé de Aluminosilicates, le chlorure, le fer et de petits pourcentages d'éléments communs sur les membranes d'eau de mer encrassant comme le soufre, le magnésium, le calcium et le potassium (Figure 96).



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	1.67	0.0738	20.60	11.12	32.88
O K	9.01	0.2823	29.04	4.39	34.80
Na K	10.77	0.7664	12.79	1.88	10.66
Mg K	1.32	0.5955	2.02	0.37	1.60
Al K	1.73	0.7065	2.23	0.38	1.59
Si K	2.99	0.7981	3.41	0.54	2.32
S K	1.27	0.8036	1.44	0.33	0.86
Cl K	21.10	0.7223	26.58	3.80	14.37
K K	0.79	0.8529	0.84	0.20	0.41
Ca K	0.98	0.8446	1.05	0.24	0.50

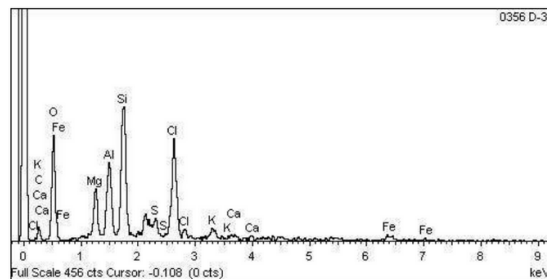
Spectrum 4F.- General analysis of GA160356 (7th position) membrane fouling (Analysis of area shown at microphotograph 3F). This spectrum indicates that fouling is composed by an organic component, sodium chloride, aluminosilicates, and common elements on sea water membranes fouling as sulphur, magnesium, calcium and potassium.

Figure 95 : Analyse générale de l'encrassement des membranes en position 7 (Spectre 4F)



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
Na K	32.19	1.0517	35.51	1.05	45.92
Cl K	43.30	0.7796	64.49	1.05	54.08

Spectrum 5F.- Analysis of area 3 on GA160356 membrane fouling (microphotograph 3F): sodium chloride



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	1.68	0.1096	15.61	7.82	23.29
O K	20.28	0.4090	50.50	4.84	56.58
Mg K	2.71	0.6472	4.27	0.50	3.15
Al K	3.86	0.7227	5.44	0.60	3.61
Si K	7.75	0.7702	10.26	1.04	6.55
S K	1.33	0.7257	1.87	0.32	1.05
Cl K	6.10	0.6718	9.25	0.96	4.68
K K	0.93	0.8886	1.07	0.20	0.49
Ca K	0.33	0.8675	0.38	0.15	0.17
Fe K	1.05	0.7964	1.34	0.31	0.43

Spectrum 6F.- Analysis of area 4 on GA160356 membrane fouling (microphotograph 3F): Aluminosilicates, chlorine, iron and small percentages of common elements on sea water membranes fouling as sulphur, magnesium, calcium and potassium.

Figure 96 : Analyse de la zone 3 sur l'encrassement de la membrane en Position 7 (Spectre 2F) et zone 4 sur l'encrassement de la membrane en position 7 (Spectre 3F)

II.3.2.2. Analyse de la surface de la membrane (membrane encrassée)

II.3.2.2.1. Résultats de l'analyse SEM-EDX

La figure ci-après décrit les différentes microphotographies et spectres obtenus lors des analyses des membranes (en position 1 et 7) encrassées et les observations réalisées pour chaque échantillon.

Comme le montrent les images (Figure 97), la surface de la membrane en position 1 est recouverte d'un mince dépôt organique qui ne permet pas de distinguer la structure de la membrane. Sur cette fine couche organique, on note la présence d'une prolifération de chlorure de sodium caractéristique de la surface des membranes d'eau de mer et quelques particules de composition différente ont également été détectées.

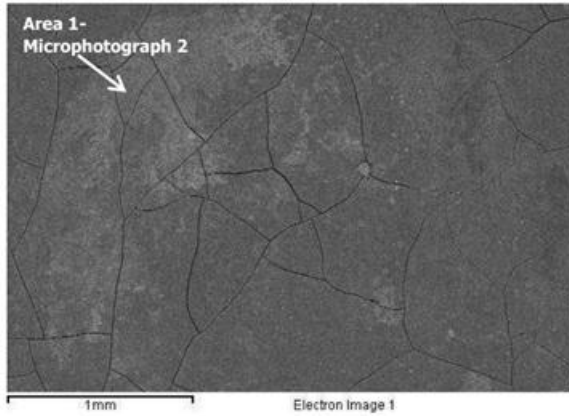
L'analyse générale de cet échantillon de surface de membrane en position 1 indique qu'il y a une présence principale de chlorure de sodium, d'aluminosilicates et de petits pourcentages d'éléments qui sont communs également sur les membranes encrassées d'eau de mer : magnésium, calcium, etc.

La vue générale de la surface de la membrane en position 1 a montré qu'il y a un recouvrement significatif de la surface de la membrane qui montre que le composant inorganique est plus concentré sur la zone de support de l'espaceur (Figure 97 a).

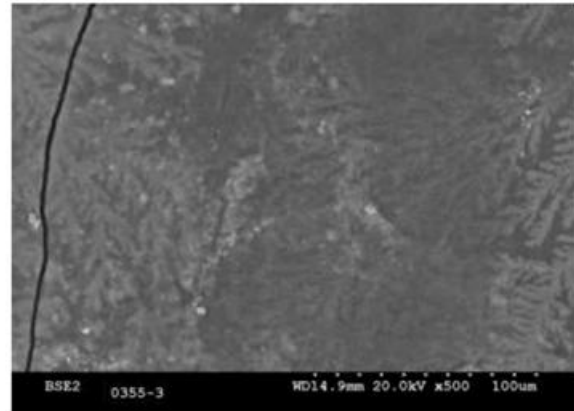
La deuxième micrographie MEB de la surface de la membrane encrassée (Figure 97 b) a montré le détail de l'encrassement sur la zone 1 - zone de support de l'espaceur. Le composant inorganique de l'encrassement est concentré sur la zone de support de l'espaceur.

La troisième microphotographie MEB de la surface de la membrane encrassée (Figure 97 c) montre les détails de l'encrassement sur la zone de support de l'espaceur. La figure 98c montre que l'encrassement est composé d'un mélange d'un composant organique avec de très petites particules et la présence de microstructures.

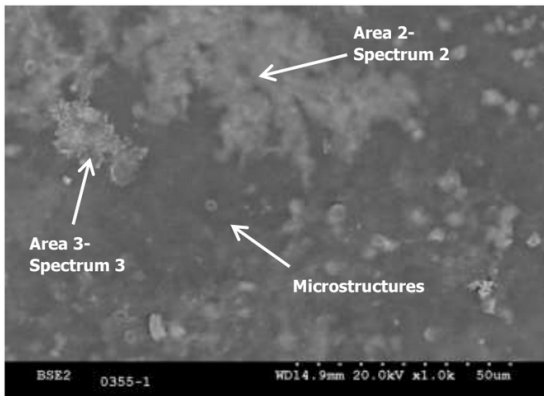
La dernière microphotographie MEB de la surface de la membrane encrassée (Figure 97 d) montre le détail de la surface de la membrane à fort grossissement sur la zone avec une fine couche organique. Il est révélé que sur aucune des zones, la structure de la membrane n'a pu être distinguée. Il y a également présence de microstructures.



Microphotograph 1.- General view of GA160355 membrane surface – There is a significant covering of membrane surface which shows inorganic component more concentrated on spacer support area. General analysis: spectrum 1



Microphotograph 2.- Detail of fouling on area 1 – spacer support area Inorganic component of fouling is concentrated on spacer support area



Microphotograph 3.- Detail of fouling on spacer support area. Fouling is composed by a mixture of an organic component with very small particles and presence of microstructures.



Microphotograph 4.- Detail of membrane surface at high magnifications on area with thin organic covering. On none of the areas, membrane structure couldn't be distinguished. There is also presence of microstructures

Figure 97 : Microphotographie MEB de la surface de la membrane en position 1; Microphotographie. 1 Vue générale de la surface de la membrane (a) ; Microphotographie. 2 Détail de l'encrassement sur la zone 1 (b) ; Microphotographie. 3 Détail de l'encrassement sur la zone de support de l'espaceur (c) ; Microphotographie 4.- Détail de la surface de la membrane à fort grossissement sur la zone avec une fine couche organique (d).

Comme le montrent les images illustrées dans la figure 98, la surface de la membrane en position 7 est :

Cette surface membranaire est recouverte de manière hétérogène par un dépôt organique et également par une croissance dendritique ou du chlorure de sodium provenant de l'eau de mer. Dans ce cas, il a été possible de distinguer la structure de la membrane sur certaines des zones analysées. L'analyse générale de cette surface membranaire n'a détecté que des composants de la membrane, du chlorure de sodium et des traces de silice et de magnésium.

Lors de l'analyse de certaines des zones distinguées entre la croissance du chlorure de sodium, de petits pourcentages d'éléments communs à l'eau de mer ont été détectés.

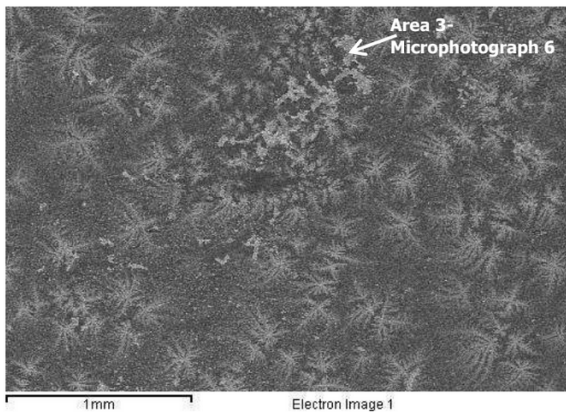
La vue générale de la surface de la membrane en position 7 (Microphotograph 5) a montré une présence significative de croissances dendritiques à la surface de la membrane (Analyse générale : spectre 4)

La deuxième micrographie MEB de la surface de la membrane encrassée (Microphotograph 6 Figure 98) a montré le détail de l'encrassement sur la zone 1 (zone de support de l'espaceur).

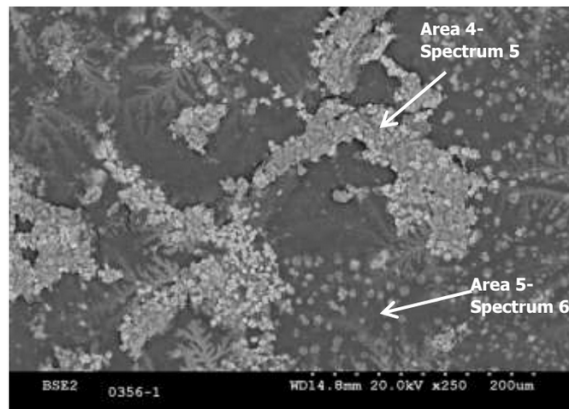
La composante inorganique de l'encrassement est concentrée sur la zone de support de l'espaceur.

La troisième microphotographie MEB de la surface de la membrane encrassée en position 7 (Figure 98 c) montre les détails de l'encrassement sur la zone de support de l'espaceur (Microphotograph 7). L'encrassement est composé d'un mélange d'un composant organique avec de petites particules.

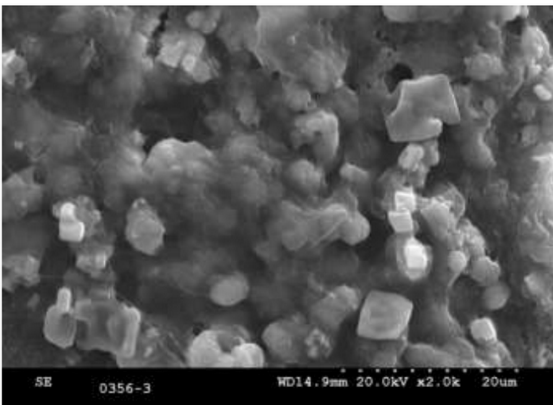
La dernière microphotographie MEB de la surface de la membrane encrassée en position 7 (Figure 98 d) montre le détail de la surface de la membrane à fort grossissement sur la zone avec une fine couche organique (Microphotograph 8). La structure membranaire peut être distinguée bien qu'il y ait présence d'une couverture organique sur certaines zones (Analyse générale : spectre 7).



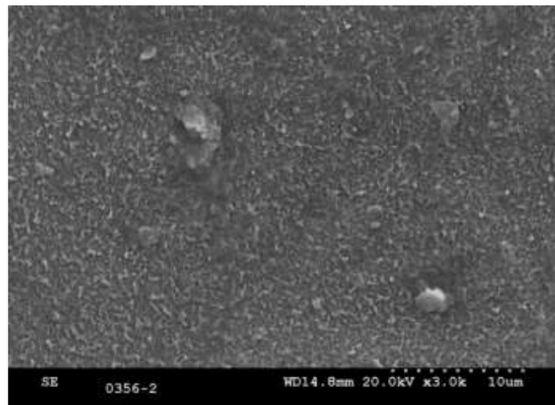
Microphotograph 5.- General view of GA160356 membrane surface – There is a significant presence of dendritic growths on membrane surface. General analysis: spectrum 4



Microphotograph 6.- Detail of fouling on area 1 – spacer support area Inorganic component of fouling is concentrated on spacer support area



Microphotograph 7.- Detail of fouling on spacer support area. Fouling is composed by a mixture of an organic component with small particles.



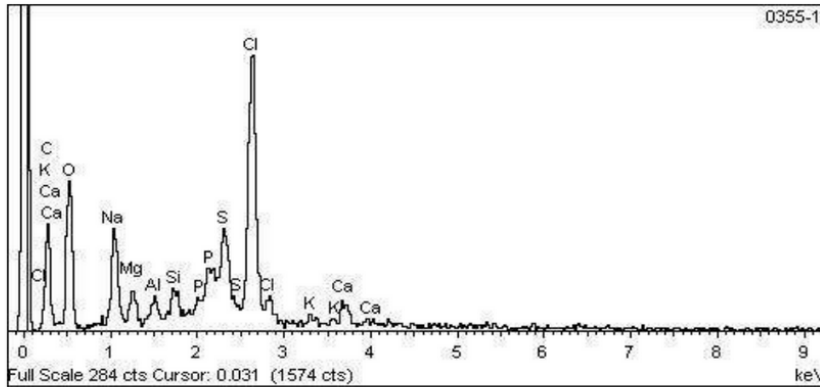
Microphotograph 8.- Detail of membrane surface at high magnifications on area with less presence of organic covering. Membrane structure can be distinguished although there is presence of organic covering on some areas. General analysis: spectrum 7

Figure 98 : Microphotographie MEB de la surface de la membrane en position 7 ; Microphotographie. 5 Vue générale de la surface de la membrane (a) ; Microphotographie. 6 Détail de l'encrassement sur la zone 1 (b) ; Microphotographie. 7 Détail de l'encrassement sur la zone de support de l'espaceur (c) ; Microphotographie 8- Détail de la surface de la membrane à fort grossissement sur la zone avec une fine couche organique (d).

II.3.2.2.2. L'analyse EDS de la membrane encrassée

L'analyse de l'EDS de la membrane encrassée en position 1 est présentée dans les figures ci-après. L'analyse EDS de la surface de la membrane montre que la surface de la membrane encrassée est constituée de composants de la membrane (carbone, oxygène et soufre), de chlorure de sodium, de chlore, d'aluminosilicates et d'éléments communs à l'encrassement des membranes d'eau de mer (magnésium, calcium et potassium) (Figure 99).

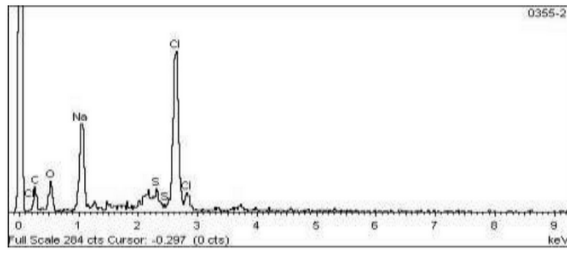
Tandis que l'analyse EDS de la zone 1 indique que la surface de la membrane encrassée est composée de composants de la membrane (carbone, oxygène et soufre) et de la présence de chlorure de sodium et de chlore (Figure 100). L'analyse EDS de la zone 2 montre que la surface de la membrane encrassée est constituée de composants de la membrane (carbone, oxygène et soufre), de chlorure de sodium et de chlore et d'éléments communs à l'encrassement des membranes d'eau de mer (Figure 101)



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	9.28	0.1832	46.64	3.81	57.71
O K	10.88	0.2711	36.92	2.87	34.30
Na K	2.33	0.6654	3.22	0.36	2.08
Mg K	0.58	0.6271	0.86	0.15	0.52
Al K	0.33	0.7405	0.41	0.11	0.23
Si K	0.58	0.8357	0.64	0.12	0.34
P K	0.54	1.2356	0.40	0.17	0.19
S K	1.91	0.8110	2.17	0.28	1.01
Cl K	6.04	0.7193	7.72	0.62	3.24
K K	0.25	0.9151	0.25	0.10	0.10
Ca K	0.75	0.8819	0.79	0.14	0.29

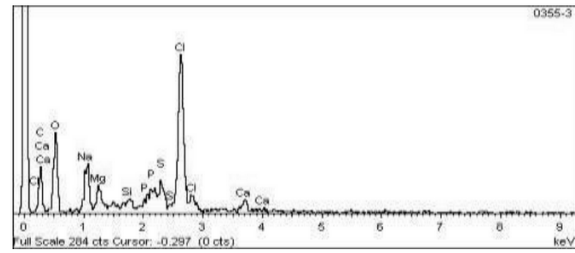
Spectrum 1.- General analysis of GA 160355 membrane surface. Membrane components (carbon, oxygen and sulphur), sodium chloride, chlorine, aluminosilicates and common elements on sea water membranes fouling (magnesium, calcium and potassium).

Figure 99 : Analyse générale EDS de la surface de la membrane en position 1.



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corn.		Sigma	
C K	6.56	0.1213	46.88	3.94	60.70
O K	7.12	0.2442	25.26	2.82	24.56
Na K	8.94	0.7484	10.35	0.96	7.00
S K	1.25	0.8312	1.31	0.30	0.63
Cl K	13.75	0.7351	16.21	1.32	7.11

Spectrum 2.- Analysis of area 1 on GA 160355 membrane surface. Membrane components (carbon, oxygen and sulphur) and presence of sodium chloride and chlorine



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corn.		Sigma	
C K	9.26	0.1651	43.42	2.79	54.71
O K	13.88	0.2799	38.35	2.37	36.28
Na K	3.38	0.6620	3.95	0.41	2.60
Mg K	0.96	0.6169	1.21	0.21	0.75
Si K	0.27	0.8313	0.25	0.13	0.14
P K	0.72	1.2390	0.45	0.21	0.22
S K	1.53	0.8149	1.45	0.24	0.69
Cl K	9.38	0.7260	10.00	0.63	4.27
Ca K	1.05	0.8805	0.92	0.16	0.35

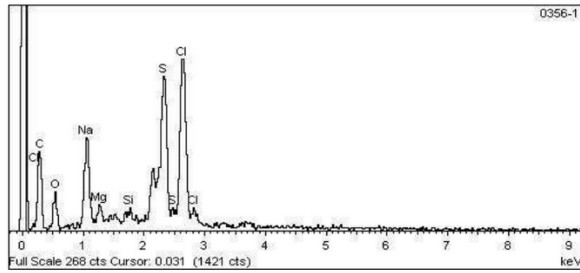
Spectrum 3.- Analysis of area 2 on GA 160355 membrane surface. Membrane components (carbon, oxygen and sulphur), sodium chloride and chlorine and common elements on sea water membranes fouling.

Figure 100 : Analyse EDS de la zone 1 sur la surface de la membrane en position 1 (a) ; .Analyse EDS de la zone 2 sur la surface de la membrane en position 1 (b).

L'analyse de l'EDS de la membrane encrassée en position 7 est présentée dans les figures ci-après.

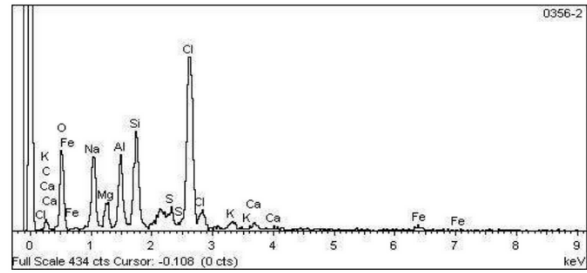
L'analyse EDS de la surface de la membrane montre que la surface de la membrane encrassée (7ème) était constituée de composants de la membrane (carbone, oxygène et soufre), de chlorure de sodium et de chlore provenant de dépôts organiques (Figure 101).

Alors que l'analyse EDS de la zone 4 indique que la surface de la membrane encrassée est constituée d'aluminosilicates, de chlorure de sodium et de petits pourcentages d'éléments communs à l'encrassement des membranes d'eau de mer (magnésium, calcium et potassium) (Figure 101-spectre 5). L'analyse EDS de la zone 5 montre que la surface de la membrane encrassée est constituée de composants de la membrane (carbone, oxygène et soufre), et de chlorure de sodium (Figure 102).



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	8.64	0.1543	62.41	2.26	74.80
O K	3.16	0.2047	17.18	1.92	15.46
Na K	3.24	0.7689	4.70	0.41	2.94
Mg K	0.38	0.6781	0.62	0.16	0.37
Si K	0.23	0.8785	0.29	0.11	0.15
S K	4.78	0.8353	6.37	0.46	2.86
Cl K	5.34	0.7053	8.43	0.54	3.42

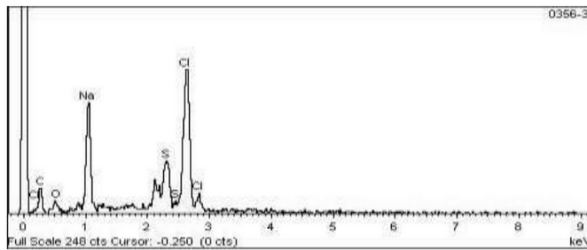
Spectrum 4.- General analysis of GA 160356 membrane surface. Membrane components (carbon, oxygen and sulphur), sodium chloride and chlorine from organic fouling.



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	2.82	0.0975	19.33	7.05	29.11
O K	21.96	0.3543	41.46	3.87	46.86
Na K	8.34	0.6892	8.09	0.83	6.37
Mg K	1.80	0.5962	2.03	0.29	1.51
Al K	4.69	0.7049	4.45	0.47	2.98
Si K	6.72	0.7690	5.85	0.59	3.76
S K	1.42	0.7591	1.25	0.25	0.71
Cl K	16.01	0.6965	15.38	1.44	7.84
K K	0.86	0.8802	0.65	0.15	0.30
Ca K	0.73	0.8639	0.56	0.14	0.25
Fe K	1.11	0.7992	0.93	0.25	0.30

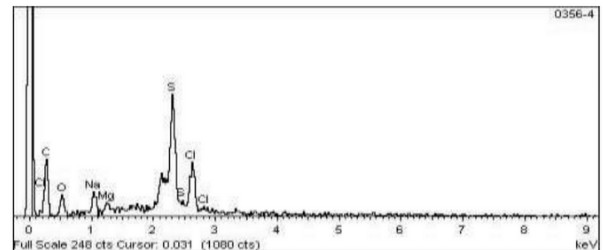
Spectrum 5.- Analysis of area 4 on GA 160356 membrane surface. Presence of aluminosilicates, sodium chloride, and small percentages of common elements on sea water membranes fouling (magnesium, calcium and potassium).

Figure 101 : Analyse générale EDS de la surface de la membrane en position 7.



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	6.57	0.1118	59.36	4.10	75.27
O K	1.57	0.1959	8.10	2.94	7.71
Na K	10.31	0.8571	12.15	1.30	8.05
S K	3.87	0.8414	4.65	0.63	2.21
Cl K	11.21	0.7194	15.74	1.59	6.76

Spectrum 6.- Analysis of area 5 on GA 160356 membrane surface. Sodium chloride



Element	App	Intensity	Weight%	Weight%	Atomic%
	Conc.	Corrn.		Sigma	
C K	8.52	0.1868	67.29	2.91	78.00
O K	2.33	0.1985	17.29	2.70	15.05
Na K	1.06	0.7549	2.07	0.36	1.25
Mg K	0.27	0.7025	0.56	0.21	0.32
S K	4.82	0.8373	8.48	0.77	3.68
Cl K	2.02	0.6935	4.31	0.45	1.69

Spectrum 7.- General analysis of GA 160356 membrane surface (Microphotograph 8). Membrane components (carbon, oxygen and sulphur), sodium chloride and chlorine.

Figure 102 : Analyse EDS de la zone 1 sur la surface de la membrane en position 7 (a) ; Analyse EDS de la zone 2 sur la surface de la membrane en position 7 (b).

Les résultats obtenus à partir des analyses effectuées sur le dépôt colmatant peuvent être soutenus par d'autres études :

Les travaux de Mechenguel, conclue que les membranes autopsiées ont montré la présence d'un encrassement similaire principalement inorganique et composées de dérivés de protéines d'aluminosilicates liées à un bio-film de matière organique et à la présence des particules métalliques (fer, chrome et autre métaux) (Mechenguel, 2019)

L'analyse des eaux issues des différents nettoyages a révélé la présence de ces éléments en proportions plus ou moins importantes. Les images des membranes produites par le MEB ont montré la présence de dépôt organique et inorganique. Le dépôt inorganique est sous forme de panneaux cristallins et homogènes (Bakhti, 2006).

Le fer et la silice sont les principaux éléments conduisant à un dépôt de nature colloïdale (Hoek et al., 2002 ; Zhu et al., 1997 ; Ng et al., 2004).

En fonction de différentes analyses réalisées par DRX, RMN, et EXAFS d'un dépôt colmatant, certains auteurs ont mis en évidence une couche de fer riche en silicates au voisinage de la surface membranaire (Bakhti, 2006). Dans une étude portant sur le pouvoir colmatant d'une eau de forage, Gwon et al. ont rapporté que la silice est le principal agent colmatant identifié sur la surface des membranes de NF et d'OI (Gwon et al., 2003).

D'autre résultats ont conclu que l'encrassement s'est produit en raison d'un matériau inorganique, d'un matériau organique, d'un encrassement microbien ou d'une oxydation chimique qui a affecté la structure et les propriétés physiques de la membrane. Al-Abri et al., ont étudié les surfaces et les sous-surfaces des membranes SWRO vierges et encrassées de l'usine de dessalement de Barka pour analyser les composants d'encrassement et la nature de surface des membranes RO.L'autopsie de la membrane conduite par les auteurs a révélé la présence de tartres inorganiques, tels que Na, Cl, Mg, Al et Ca, bien que des bactéries et des matières organiques aient également été détectées (Al-Abri et al., 2022).

Basé sur une analyse XRD des membranes encrassées avant nettoyage, cette étude a montré la nature semi-cristalline des polyamides et la présence de cristaux de sel déposés. La présence d'encrassements organiques et inorganiques sur les membranes encrassées et nettoyées a été révélée en utilisant FTIR pour la surface et la sous-surface, TGA pour l'ensemble de la membrane et XPS.

La formation d'un dépôt sur la surface de la membrane entraîne un changement dans la sélectivité des espèces retenues. Les propriétés initiales de la membrane sont donc modifiées.

Certaines études suggèrent que le colmatage peut conduire à une rétention plus élevée d'espèces grâce à la limitation du transfert des solutés à travers la membrane (Bakhti, 2006).

Un comportement similaire a été constaté par l'auteur Cheng en 1990 (Cheng, 1990) dans son étude de traitement des membranes d'osmose inverse à base de polyamide, d'une eau contaminée par des hydrocarbures halogénés. Selon Cheng, deux mécanismes peuvent être considérés lorsqu'il s'agit d'une diminution du flux à laquelle est associée une augmentation du taux de rejet pour le procédé d'OI : le gonflement « swelling », ou l'adsorption physique.

De même, Schäfer et al. ont observé une augmentation de 20% du taux de rejet des matières organiques lorsque la membrane était colmatée par un dépôt de calcium organique (Schäfer et al., 2000).

Par contre, des résultats opposés ont été obtenus par plusieurs auteurs. Ainsi, Lee et al. ont rapporté lors d'une étude de l'influence du colmatage colloïdal sur la rétention des membranes d'osmose inverse, que cette dernière décroît continuellement avec la progression du colmatage (Lee et al., 2004). La détérioration du taux de rejet est partiellement attribuée à l'augmentation de la concentration des sels sur la surface de la membrane (Hoek et al., 2002).

D'autre part, H.Y. Ng et al. ont rapporté que le développement d'une couche colloïdale restreint le transfert de retour des sels de la surface de la membrane vers le volume de la solution, résultant en une diminution de leur rejet. L'accroissement de la concentration des solutés à proximité de la membrane crée un gradient de concentration très important le long de la surface. Ce phénomène provoque l'augmentation de leurs concentrations dans le perméat et réduit leur rétention. De plus, ils considèrent que le rejet est d'autant plus élevé que le taux de cisaillement à la paroi membranaire est élevé, en suggérant l'existence d'une couche mince de polarisation et un dépôt léger de solutés sur la surface membranaire (Ng et al., 2004).

Selon Hoek et al. (Hoek et al., 2003, ainsi que les différentes études évoquées précédemment (Ng et al., 2004 ; Hoek et al., 2002), l'augmentation de la concentration des sels dans la couche de polarisation est la raison principale de la diminution du taux de rejet des membranes pendant le colmatage.

D'autre part, certains auteurs ont rapporté dans la littérature que l'expérience montre qu'une concentration en silice de moins de 10 mg/L dans l'alimentation ne présente aucun risque de colmatage pour les systèmes d'osmose inverse opérant à des taux de conversion inférieurs à 98% (Al-Rehaili et al., 2003).

En ce qui concerne le fer, l'étude de Gwon et al. a montré que la présence de cet élément à une concentration de 0,02 mg/L n'a engendré aucun dépôt à base d'hydroxyde de fer, ceci grâce à l'utilisation de l'ultrafiltration comme prétraitement (Gwon et al., 2003).

Le travail de Hong et al. peut également renforcer cette déduction. Ces auteurs ont montré que l'accumulation des matières colloïdales à proximité de la surface membranaire induit à une décroissance rapide et apparente du flux de perméat. Ils ont vérifié par un modèle numérique reliant le

flux à la pression transmembranaire que le déclin du flux est trop important et trop rapide en début de filtration. La décroissance devient par la suite graduelle pour atteindre enfin un équilibre (Hong et al., 1997).

Contrairement à l'étude de Hong et al., les travaux de Bakhti suggèrent que le flux de perméat se maintient constant pour une durée assez longue de fonctionnement, puis commence à baisser légèrement (Bakhti, 2006).

II.3.3. Résultats de la numération microbiologique

En raison du fonctionnement continu des membranes avec de l'eau, la présence de certains microorganismes à la surface des membranes est attendue (bactéries aérobies par exemple). Lorsque la présence de ces microorganismes est très élevée, ou lorsque certains microorganismes spécifiques sont détectés à la surface de la membrane, une relation directe avec le biofilm peut être établie.

Le tableau 42 décrit certains paramètres et certaines valeurs de référence qui doivent être pris en compte afin d'identifier la présence d'un biofilm sur la surface de la membrane. Les valeurs de référence incluses dans ce tableau sont indicatives. Pour une identification plus précise du biofilm, des paramètres supplémentaires comme la présence de dérivés de protéines/polysaccharides doivent être pris en compte.

Les résultats obtenus à partir des comptages microbiologiques de la surface des membranes en position 1 et 7 sont inclus dans le tableau 42. En considérant ces résultats, il y a juste une légère présence de bactéries aérobies sur les deux membranes (en position 1 et 2), donc aucune présence suffisamment élevée pour être liée à des défaillances de performance des membranes.

Tableau 41. Comptages microbiologiques obtenus à partir de la surface de la membrane

TABLE 1.- MICROBIOLOGICAL COUNTS OBTAINED FROM AUTOPSIED MEMBRANE SURFACE

Parameter	GA160355- 1 st position (CFU/cm ²)	GA160356- 7 th position (CFU/cm ²)	Reference values for biofilms*
Aerobic Bacteria	94	4	10 ⁵
Sulphite-Reducing Bacteria	< 1	< 1	Presence
Pseudomonae Sp.	< 1	< 1	Presence
Moulds and yeasts	< 1	< 1	Presence

* (CFU/ cm² = Colony Forming Units per cm²)

Dans les travaux de Fethi et al. , l'analyse bactériologique réalisée suite à des autopsies effectuées sur des membranes colmatées, a montré la présence massive des bactéries sur la surface et sur l'espaceur. Les auteurs rapportent que le biocolmatage est apparu dès les premiers mois d'exploitation de la station ; il se manifeste par une recrudescence bactérienne dès que le chlore est éliminé par le bisulfite (Fethi et al., 2001).

Les prospections effectuées sur des membranes de type polyamides après usure, ont révélé que les espèces microbiologiques communément identifiées sur les surfaces membranaires comprennent les bactéries, tels que les *Mycobacterium* sp, *Flavobacterium*, sp. *Pseudomonas* sp. et d'autres organismes non identifiés (Schneider et al., 2005).

Certains auteurs qui ont étudié le dénombrement bactérien en amont et en aval de l'osmoseur durant 100 semaines de fonctionnement démontrent que la teneur moyenne en germes totaux est passée de 29 UFC/100 mL à 7 UFC/100 mL, suggérant que les membranes ont retenues 76% des microorganismes présents dans l'alimentation (Bakhti, 2006).

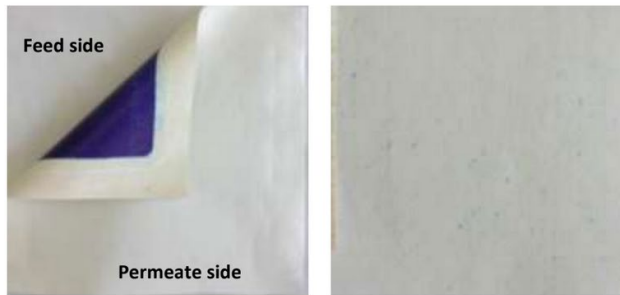
D'autres auteurs ont réalisé des analyses microbiologiques pour identifier la nature du biofilm colmatant. Cette étude a révélé différentes espèces de bactéries *Bacillus*, en particulier sur la membrane encrassée (Al-Abri et al., 2022).

II.3.4. Intégrité de la membrane encrassée

II.3.4.1. Test au bleu de méthylène

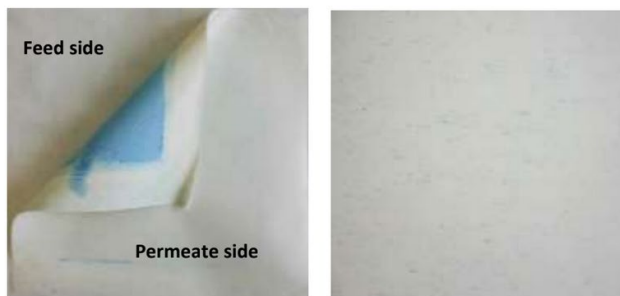
Le test au bleu de méthylène permet de détecter si la membrane est endommagée. Le test sera positif si la présence de colorant (couleur bleue) est détectée du côté du perméat. Comme le montre la figure 103, le passage du colorant a été détecté du côté du perméat, ce qui prouve que la membrane a subi des dommages.

GA 160355

Positive Negative 

Passage of dye was detected on GA160355 permeate side, which verifies that membrane has suffered some damage.

GA 160356

Positive Negative 

Passage of dye was detected on GA160355 permeate side, which verifies that

Figure 103 : Test au bleu de méthylène de la membrane encrassée usagée

III.3.4.2. Test de Fujiwara

Le test de Fujiwara (FJ) détecte des niveaux significatifs de composés polyhalogénés. Il s'agit d'un test colorimétrique dans lequel une couleur rose dans la solution analytique indique la présence d'halogènes liés organiquement. Le test FJ est toujours effectué sur des échantillons de membrane rincés à l'eau et sans dépôt (éliminé physiquement).

Le résultat montre qu'aucune couleur rose n'a été observée sur la solution analytique, donc le contact de la membrane encrassée avec les halogènes n'a pas été détecté (Figure 104).

GA 160355 Positive Negative



No pink color was observed on the analytical solution, so **contact of membrane GA160355 with halogens was not detected.**

GA 160356 Positive Negative



No pink color was observed on the analytical solution, so **contact of membrane GA160355 with halogens was**

Figure 104 : Test de Fujiwara de la membrane encrassée utilisée

III.3.4.3. Caractérisation des membranes (banc d'essai à plat)

Différents coupons de membranes ont été prélevés sur des membranes autopsiées et les paramètres de performance du flux de perméat et du rejet de sel ont été caractérisés sur un banc d'essai plat selon les conditions standard établies par le fabricant de la membrane. Les tableaux et figures suivants présentent les résultats individuels et moyens obtenus lors de ces tests.

Tableau 42. Valeurs des paramètres de performance obtenus à partir de coupons de membranes autopsiées sur le banc d'essai plat.

Dow Filmtec SW30 HR LE-440i Reference values	Permeate flux L/m ² h at 25°C 31,50 ±15% for individual elements	Salt Rejection (CE) % 99,80 % Minimum 99,65 %
Reference values established according to membrane manufacturer technical sheet/guidelines. These specifications are based on a 32.000 mg/l NaCl characterization solution at 800 psi pressure and 25°C		
Membrane coupons GA 160355 – 1 st position	Permeate flux L/m ² h (25° C)	Salt Rejection (CE) %
Coupon 1	27,23	99,55
Coupon 2	26,91	99,12
Coupon 3	27,76	99,22
Average	27,30 L/m²h (25° C)	99,3 %
Membrane coupons GA 160356 – 7 th position	Permeate flux L/m ² h (25° C)	Salt Rejection (CE) %
Coupon 1	34,0	99,38
Coupon 2	32,29	99,46
Coupon 3	32,46	98,83
Average	32,92 L/m²h (25° C)	99,2 %

Les résultats des tests indiquent que la valeur moyenne du flux de perméat obtenue à partir des coupons testés sur la membrane GA160355 est inférieure de 13% à la valeur de référence, tandis que sur la membrane GA160356, elle est supérieure de 4% à la valeur de référence. Les valeurs moyennes de rejet de sel sont inférieures à la valeur minimale établie par le fabricant dans les deux membranes. En complément de ce tableau, les figures 105 et 106 suivantes correspondent à une représentation graphique des données.

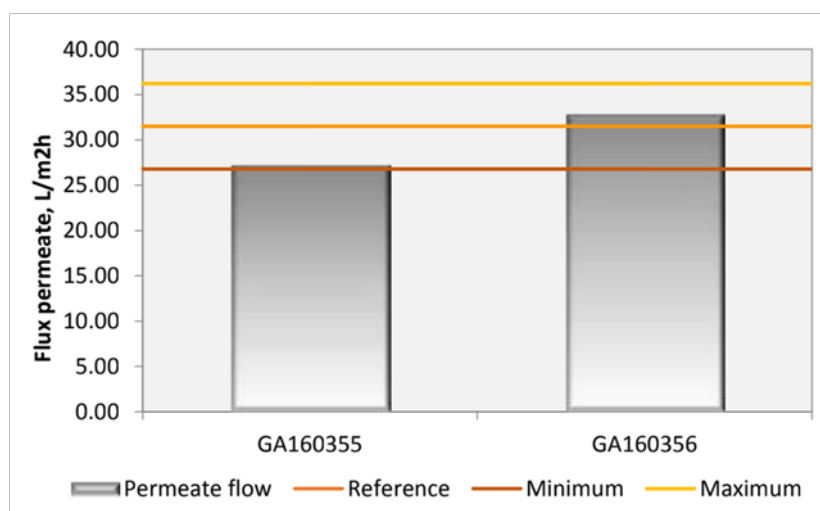


Figure 105 : Performances moyennes des membranes de flux de perméation

Figure 106 : Performance moyenne de rejet de sel des membranes

Le débit de perméat est inférieur à la référence sur la membrane GA160355-1ère position en raison de la présence d'encrassement. Les performances du GA160356-7ème position sont plus proches des valeurs de référence. Les valeurs de rejet de sel obtenues sur les deux membranes sont proches des limites établies par le fabricant.

II.3.4.4. Tests de nettoyage

Les résultats obtenus lors de la caractérisation des coupons de membrane du GA160355 rendent très difficile l'optimisation des procédures de nettoyage sur le banc d'essai plat, car ils donnent déjà des valeurs de flux de perméat supérieures à la référence.

Par ailleurs, des tests de nettoyage ont été effectués sur différents coupons de membrane prélevés sur l'élément GA160355. Compte tenu de la nature de l'encrassement, les tests de nettoyage ont été principalement axés sur la vérification des performances des nettoyeurs alcalins.

Au cours de ces expériences, le rejet de sel (basé sur le CE) et les débits de perméat ont été mesurés avant et après chaque nettoyage en utilisant les conditions de test fournies par le fabricant de la membrane pour ce modèle. Le nettoyage

Les protocoles de nettoyage et un résumé des résultats sont inclus dans le tableau ci-après. Les changements de flux et de rejet de sel pendant ces tests sont représentés dans la figure ci-après.

Tableau 43. Résumé des résultats des tests de nettoyage - échantillon de membrane en position 1

Figure 107 : Pourcentage de changements de flux obtenus à partir de la performance de différents nettoyeurs alcalins sur la membrane en position 1

Comme le montrent les résultats inclus dans le tableau 1 et représentés dans la figure 1, la meilleure amélioration du débit de perméat en une seule étape a été obtenue avec le Genesol 704.

En raison de la composition de l'encrassement identifié sur la surface de la membrane, une procédure de nettoyage complet basée sur G704/G38/G704 (nettoyage 5) a été appliquée. Bien qu'aucune amélioration supplémentaire n'ait été obtenue en appliquant ce protocole de nettoyage complet, il est conseillé de l'appliquer afin d'obtenir une élimination complète de tous les composants d'encrassement.

Le rejet de sel a montré une augmentation pendant la plupart des tests de nettoyage, bien qu'il n'ait pas été possible d'atteindre les valeurs minimales établies par le fabricant.

II.3.5. Résultat des analyses ATR/FTIR

La spectrométrie de réflexion interne fournit des informations relatives à la présence ou à l'absence de groupes fonctionnels spécifiques. La spectrométrie infrarouge à réflectance totale atténuée (ATR/IR) peut fournir des informations précieuses pour l'identification de la couche d'encrassement qui peut être présente sur la surface de la membrane.

En général, l'identification des dommages de la couche de polyamide par IR, doit considérer les bandes suivantes :

- Coude N-H de l'amide II : 1540 cm^{-1}
- Vibrations cycliques C=C : près de 1610 et 1448 cm^{-1}

L'intensité de ces bandes sur l'échantillon de membrane doit être comparée à celle d'une membrane vierge afin de vérifier s'il y a un changement significatif sur l'échantillon de membrane.

La figure 108 correspond au spectre de la membrane en position 1 comparé à un spectre caractéristique de polyamide polysulfone du même fabricant (un blanc de membrane non exact était disponible pour la comparaison).

Comme on peut l'observer sur cette figure, aucune des bandes de la composition de la membrane n'a pu être détectée sur le spectre de l'échantillon, ce qui vérifie la présence d'encrassement sur la surface de la membrane en position 1.

Afin d'identifier la composition de cet encrassement de la membrane et la source des bandes d'encrassement, un échantillon d'encrassement de la surface de la membrane en position 1 a également été analysé par cette technique.

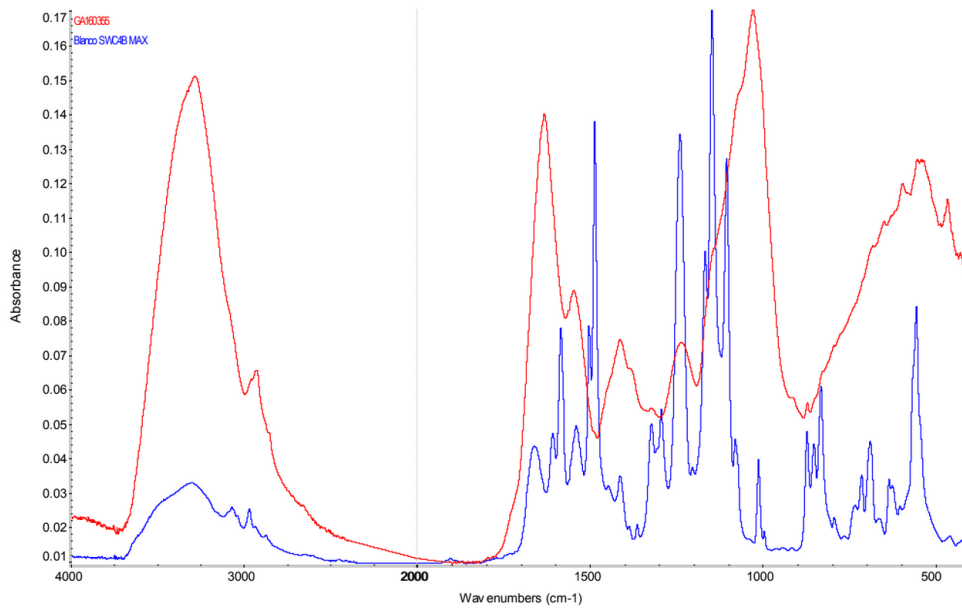


FIGURE 1.- COMPARISON OF GA 160355 (1ST POSITION) MEMBRANE IR SPECTRUM (RED LINE) TO A MEMBRANE BLANK (BLUE LINE).

Figure 108 : Comparaison du spectre IR de la membrane en position 1 (rouge) avec à un spectre caractéristique de polyamide polysulfone du même fabricant (bleu)

La figure 109 présente une comparaison du spectre d'encrassement et des principaux composés identifiés : dérivés de protéines liés à la présence de biofilm/matière organique de biofilm/matière organique et aluminosilicates.

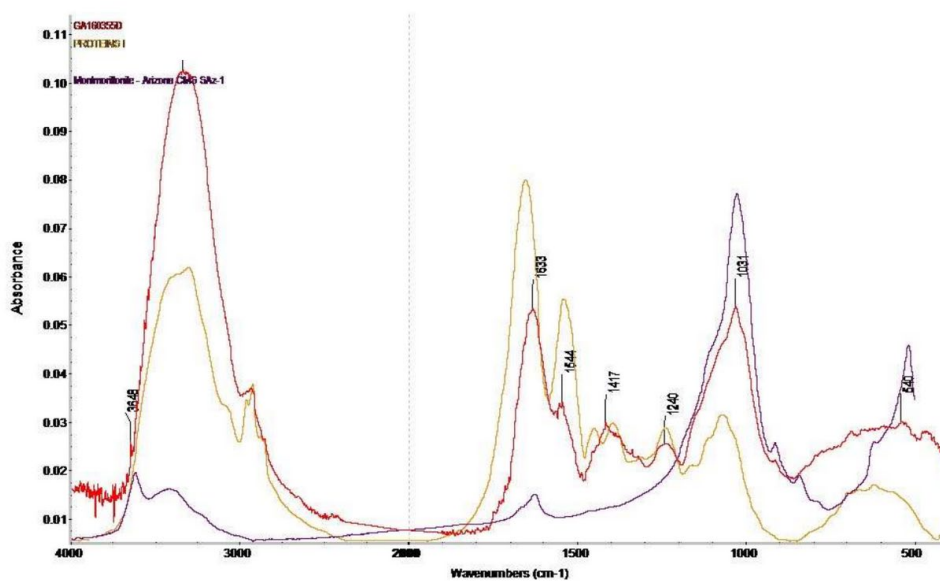


FIGURE 2.- COMPARISON OF GA 160355 (1ST POSITION) MEMBRANE IR SPECTRUM (RED LINE) COMPARED TO MAIN IDENTIFIED COMPOUNDS SPECTRA: PROTEIN DERIVATIVES RELATED TO BIOFILM/ORGANIC MATTER (YELLOW LINE) AND ALUMINOSILICATES (PURPLE LINE)

Figure 109 : Analyse du spectre d'encrassement de la membrane en position 1 (rouge)

Pour la membrane en 7^{ème} position, la figure 3 montre comment le spectre IR permet de distinguer la plupart des bandes de la composition de la membrane. Ceci vérifie qu'il n'y a pas de présence significative d'encrassement sur cette membrane (Figure 110).

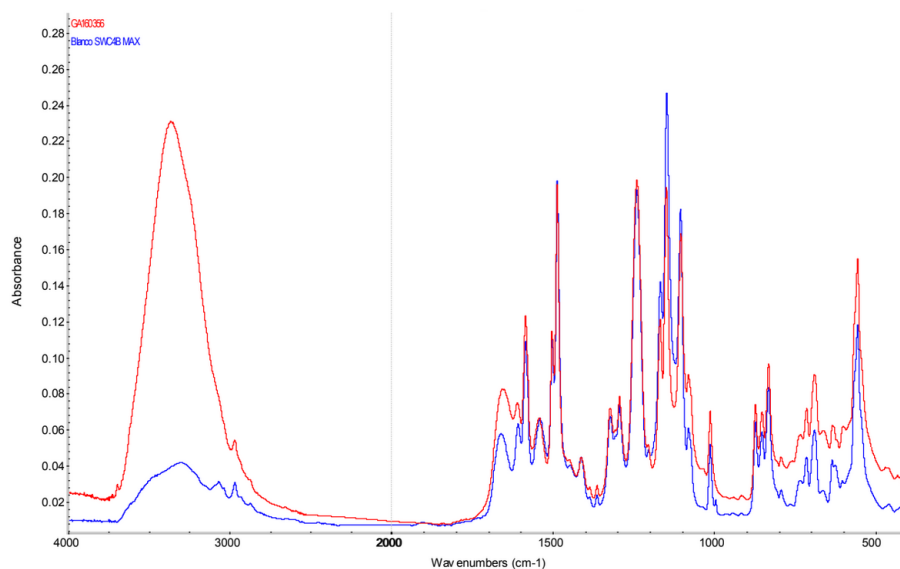


Figure 110 : Comparaison du spectre IR de la membrane en position 7 (rouge) avec à un spectre caractéristique de polyamide polysulfone du même fabricant (bleu)

Afin de vérifier l'intégrité de la couche de polyamide de la membrane autopsiée, un nettoyage mécanique de la surface de la membrane a été effectué. Les spectres IR obtenus à partir de membrane en position 1 et 7 sont comparés au spectre d'une membrane vierge dans les figures ci-dessous.

Comme on peut l'observer sur la figure 111, le spectre de la surface propre de la membrane en position 1 présente encore des résidus d'encrassement, qui ne permettent pas à la membrane de fonctionner correctement.

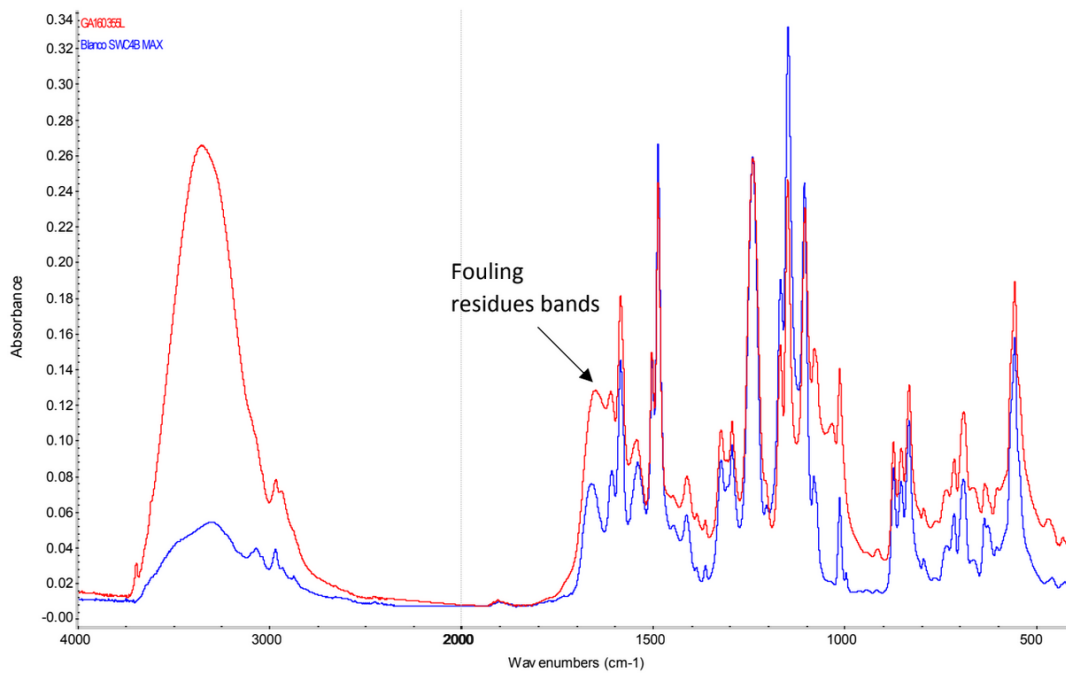


FIGURE 1.- COMPARISON OF GA 160355 MEMBRANE IR SPECTRUM AFTER A MECHANICAL CLEANING (RED LINE) COMPARED TO MEMBRANE BLANK (BLUE LINE).

It is not possible to check possible structural changes on this membrane due to some fouling residues.

Figure 111 : Analyse du spectre de la membrane en position 1

Les figures ci-après présentent le spectre de surface propre de la membrane en position 7 propre par rapport à la membrane vierge. Dans ce cas, il y a quelques changements sur les bandes de polyamide par rapport à la membrane vierge, mais la membrane vierge ne provient pas du même modèle.

Dans ce cas, il y a quelques changements sur les bandes de polyamide par rapport à la membrane vierge, mais la membrane vierge ne provient pas du même modèle et ces différences ne sont pas assez significatives pour déterminer un dommage.

Ensuite, aucun changement structural significatif n'est détecté sur la surface de la membrane polyamide en position 7 (Figure 112).

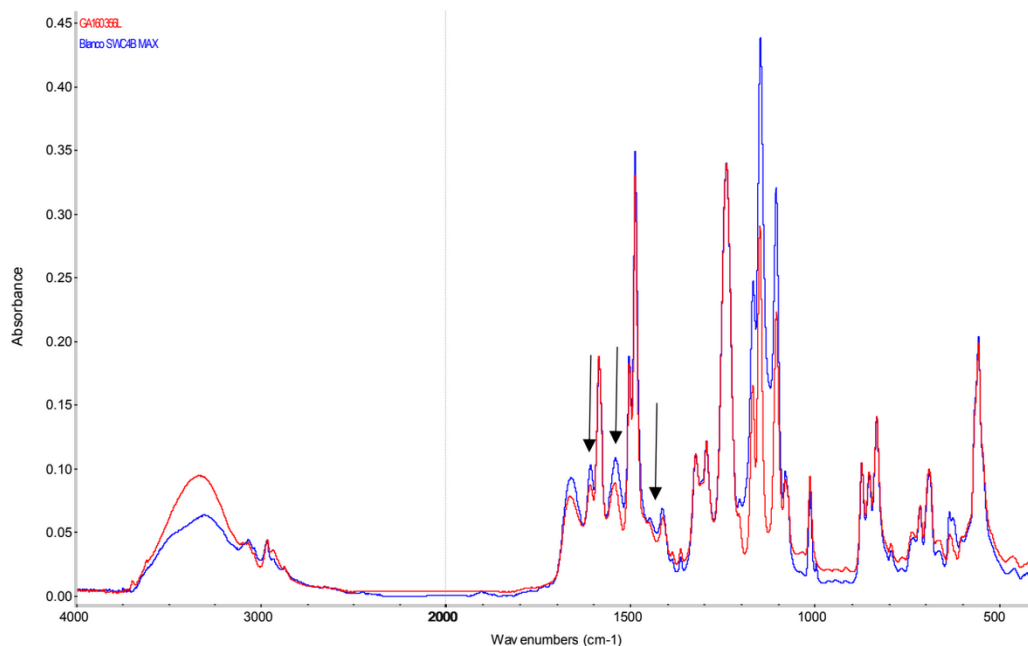


FIGURE 2.- COMPARISON OF GA 160356 (7th position) MEMBRANE IR SPECTRUM AFTER A MECHANICAL CLEANING (RED LINE) COMPARED TO MEMBRANE BLANK (BLUE LINE).

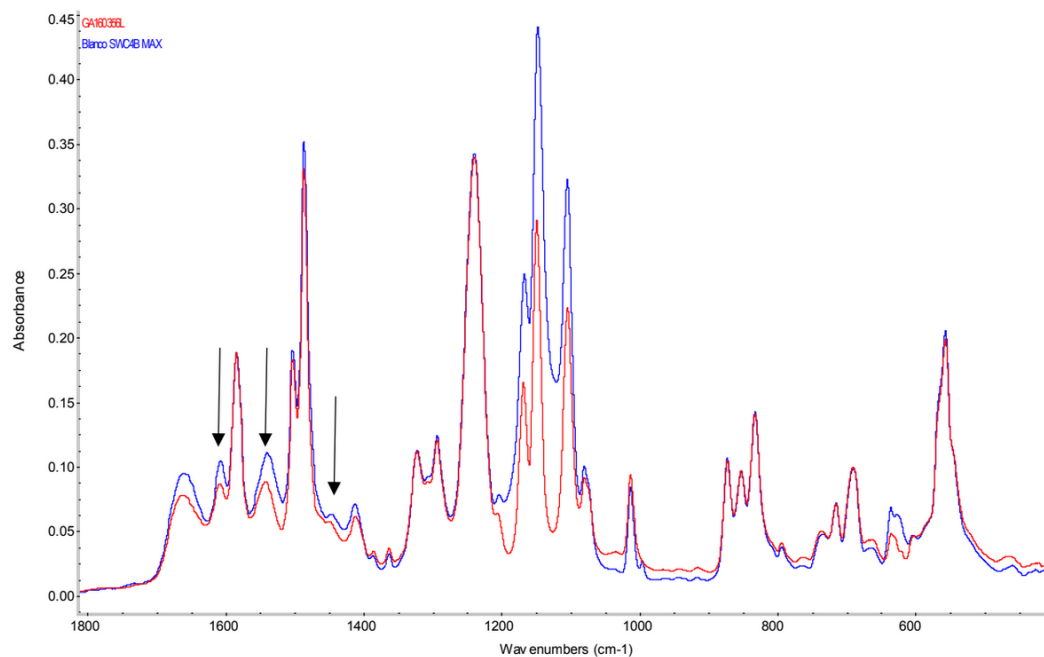


FIGURE 2.- COMPARISON OF GA 160356 (7th position) MEMBRANE IR SPECTRUM AFTER A MECHANICAL CLEANING (RED LINE) COMPARED TO MEMBRANE BLANK (BLUE LINE) AT LOW FREQUENCIES. There are some differences on polyamide bands intensity, but they cannot be considered significant since no exact membrane blank was used for comparison.

Figure 112 : Analyse du spectre de la membrane en position 7

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

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

Avec l'essor et le développement du secteur industriel, le problème de l'approvisionnement en eau potable reste le sujet d'intérêt de nombreux scientifiques, puisqu'il touche plusieurs secteurs vitaux.

Notre pays dispose d'un énorme potentiel en eau de mer ; mais cette ressource en eau présente une salinité importante, ce qui exige le recours vers le dessalement des eaux de mer.

Parmi les techniques de dessalement d'eau de mer, le procédé d'OI est le plus répandu. Bien que cette solution, en comparaison aux autres techniques, soit la plus rentable, la moins chère et de ce fait la plus envisageable pour subvenir aux besoins en eau potable futurs, elle présente un inconvénient majeur et bien connu : le colmatage de la membrane.

Comme décrit dans ce travail, bien que dans les stations de dessalement, les étapes de pré-traitement utilisées garantissent le bon entretien de l'équipement de la station, produisant une eau douce de bonne qualité, le colmatage est le problème le plus aigu de la filtration membranaire, il altère les propriétés de séparation des membranes et réduit leur productivité et donc, concourt à augmenter les dépenses d'énergie, à accroître la fréquence des lavages et à réduire éventuellement la durée de vie des membranes.

Aujourd'hui, l'Algérie est l'un des grands utilisateurs des membranes d'osmose inverse, mais jusqu'à maintenant, à notre connaissance, il ne dispose d'aucun centre de caractérisation des membranes qui peut orienter les concepteurs, les ingénieurs, les gestionnaires et les exploitants.

Même si de nombreux travaux de recherche ont été consacrés au colmatage, il demeure un phénomène complexe et encore partiellement compris. Aujourd'hui, il est nécessaire d'étudier le comportement des membranes face à ce colmatage et d'envisager des outils éprouvés pour pouvoir prolonger sa durée de vie.

C'est dans ce contexte que ce travail a été réalisé afin d'améliorer la compréhension de l'inconvénient majeur de cette technique : le vieillissement de la membrane.

Ce travail de thèse qui s'est effectué au niveau de la station de dessalement de l'eau de mer de Cap Djnet dans la Willaya de Boumerdes avait pour objectif d'étudier l'état de vieillissement des membranes usagées prélevées à plusieurs positions dans le processus de lui appliquer une démarche d'autopsie.

La première partie théorique de ce travail nous a permis de définir les concepts, les enjeux actuels en termes de techniques de dessalement d'eau de mer et inconvénient majeur rencontré pour une meilleure compréhension de l'étude menée dans le cadre de ce travail.

La partie expérimentale de ce travail a permis de mettre en place une étude originale et à notre connaissance unique en Algérie, basé sur une démarche d'autopsie des membranes usagées.

Cette étude nous a permis d'identifier les agents colmatants et d'analyser l'état d'usure de la membrane en fin de vie.

L'identification des agents colmatants par la microanalyse aux rayons X a montré que les espèces déposées sur la membrane sont principalement de nature minérale. Aussi un film de nature biologique a été détecté sur la surface (biofouling). De plus, les procédures préventives de désinfection notamment, au niveau du prétraitement et de la station d'osmose inverse, ainsi que les conditions opératoires défavorables, limitent le dépôt et plus particulièrement la prolifération des microorganismes sur la surface de séparation.

L'analyse du dépôt colmatant par diffraction de rayons X révèle et confirme sa nature minérale. En effet, le dépôt est constitué principalement de gypse, de calcite, et de faibles proportions en cédérite et argile.

Au cours de ce travail nous avons étudié la faisabilité de prolonger la durée de vie d'une membrane d'OI dans une station de dessalement d'eau de mer.

La présente étude a permis d'identifier la nature du colmatage des membranes de la station de dessalement de Cap djnet, que même le pré-traitement n'a pas pu éviter et d'analyser la capacité et les propriétés des membranes après leur fin de vie.

Les résultats obtenus suggèrent qu'un prolongement de la durée de vie d'une membrane au-delà des 7 ans est possible et faisable grâce à la mise en place d'un procédé de pré-traitement adapté à la nature du colmatage spécifique de la station identifier par autopsie.

Ainsi, avec un pre-traitement adapté au type de colmatage identifié en autopsié, ici dans notre cas : un dosage en continu hypochloritee de sodium et neutraliser avec Meta bisulfite de sodium avant l'arrivé aux membranes, une pratique déjà mis en place dans d'autre station de dessalement, permettra de récupérer et d'améliorer les performances des membranes et ainsi de réutiliser les membranes et de prolonger leur durée de vie.

En résumé, il est observé pour la première fois qu'une vieille membrane d'OI d'eau de mer employée dans des conditions d'utilisation optimal avec pré-traitements, induit une microporosité qui lui confère les propriétés d'une membrane de NF. Ainsi, il est possible d'envisager l'usage de cette vieille membrane d'OI en pré-traitement d'une membrane d'OI neuve, ce qui induirait une augmentation de la durée de vie de la membrane d'OI.

Cette démarche pourrait s'inscrire dans la procédure de dessalement jusque là mis en place en intégrant un développement d'étapes supplémentaires : *i*) l'autopsie des membranes systématiques à une fréquence régulière (à déterminer) et *ii*) un pré-traitement supplémentaire en fin de processus adapté pour prolongé la durée de vie des membranes.

Le développement de ce procédé nécessite toutefois une poursuite des travaux engagés. Les axes principaux sur lesquels il nous semble important de continuer à travailler sont les suivants :

- Le travail sur l'optimisation des conditions de pré-traitement doit être poursuivi, en prenant notamment en compte la nature du colmatage identifié ;
- L'intégration systématique de l'étape de l'autopsie des membranes en fin de vie doit être étudiée sur le plan technologique afin de pouvoir proposer un design et un mode opératoire pour ce procédé global. Cela permettra alors d'identifier systématiquement la nature du colmatage et des solutions appropriées pour un pré-traitement des membranes en vue d'une réutilisation.
- la mise en place d'une démarche d'analyse coût/bénéfice qui permettra d'accéder à l'estimation du coût énergétique réel prenant en compte les pertes liées au changement des membranes usées et un nouveau fonctionnement idéal avec une étape supplémentaire (autopsie et pré-traitement de membrane en fin de vie).

Au vu du nombre de stations de dessalement d'eau de mer grandissant en Algérie, l'installation d'une unité opérationnelle d'autopsie des membranes d'OI, jusque là inexistante, est une étape primordiale pour le développement de cette nouvelle démarche en vue de prolonger la durée de vie des membranes, et ainsi palier à l'inconvénient majeur de cette technique d'OI.

Aujourd'hui, les avancées technologiques permettent d'optimiser tant les coûts d'investissement que d'exploitation :

Ainsi, en perspective, chaque unité pourra être conçue comme une réponse unique et originale aux problématiques rencontrées grâce à la mise en œuvre de technologies de haute précision incluant une autopsie et un pré-traitement des membranes encore plus spécifique afin : *i) accroître les performances* de l'osmose inverse et du pré-traitement en fonction du niveau de salinité et de la type de colmatage identifié ; *ii) Optimiser* toutes les installations de l'usine de dessalement : pré-traitement, consommation énergétique, lavage des membranes...

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Abd El Aleem, F. A., K. A. Al- Sugair, M. I. Alahmad, Biofouling problems in membrane processes for water desalination and reuse in Saudi Arabia, *International biodeterioration and biodegradation*, 41 (1998) 19-23.

AESN : Eau sur la terre. Revue de l'Agence de l'Eau Seine-Normandie. Partie 5, Chapitre 1. 6p

Aimar, P., P. Aptel, Membrane preparation, fouling emerging processes, fouling and process design, Récents progrès en génie des procédés, European Society of Membrane Science and Technology, (J. A. Howell, membrane application, Centre University of Bath).

Al-Abri, M.; Kyaw, H.H.; Al-Ghafri, B.; Myint, M.T.Z.; Dobretsov, S. Autopsy of Used Reverse Osmosis Membranes from the Largest Seawater Desalination Plant in Oman. *Membranes* 2022, 12, 671. <https://doi.org/10.3390/membranes12070671>

Al-Rehaili, A. M., Comparative chemical clarification for silica removal from RO groundwater feed, *Desalination*, 159 (2003) 21-31.

Altaee, A., Mabrouk, A., Bourouni, K., Palenzuela, P. Forward osmosis pretreatment of seawater to thermal desalination: high temperature FO – MSF/MED hybrid system. *Desalination*, 339 (2014) 18–25.

Altinkaya S. A., Ozbas B., Modeling of asymmetric membrane formation by dry casting method, *Journal of Membrane Science*, 230, 71-89, 2004.

Al-Shayji K.A., Modeling, Simulation, and Optimization of Large-Scale Commercial Desalination Plants, Thèse de doctorat, Virginia Polytechnic Institute and State University, (1998).

Amjad, Z., Ph.D., J.F. Zibrida, and R. W. Zuhl, Reverse osmosis technology: Fundamentals and water applications, Association of water technologies, Inc, 1998 Annual convention, Oct 24-28 1998, Washington, DC.

Audinos R., Isoard P, (1986) : Glossaire des termes techniques des procédés à membrane. Société Française de Filtration. pages 142. In étude de la complexation des cations métalliques en vue de leur séparation par un procédé membranaire.

B

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

Bakhti, S. Etude du colmatage d'une membrane d'osmose inverse, Thèse de doctorat de l'université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene U.S.T.H.B Faculté de Génie Mécanique et de Génie des Procédés, 2006.

Barhoumi Y., Gaudremeau J., Gerbe B., Khamising F. et Rabatel Y., 2004. Eau ressources et menaces .3-4p

Barlow M, Blue Gold, www.canadians.org, 2001.

Benner, R., Biddanda, B., Black, B., McCarthy, M., 1997. Abundance, size distribution, and stable carbon and nitrogen isotopic compositions of marine organic matter isolated by tangential-flow ultrafiltration. *Marine Chemistry* 57, 243–263. doi:10.1016/S0304-4203(97)00013-3

Boyé H. (2008) : Eau, énergie, dessalement et changement climatique en Méditerranée. Etude réalisée pour le Plan Bleu. Disponible sur le web www.planbleu.org/publications/Etude_regionale_dessalement_FR.pdf

Belkacem, M., Nouvelle méthodologie dans le traitement des huiles de coupe par ultrafiltration, thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Toulouse, 1995(France).

Berland, JM., Juery, C., (2002) : Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau. Document technique FNDAE N° 14. Pages 1-71

Brehant, A., Bonnelye, V., Perez, M. Comparison of MF/UF pretreatment with conventional filtration prior to RO membranes for surface seawater desalination. *Desalination*, 144 (2002) 353-360.

Brown, E., Colling, A., Park, D., Phillips, J., Rothery, D., Wright, J. *Seawater: Its composition, properties and behaviour*, The Open University, Second edition, (1997

Buisson H, Lebeau T, Lelievre C, Herremans L, Les membranes: point sur les évolutions d'un outil incontournable en production d'eau potable, L'eau l'industrie les nuisances, pp 42- 47,1998.

C

Cadotte J. E. et al., A new thin film composite seawater reverse osmosis membrane, *Desalination*, 32, p. 25-31, 1980

Caetano, A., M. N. De pinho, E. Drioli, H. Muntau, *Membrane technology: Applications to industrial wastewater treatment*, Kluwer Academic Publishers, London, 1995.

Caroa J., Schiestelb T., Werthc S., Wanga H., Noack M., Can inorganic membranes compete with organic ones? Perovskite hollow fibres for O₂-separation and supported H₂- selective zeolite membranes, *Desalination*, 199, 365–367, 2006.

Cath T. Y., Childress A. E., Elimelech M., Forward osmosis: Principles, applications and recent developments, *Journal of Membrane Science*, 281, 70-87, 2006

Chen, K. L., L. Song., S. L. Ong, W. J. Ng, The development of membrane fouling in fullscale RO processes, *Journal of Membrane Science* 232 (2004) 63–72.

Cheng, R. C., Effect of small halocarbons on reverse osmosis membrane performance, Thèse de doctorat, Génie civil, University of California, Los Angeles, 1990.

Christopherson R.W., *Geosystems*, 5th edition, Prentice Hall, 2003

Commission Européenne, European commission, statistical pocketbook – 2007

<https://www.mcourses.net/fra14/ommyfra14aim76.pdf>

Comprehensive assessment of water management in agriculture, Insights, International water management (IWMI) report, pp. 8, 2006

Cot L., Ayral A., Durand J., Guizard C., Hovnanian N., Julbe A, Larbot A., Inorganic membranes and solid state sciences, *Solid State Sciences*, 2, 313-334, 2000.

Cunningham W.P., Ann M., Barbara S., *Environmental Science*, 7th edition, McGraw Hill, 2003

D

Desalination Markets, A Global Industry Forecast, Global Water Intelligence, Grande-Bretagne – 2007

Desclaux, S., Rémigy, J.-C., 2012. Christophe. Filtration membranaire (OI, NF, UF)-Présentation des membranes et modules. *Techniques de l'Ingénieur W4090*, 20 pp.

Diop S, Rekecewicz P, 2003. Atlas mondial de l'eau : Une pénurie annoncée. Ouvrage, Edition Autrement, Paris.

Djeflat A., Eau et technologie: nouveaux défis pour le Maghreb, in Série MAGHTECH Eau et technologie au Maghreb, PUBLISUD, France, 2001.

Duafin, G., F. René, P. Aimar, Les séparations par membrane dans les procédés de l'industrie alimentaire, Collection Sciences et techniques agroalimentaires, Edition Lavoisier 1998, Paris

Dunglas J (2014) « Membre de l'Académie d'agriculture de France : Le dessalement de l'eau de mer Une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau » Manuscrit publié en février 2014

E

Eau et technologie au Maghreb, PUBLISUD, France, pp. 17,2001.

Edzwald, J. K. et Haarhoff, J. Seawater pretreatment for reverse osmosis: Chemistry, contaminants, and coagulation. *Water research*, 45 (2011) 5428 – 5440

Elimelech, M., Phillip, W. A. 2011. The future of seawater desalination : energy, technology, and the environment. *Science*. Volume 333, Issue 6043, 712-717.

Elsaid, K., Kamil, M., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., Olabi, A. Environmental impact of desalination technologies: A review. *Science of The Total Environment*, 141528 (2020).

Entreprises Pour l'Environnement (EPE), 2008. L'eau à l'horizon 2025

Ercin A.E et Hoekstra, Water footprint scenarios for 2050: a global analysis. *Environ. Int.* (2014)

F

Fell, (1995): Reverse osmosis. In *Membrane Separations Technology. Principles and applications*. In étude des mécanismes de transfert des molécules organiques en osmose inverse ; Application au recyclage des condensats issus de la concentration des vinasses de distilleries. Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParis Tech), 2008.

Ferjani, E., R. Hadj Lajimi, A. Deratani, M. Sadok Roudesli, Bulk and surface modification of cellulose diacetate based RO/NF membranes by polymethyhydrosiloxane: preparation and characterization, *Desalination*, 146 (2002) 325-330.

Fethi, K., C. Habib, Performance de la station de dessalement de Gabès (22,500 m³/j) après cinq ans de fonctionnement, *Desalination*, 136 (2001) 263- 272.

Flemming, H.-C., 1997. Reverse osmosis membrane biofouling. *Experimental Thermal and Fluid Science* 14, 382–391. doi:10.1016/S0894-1777(96)00140-9

Força S. M. L., Yoshida I. V. P., Nunes S. P., Organic–inorganic membranes prepared from polyether diamine and epoxy silane, *Journal of Membrane Science*, 159, 197-207, 1999

G

Gasmi, K. Atelier sur les PPP (Partenariat Public Privé) dans le dessalement et la réduction de l'eau non génératrice de revenus, Marseille, 12-14 Décembre, (2016).

Gaujour D 1995 « La pollution des milieux aquatiques : Aide-mémoire », 2eme édition : Lavoisier, P4

Greenlee, L.F., Lawler, D.F., Freeman, B.D., Marrot, B., Moulin, P., 2009. Reverse osmosis desalination: Water sources, technology, and today's challenges. *Water Research* 43, 2317– 2348. doi:10.1016/j.watres.2009.03.010

Gulhati N.D., *The Indus Waters Treaty: An Exercise in International Mediation*, Allied Publishers, Bombay, 1973.

Gwon, E., M. Yu, H. Oh, Y. Ylee, Fouling characteristics of NF and RO operated for removal of dissolved matter from groundwater, *Water Research* 37 (2003) 2989–2997.

H

Habimana, O., Semião, A.J.C., Casey, E., 2014. The role of cell-surface interactions in bacterial initial adhesion and consequent biofilm formation on nanofiltration/reverse osmosis membranes. *Journal of Membrane Science* 454, 82–96. doi:10.1016/j.memsci.2013.11.043

Her N G. Amy, A. Plottu-pecheux et Yoon Y (2007). Identification of nanofiltration membrane foulants. *Water Res.*, 41, 3936-3947.

Henthorne, L. Evaluation of Membrane Pretreatment for Seawater Reverse Osmosis Desalination. *Desalination and Water Purification Research and Development Program Report No. 106*, (2007), pp. 1–142

Henthorne, L., Boysen, B., 2015. State-of-the-art of reverse osmosis desalination pretreatment. *Desalination* 356, 129–139. doi:10.1016/j.desal.2014.10.039

Her N G. Amy, A. Plottu-pecheux et Yoon Y (2007). Identification of nanofiltration membrane foulants. *Water Res.*, 41, 3936-3947.

Hoek, E. M. V., A. S. Kim, M. Elimelech, Influence of cross flow membrane geometry and shear rate on colloidal fouling in reverse osmosis and nanofiltration separations, *Environmental engineering science*, Volume19, 2002 357-372.

Hoek, E. M. V., M. Elimelech, Cake- Enhanced concentration polarization: A new fouling mechanism for salt rejecting membranes, *Environmental science*, 37 (2003) 5581-5588.

Hong, S., R. S. Faibish, M. Elimelech, Kinetics of Permeate Flux Decline in Crossflow Membrane Filtration of Colloidal Suspensions, *Journal of colloid and interface science* 196, 267–277 (1997).

Humphrey, J. L., G. E. Keller II, *Procédés de séparation : Techniques, sélection, dimensionnement*, Edition Dunod 2001 Paris.

K

Kavitha, J., Rajalakshmi, M., Phani, A. R., Padaki, M.. Pretreatment processes for seawater reverse osmosis desalination systems—A review. *Journal of Water Process Engineering*, 32 (2019) 100926.

Kim, S., Chon, K., Kim, S.J., Lee, S., Lee, E., Cho, J., 2009. Uncertainty in organic matter analysis for seawater reverse osmosis (SWRO) desalination. *Desalination* 238, 30–36.

doi:10.1016/j.desal.2008.01.032

Koller, E., “séparation par membranes” Génie chimique, l’usine nouvelle, Edition Dunod Paris 2001.

L

Lee, S., J. Cho, M. Elimelech, Influence of colloidal fouling and feed water recovery on salt rejection of RO and NF membranes, *Desalination*, 160 (2004) 1-12

Lee, J., Kim, I.S., 2011. Microbial community in seawater reverse osmosis and rapid diagnosis of membrane biofouling. *Desalination* 273, 118–126. doi:10.1016/j.desal.2010.12.005

Lueck, S., RODI systems Corp, 2000, Manuel de traitement des eaux d’ABC PEPSI.

Luganand, H. Fethi, K. Dessalement de l’eau de mer et des eaux saumâtres par osmose inverse: les bonnes pratiques d’ingénierie (Workshop), MEDRC (27-3) (2008)

M

Magoum I, ALGÉRIE : trois stations de dessalement de l’eau de mer sortiront bientôt de terre, *Afrik* 21 (2020).

Mallevalle, J., P. E. Ondndaal, M. R. Wiesner, Water treatment membrane process, American water works association, Lyonnaise des eaux, Mc Graw- Hill 1996.

Martín, M. A., González, I., Berrios, M., Siles, J. A., Martín, A. Optimization of coagulation–flocculation process for wastewater derived from sauce manufacturing using factorial design of experiments. *Chemical Engineering Journal*. 172 (2-3) (2011) 771-782.

Matsuyama H, Yuasa M, Kitamura Y, Teramoto M, Liyod D. R., structure control of anisotropic and asymmetric polypropylene membrane prepared by thermally induced phase separation, *Journal of Membrane Science*, 179, 91-100, 2000.

Maurel, A., Techniques séparatives à membranes, *Techniques de l’ingénieur*, J2, J2790 (Tome 1) 1993.

Maurel, A., (2001) : Dessalement de l’eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d’approvisionnement en eau douce. Edition Lavoisier, Tec & Doc. Pages 226.

Maurel, A. (2006). Dessalement de l’eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d’approvisionnement en eau douce, Paris, Editions Tech&Doc., 286p.

Mechenguel Ahlem, Comparaison des paramètres des châssis d’osmose inverse avant et après lavage chimique. Mémoire de master de l’université de Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem Département De Genie Des Procédés, 2019.

Meloan, C. E., Techniques in Analytical Chemistry “Chemical separations principles” Techniques and experiments “Osmosis and reverse osmosis”, Kansas State University Manhattan, Kansas, A wiley interscience publication, INC 1999.

Mens et Derouane, (2000) « État des nappes de l’eau souterraine de Wallonie », 2000

Méricq, J.-P., 2009. 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 l’université de Toulouse, INSA Toulouse, France.

Mohamedou, E. O., Tang, M.-Y., Lebdiri, A., Rifi, E. H., de la Puente Gonzalez, S. F., Penate Suarez, D., Ould Mahmoud, A., Fagel, M. L., Jaouen, P. & Pontie, M. (2010). Autopsie d’une membrane d’osmose inverse usagée prélevée dans le Parc National du Banc d’Arguin (PNBA) en Mauritanie : cas d’étude de Teichitt. *Revue des sciences de l’eau / Journal of Water Science*, 23(2), 147–158. <https://doi.org/10.7202/039906ar>

Mohammadi, T., M. Kazemimoghadam, M. Saadabadi, Modeling of membrane fouling and flux decline in reverse osmosis during separation of oil in water emulsions, *Desalination*, 157 (2003) 369-375.

N

Ng, H. Y., M. Elimelech, Influence of colloidal fouling on rejection of trace organic contaminants by reverse osmosis, *Journal of Membrane Science*, 244 (2004) 215–226.

Nichane M., Khelil M. A, Changements climatiques et ressources en eau en Algérie: Vulnérabilité, Impact et Stratégie D’adaptation, *Revue de BioRessource*, 4 .2, pp.1-7, 2014

P

Pankratz, T. IDA desalination year book. United Kingdom: Oxford, (2010)

Plan National de l’Eau, PLE Groupement BETURE-CARL BRO-CES Salzgitter, 1997.

Pontié M., Phénomènes électrocinétiques et transferts ioniques dans les membranes poreuses à faible seuil de coupure: Application au traitement des eaux saumâtres, Thesis, Tours University, 1996.

R

Rodier J, Legube B, Merlet N, Coll, *Analyse de l’Eau*, 5^{ème} Edition, DUNOD, Paris 1996

Rodier J (2005) « l’analyse de l’eau : Eaux naturelles, Eaux résiduaires, Eau de mer », 8^{ème} édition: Dunod, Paris.

Rodier J (2009) « l’analyse de l’eau : Eaux naturelles, Eaux résiduaires, Eau de mer », 9^{ème} édition, Dunod, Paris

Roth, E., B. Fabre, A. Accary, Identification of diffusion modes of solutes in spiral-wound reverse osmosis membranes by interpreting tracing experiments by a plug flow model, *Desalination* 129 (2000) 23-33.

Rumeau M., Membrane: transfert, *Encyclopedia Universalis* - C14: 911,1990.

S

Sahachaiyunta, P., T. Koo, R. Sheikholeslami, Effect of several inorganic species on silica fouling in RO membranes, *Desalination*, 144 (2002) 373-378.

Salomon, J. (2012). Le dessalement de l'eau de mer est-il une voie d'avenir?. *Revista de Geografia e Ordenamento do Território*, n.º 1 (Junho). Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território. Pág. 237 a 262

Satin M, Selmi B (1999) « Guide technique de l'assainissement » 2eme édition: Moniteur, P75

Savary P, (2010) « Guide des analyses de la qualité de l'eau », Edition territorial, P75.

Schäfer, A.I., A.G Fane, T.D. Waite, Fouling effects on rejection in the membrane filtration of natural waters, *Desalination*, 131 (2000) 215-224.

Schneider, R.P., L.M. Ferreira, P. Binder, E.M. Bejarano, K.P. G'oes, E. Slongo, C.R. Machado, G.M.Z. Rosa, Dynamics of organic carbon and of bacterial populations in a conventional pretreatment train of a reverse osmosis unit experiencing severe biofouling, *Journal of Membrane Science* 266 (2005) 18–29.

Shih, W.Y., A. Rahardianto, R.W. Lee, Y. Cohen, Morphometric Characterization of Calcium Sulfate Dihydrate (Gypsum) Scale on Reverse Osmosis Membranes, *Journal of Membrane Science* 252 (2005) 253–263.

Sivakumar M, Mohan D. R, Rangarajan R., Studies on cellulose acetate poly sulfone ultra filtration membranes II: Effect of additive concentration, *Journal of Membrane Science*, 268, 208-219, 2006.

Suen S.Y., Liu Y.C., Chang C.S., Exploiting immobilized metal affinity membranes for the isolation or purification of therapeutically relevant species, *Journal of Chromatography B*, 797, 305-319, 2003.

Sweity, A., Ronen, Z., Herzberg, M., 2014. Induced organic fouling with antiscalants in seawater desalination. *Desalination* 352, 158–165. doi:10.1016/j.desal.2014.08.018

T

Tamas, A. P., Étude comparée du colmatage en nanofiltration et en ultrafiltration d'eau de surface, Mémoire de maîtrise, Faculté des sciences et de Génie, Université LAVAL QUÉBEC, 2004.

Tchobanoglous, G., H. D. Stensel, F.L. Burton, Advanced wastewater treatment, Wastewater Engineering: Treatment and reuse, Fourth edition METCALF and EDDY, 2003.

U

Ulbricht M, Advanced functional polymer membranes, *Polymer*, 47, 2217-2226, 2006.

United Nations Environment Programme (UNEP) – Desalination : Resource and Guidance Manual for Environmental Impact Assessments – 168p – 2008.

United Nations World Water Development Report, WWDR, 2016/
<http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/index.shtml>,

V

Van Hoof, S., Minnery, J., Mack, B.. Dead-end ultrafiltration as alternative pre-treatment to reverse osmosis in seawater desalination: a case study. *Desalination*, 139 (2001) 161-168.

Vial, D. et Doussau, G. The use of microfiltration membranes for seawater pretreatment prior to reverse osmosis membranes. *Desalination*, 153 (2002) 141-147.

Violleau V J, Déminéralisation par électrodialyse en présence d'un complexant : Application au lactosérum, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de TOULOUSE, 1999

Visvanathan, C., N. Boonthanon, A. Sathasivan, V. Jegatheesan, Pretreatment of seawater for biodegradable organic content removal using membrane bioreactor, *Desalination*, 153 (2002) 133-140.

Vörösmarty, C. J., Green, P., Salisbury, J., and Lammers, R. B.: Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth, *Science*, 289, 284–288, 2000

Voutchkov, N. Considerations for selection of seawater filtration pretreatment system. *Desalination*, 261 (2010a) 354–364.

Voutchkov, N. Seawater Pretreatment, Water Treatment Academy, Bangkok, Thailand (2010b).

Voutchkov, N. Desalination Engineering – Planning and Design, McGraw Hill, New York, 978-0-07-177715-5, (2013).

Vrouwenvelder, J.S., van der Kooij, D., 2001. Diagnosis, prediction and prevention of biofouling of NF and RO membranes. *Desalination* 139, 65–71. doi:10.1016/S0011-9164(01)00295-8

Vrouwenvelder, J. S, Manolarakis, S. A Veenendaal, H. R. Van der Kooij D., Biofouling potential of chemicals used for scale control in RO and NF membranes, *Desalination*, 132 (2000) 1-10.

Vrouwenvelder, J.S., J.W. N. M. Kappelhof, S. G. J. Heijman, J. C. Schippers, D. Van der Kooij, Tools for fouling diagnosis of NF and RO membranes and assessment of the fouling potential of feed water, *Desalination*, 157 (2003) 361-365.

Vrouwenvelder, J.S., Manolarakis, S.A., van der Hoek, J.P., van Paassen, J.A.M., van der Meer, W.G.J., van Agtmaal, J.M.C., Prummel, H.D.M., Kruithof, J.C., van Loosdrecht, M.C.M., 2008. Quantitative biofouling diagnosis in full scale nanofiltration and reverse osmosis installations. *Water Research* 42, 4856–4868. doi:10.1016/j.watres.2008.09.002

W

WEX, Station de dessalement d'eau de mer : benisaf Algérie 200.000, Conférence WEX North Africa, (2013). <http://www.cuniv-aintemouchent.dz/files/eau42014.pdf> 3 /j.

WHO/UNICEF, Progress in Drinking-water and Sanitation: special focus on sanitation, WHO/UNICEF Joint Monitoring Program for Water Supply and Sanitation, pp. 25, 2008, Updated Numbers: WHO-UNICEF JMP, www.Unicef.org, Report 2008

Z

Zahlana B, Water, technologie, institutions, innovation and risk, in Série MAGHTECH

Zizi N, stations de dessalement de l'eau de mer en Algérie : choix des sites prioritaires, les techniques utilisées et leurs impacts positifs et négatifs sur leur environnement immédiat. Mémoire de magister de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene U.S.T.H.B, 2013.

Zhu, X., M. Elimelech, Colloidal fouling of reverse osmosis membranes: Measurements and fouling mechanisms, *Environmental science technology*, 37 (1997) 3654-3662