

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ de BLIDA 1

Faculté de Technologie

Département de Génie des Procédés



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER EN GENIE DES PROCEDES

Spécialié : Génie chimique

L'intitulé du thème

**Mesure du potentiel colmatant de l'eau de mer par
l'indice de colmatage SDI usine de dessalement de
Fouka**

Encadreur:

Mr NACEUR Mohamed Wahib

Présenté par :

ZIDOUR Fadila

Septembre 2020

ملخص

الهدف العام هو دراسة المعالجة المسبقة لمياه البحر قبل تحلية المياه عن طريق التناضح العكسي من أجل تقليل احتمال الإنسداد المياه ي مقابل الأغشية. يعد الإنسداد احد أهم المشكلات التي تواجه عند تنفيذ تقنيات الغشاء وفي هذا السياق نحاول قياس احتمالات انسداد مياه البحر من خلال مؤشر الإنسداد في محطة تحلية مياه البحر فوكة. العمل المقترح يتكون من اتباع مؤشر الوقاية من الزرع و بعد كل خطوة من خطوات العلاج المسبق. و سوف يدعم كمؤشر انسداد على نطاق صناعي SDI الإضافي MFI مؤشر إنسداد. وقد عززت هذه النتائج إلى فعالية المسبقة في الحد من إمكانية انسداد مياه البحر .

كلمات البحث: مياه البحر، مانع التسرب ، مؤشر الإنسداد ، التناضح العكسي.

Résumé :

L'objectif général est l'étude du prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse afin de réduire le potentiel de colmatage de l'eau vis-à-vis des membranes d'osmose. Le colmatage est un des problèmes les plus importants que l'on rencontre lors de la mise en œuvre des techniques à membranes. Dans ce contexte, nous allons essayer de mesurer le potentiel colmatant de l'eau de mer par l'indice de colmatage (SDI) de l'usine de dessalement FOUKA. Le travail proposé. Consiste à suivre le SDI et après chaque étape du prétraitement de usine de dessalement FOUKA permettent ainsi de trouver une corrélation de cet indice de colmatage et l'équipement relatif à chaque étape du prétraitement. D'autre indice de colmatage MFI permettront de conforter le SDI comme indice de colmatage à l'échelle industrielle. De tels résultats ont été attribués à l'efficacité du prétraitement à réduire le potentiel de colmatage de l'eau de mer.

Mots clés : Eau de mer, prétraitement, SDI , indice de colmatage, Osmose Inverse.

Abstract

The general objective is to study the pre-treatment of seawater before desalination by reverse osmosis in order to reduce the potential of water clogging vis-à-vis osmosis membranes. Clogging is one of the most important problems encountered when implementing membrane techniques. In this context, we will try to measure the clogging potential of seawater by the clogging index (SDI) of the FOUKA desalination plant. The proposed work. Consists in following the SDI and after each step of the pre-treatment of desalination plant FOUKA thus allow to find a correlation of this index of clogging and equipment relative to each step of the pre-treatment. Additional MFI Clogging Index will support SDI as an industrial-scale clogging index. Such results were attributed to the efficiency of the pretreatments to reduce the fouling potential of seawater.

Keywords: seawater , prétraitement , index fouling, reverse osmoses .

Remerciements

C'est avec un grand plaisir d'exprime notre gratitude et reconnaissance à toute personne qui a contribué à la réalisation de ce mémoire de fin d'étude.

Je remercie notre professeur consultant M_r Mohamed NACEUR Wahib.

Je tiens à exprimer mes profonds remerciements à mes enseignants de d'université « SAAD D'ahleb » M_r AOUDJ, M^{me} TAOUALIT, M_r BOUCHERIT, M_r EL HADI, M_r CHIKHI et, M_r DJALEB, Mr CHEKNANE, , M_r ISSADI.

J'adresse mes vifs remerciements à tous les personnels de l'usine de dessalements de Fouka M_r KHETAB Mohamed directeur technique, M^{me} HATTAKE Hassiba, SAÏDI Badreddine.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury qui auront l'honneur de juger ce modeste travail.

Dédicace

En premier lieu, je tiens à remercier notre dieu, notre créateur, pour le courage et la patience qu'il nous a donné pour accomplir ce travail.

*Je dis merci à qui à été douceur de mes nuit et les couleurs de ma vie et le bonheur à l'infini à ma très chère **Mère** pour ta patience et son sacrifice pour moi.*

*Et je dis merci au fond de mon cœur à mon **Père** pour son éducation et ton sacrifice, qui m'a permis d'avoir cette réussite.*

*A mes très chers frères **Abdelkader** et **Zohire**.*

*A tous mes amies qui me connaissez **Malika**, **Fatiha**, **Akila**, **Moussaab**, **Amine**, **Nassim**, **Kahina**.*

A tout le groupe de génie chimique master(2) promotion 2019-2020

A tous mes proches, sans oublier toutes mes connaissances durant ma vie.

FADILA

SOMMAIRE

Résumé	
Remerciements	
Dédicace	
Liste d'abréviation	
Liste des Tableaux	
Liste des Figures	
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur les ressources en eaux	
1.1. Eaux souterraines	2
1.2. Eaux de surface (eaux superficielles)	3
1.3. Les eaux salines	3
Chapitre 2 : Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse	
2.1. Généralités sur le dessalement	13
2.1.1. Classification des différents procédés de dessalement	13
2.1.3. Les étapes du traitement des eaux de mer	14
2.2. Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse	15
2.2.1. L'osmose inverse.....	15
2.3. Les problèmes techniques rencontrés dans le dessalement	19
2.3.1. Colmatage	19
2.3.2. Entartrage	19
2.3.3. Dégradation	20
2.3.4. La corrosion	20
2.4. Nettoyage des membranes	20
Chapitre 3: Description et fonctionnement de l'usine FOUKA	
3.1. Présentation de l'organisme d'accueil Myah Tipaza	21

3.1.1 Situation géographique de l'usine de dessalement	22
3.2. Installation de l'usine de dessalement fouka	23
3.3. Description détaillée de l'usine	24
3.3.1. Une prise d'eau de mer	24
3.3.2. Post de prétraitement	26
3.3.3. Filtres bicouches gravitaires.....	26
3.3.4. Filtres à cartouches.....	30
3.3.5. Osmose inverse	32
3.3.6. Reminéralisation.....	36
3.3.7. Station de pompage d'eau traitée.....	37

Chapitre 4. Colmatage Des Membranes D'osmose Inverse

4.1. Détermination du caractère colmatant	38
A. Silt Density Index (SDI).....	38
B. Modified Fouling Index (MFI).....	40
C. Relation entre SDI et MFI	46
D. Les Avantages Et Inconvénients Entre Sdi Et Mfi	46

Chapitre 5: Résultats et interprétations des analyses

5.1. Matériels et méthodes	49
A. Caractéristiques de l'eau de mer	49
B. Analyse des particules et colloïdes	50
5.2. Résultats et Discussions	53
Conclusion générale.....	60

Références

Annexe

Liste des abréviations

ADE : Algérienne Des Eaux.

ANRH : Agence nationale des ressources hydriques

ASTM: American society for Testing and Materials.

BOO : Build Owm Opérate.

COT : Carbone organique total.

CO₂ : oxyde de carbone

EDTA : Éthylène Diamine Tétra Acétique

F : facteur de correction

FI : Fouling Index

HP : Pompe Haute Pression

kw: kilos watt

MES : Matières en suspension.

MF: Microfiltration

MFI: Modified Fuling index.

MFI-UF: Modified Fuling index ultrafiltration.

NR : Rout Nationale.

NTU : Néphéломétrie Turbidity Unité

OI : Osmose inverse.

OMS : Organisation Mondiale De Santé.

PEHD : Polyéthylène À Haute Densité

pH : potentiel d'hydrogène

R : réservoir

SDI: Silt dendency index (indice de colmatage)

SEAAL : Société des Eaux et de l'Assainissement d'Alger.

TA : Titre alcalimétrique.

TAC : Titre Alcalimétrique Complet.

TDS : Sels dissous totaux

TH : Titre Hydrométrique (dureté totale).

T : tonne

UF : Ultrafiltration

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Généralités sur les ressources en eaux

Tableau 1.1: Concentrations des éléments principaux pour une eau de mer de salinité de 35‰.....	4
Tableau 1.2: Salinité de différentes mers fermées ou peu ouvertes.....	7

Chapitre 2 : Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse

Tableau 2.1: Avantages et inconvénients des modules spirales [14].....	18
--	----

Chapitre 3 : Description et fonctionnement de l'usine FOUKA

Tableau 3.1: Capacité de la station.....	32
Tableau 3.2: Résumé des caractéristiques des pompes.....	37

Chapitre 4 : Colmatage des membranes d'osmose inverse

Tableau 4.1. Différences et inconvénients courants de l'SDI et de l'MFI.....	47
--	----

Chapitre 5 : Résultats et interprétations des analyses

Tableau 5.1: les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer FOUKA.....	49
Tableau 5.2 : Les valeurs de repères de SDI.....	52
Tableau 5.3: Résultats du SDI 5, MES et Turbidité.....	53
Tableau 5.4: Résultats du SDI 15 avant filtre à cartouche.....	55
Tableau 5.5: Résultats du SDI 15, après filtre à cartouche :.....	57
Tableau 5.3: Résultats du MFI.....	58

Liste des figures

Chapitre 1 : Généralités sur les ressources en eaux

Figure 1.1: Principales composantes de l'eau de mer 5

Figure 1.2 : Les Algues et les Bactéries..... 11

Chapitre 2 : Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse

Figure 2.1: Les procédés de dessalement selon différents principes..... 13

Figure 2.2: Les procédés de dessalement selon le type d'énergie consommée..... 14

Figure 2.3: Schéma général d'une installation de dessalement..... 14

Figure 2.4. Principe de l'osmose et de l'osmose inverse..... 15

Figure 2.5: Mécanisme de transfert de matière 17

Figure 2.6 : Structure interne d'une membrane à spirale..... 18

Chapitre 2 : Description et fonctionnement de l'usine FOUKA

Figure 3.1 : l'organigramme de l'usine de FOUKA 22

Figure 3.2 Description générale de la station de Fouka..... 23

Figure 3.3: Tour de captage..... 24

Figure 3.4 Tête de prise d'eau..... 24

Figure 3.5: Conduite en PEHD..... 25

Figure 3.6: Émissaire submersible..... 25

Figure 3.7: Dégrilleur..... 26

Figure 3.8 Filtres gravitaire..... 29

Figure 3.9: L'unité des filtres à cartouches..... 31

Figure 3.10: Membrane (vue d))l'intérieur).....	33
Figure 3.11: Filières d'osmose inverse.....	34
Figure 3.12: Pompe.....	35
Figure 3.13: Système de récupération d'énergie.....	35
Figure 3.14: Silos de la chaux.....	36
Figure 3.15: CO ₂ fabrication sur site.....	36
Figure3.16 : Station de pompage d'eau traitée.....	39

Chapitre 4 : Colmatage des membranes d'osmose inverse

Figure 4.1 : Schéma de l'installation de SDI. Notation des capteurs : Température (T), Conductivité (K), Pression (P) et Débit (F).....	40
Figure4.2: Quatre types des mécanismes du colmatage proposés par Hermia.....	42
Figure 4.3 : Courbe de filtration t / V en fonction de V	43
Figure 4.4 : Installation de filtration pour mesurer MF-UF à flux constant.....	45
Figure 4.5. Expérience de formazine sur SDI et MFI. (Schippers et Salinaz-Rodriguez, 2014).	46
Figure 4.6 : Graphique de l'historique des évolutions de l'indice d'encrassement	48

Chapitre 5 : Résultats et interprétations des analyses

Figure 5.1 : Matériel nécessaire pour mesure SDI.....	50
Figure 5.2 : courbe représentative de la variation de la turbidité.....	54
Figure 5.3 : courbe représentative de la variation des MES.....	54
Figure 5.4 : courbe représentative de la variation du SDI ₅	55
Figure 5.5 : courbe représentative de la variation du SDI ₁₅ .avant filtre à cartouche.....	56
Figure 5.6 : courbe représentative de la variation du SDI ₁₅ .après filtre à cartouche.....	57
Figure 5.7: courbe représentative de la variation du MFI.....	57

Introduction générale

L'eau est une ressource surexploitée. Or, l'augmentation des prélèvements d'eau expose un nombre croissant de régions dans le monde à la pénurie, c'est-à-dire à une disponibilité en eau inférieure à 1 000 m³ par habitant par an.

Le dessalement de l'eau de mer est et va tendre à devenir de plus en plus nécessaire dans des pays où l'accès à l'eau potable est insuffisant, mais il ne peut s'agir d'une solution viable à long terme.

Les coûts environnementaux et financiers induits par une généralisation de la pratique pourraient entraîner un accroissement des déséquilibres, des tensions voire aboutir à des déplacements de population. Le dessalement doit rester une technique complémentaire, et permettre une transition vers un modèle de gestion de l'eau rationaliser.

L'eau de mer chargée de sels, de gaz dissous et solides en suspension. Elle contient une variété très riche de flore et de faune. par conséquent si elle n'est pas traitée, son utilisation pose un certain nombre de problème opérationnels qui limitent l'efficacité des installations et qui sont dus principalement :

A l'entartrage et au colmatage des lignes et autres équipement par les matières en suspension en particulier dans les échangeurs thermiques, dans les membranes d'osmose inverse, dans les sièges de vannes, dans les puits d'injection d'eau et dans le gisement, etc .., par suit de la rupture de conditions d'équilibre (variation de pression, de température..) ou au mélange d'eaux incompatibles.

Dans ce contexte, nous allons essayer de mesure du potentiel colmatant de l'eau de mer par l'indice de colmatage (SDI) de l'usine de dessalement FOUKA. Le travail proposé. Consiste à suivre le SDI et après chaque étape du prétraitement de usine de dessalement FOUKA permettent ainsi de trouve une corrélation de cet indice de colmatage et l'équipement relatif à chaque étape du prétraitement. D'autre indice de colmatage MFI permettront de conforter le SDI comme indice de colmatage à l'échelle industrielle. Notre étude s'articule autour en deux parties :

- Une recherche bibliographique où nous avons : Généralités su les ressources en eaux et dessalement de l'eau de mer par osmose inverse
- Une Description et fonctionnement de l'usine FOUKA, colmatage des membranes d'osmose inverse et résultats et interprétations des analyses. Enfin, une conclusion

CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS SUR LES EAUX

Introduction

L'eau est un élément de base indispensable à toute vie, la disponibilité de cette ressource naturelle est déterminante de la qualité de notre vie et souvent même de notre survie. Le cycle de l'eau (évaporation, condensation, ruissellement) devrait permettre de subvenir aux différents besoins. En effet, l'eau ne se perd ni ne se crée et, globalement, l'eau ne manquera pas alors que certaines ressources minières et les ressources en énergie fossile (pétrole, gaz et même charbon) pourraient manquer à l'échelle de quelques décennies ou de quelques siècles.

Hélas, l'eau est très inégalement répartie. Plus d'un tiers des terres de la planète sont des étendues arides, soumises à des déficits en eau toute l'année ou d'une façon saisonnière. Actuellement, un tiers de la population mondiale vivant dans les pays faisant face à un « stress hydrique ».

1.1. Eaux souterraines

Les eaux souterraines sont toutes les eaux se trouvant sous la surface du sol, dans la zone de saturation et en contact direct avec le sol ou le sous-sol.

Elles sont souvent contenues dans des couches aquifères : une couche aquifère est une strate saturée qui peut rapporter des quantités utilisables de l'eau à un puits.

De point de vue hydrogéologique les couches aquifères se divisent en :

- a) **Nappes phréatiques ou alluviales** Peu profondes et alimentées directement par les précipitations pluvieuses ou les écoulements d'eau en dessus,
- b) **Nappes captives** Plus profondes que le premier et séparées de la surface par une couche imperméable, l'alimentation de ces nappes est assurée par l'infiltration sur leurs bordures.

La nature du terrain sous lequel se trouvent ces eaux est un déterminant de leurs compositions chimiques, cependant elles sont appelées aussi les eaux propres car ils répondent `en général' aux normes de potabilité. Pourtant, ces eaux sont moins sensibles aux pollutions accidentelles, elles perdent totalement leur pureté originale dans le cas de contamination par des polluants.

Quand une eau souterraine contient une concentration en certains minéraux dépassant les normes de potabilité, mais elle représente des propriétés thérapeutiques on la

distribuée en bouteilles avec parfois un traitement bien défini, ces eaux sont dites eaux minérales.

1.2. Eaux de surface (eaux superficielles)

Ce type des eaux englobe toutes les eaux circulantes ou stockées à la surface des continents (rivières, lacs, étangs, barrages,...). La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains traversés par ces eaux durant leurs parcours dans l'ensemble des bassins versants. Ces eaux sont le siège, dans la plupart des cas, d'un développement d'une vie microbienne à cause des déchets rejetés dedans et de l'importante surface de contact avec le milieu extérieur. C'est à cause de ça que ces eaux sont rarement potables sans aucun traitement. [1]

1.3. Les eaux salines

Qualitativement, une eau salée à un goût appréciable de "sel"; il lui correspond le terme "salins". Quantitativement, une eau salée contient plus de 10 g/l de sels dissous; en dessous, on parlera d'eau saumâtre. . [2]

On distingue deux catégories d'eau salée : l'eau de mer et l'eau saumâtre

➤ **Eau de mer**

L'eau de mer est la matière première de l'usine de dessalement. Chacun peut observer ses changements de température, de limpidité d'un lieu ou d'un jour à l'autre ; les écarts de salinité sont moins connus. Salinité, température et matières en suspension sont les paramètres majeurs du fonctionnement d'une unité de dessalement. Les eaux de mers sont caractérisées par une grande salinité. [2]

➤ **Les eaux saumâtres**

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart de ces eaux contiennent entre 1 et 10 g de sel par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont les carbonates de calcium(CaCO_3), les sulfates de calcium(CaSO_4), les carbonates de magnésium (MgCO_3), et le chlorure de sodium (Na Cl). [3]

A. Caractéristiques des eaux marines

❖ Les éléments principaux

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. Par contre, les proportions relatives des principaux sels restent constantes. Cette propriété est évoquée sous l'appellation de loi de Dittmar. En pratique, on retient comme constituants majeurs ceux qui sont présents en concentration supérieure à 1 mg/kg. Ils sont énumérés dans le tableau I.1. [2]

Tableau I.1: Concentrations des éléments principaux pour une eau de mer de salinité de 35 ‰.[4]

Éléments	Formule	Concentrations (mg/kg)
Chlorure	(Cl ⁻)	19 353
Sodium	(Na ⁺)	10 783
Sulfate	(SO ₄ ²⁻)	2 712
Magnésium	(Mg ²⁺)	1 283
Calcium	(Ca ²⁺)	412.1
Potassium	(K ⁺)	399.1
Bicarbonate	(HCO ³⁻)	108
Bromure	(Br ⁻)	67.3
Strontium	(Sr ²⁺)	7.9
Borate	(B(OH) ₄ ⁻)	7.9
Fluorure	(F ⁻)	1.3

❖ Autres éléments minéraux

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

Un litre d'eau de mer contient entre 30 à 40 g de sels alors que les matières en suspension représentent quelques dizaines de mg par litre (mis à part aux embouchures de certains fleuves particulièrement chargés en matériaux terrigènes). Ces particules peuvent être finement divisées augmentant ainsi grandement les surfaces réactionnelles, ce qui peut avoir une importance notable sur les propriétés physico-chimiques de l'eau de mer. [5]

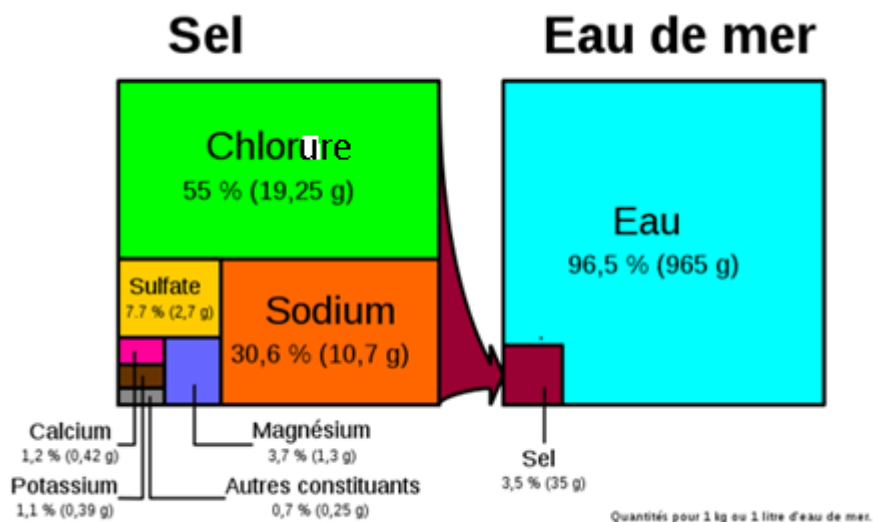


Figure I.1: Principales composantes de l'eau de mer [4]

❖ Matières organiques

Les basses concentrations de matières organiques dans l'eau de mer rendent leur analyse chimique très compliquée. Les composés sont difficiles à isoler car dilués dans un milieu contenant beaucoup d'autres éléments à de plus fortes concentrations. Par convention, on sépare par filtration sur des filtres de 0,5µm les matières dissoutes des matières organiques particulaires. Parmi les matières organiques dissoutes, on trouve des chlorophylles et caroténoïdes, de la vitamine B12, des monosaccharides, des aminoacides. Les matières organiques particulaires sont principalement constituées

d'animaux et végétaux du Zooplancton (ou leurs résidus). Elles peuvent représenter de 10 à 60% de la matière en suspension. [5]

❖ Salinité

➤ Définitions

La salinité est définie conventionnellement comme la masse en grammes des composés solides séchés à poids constant à 480°C, obtenue à partir de 1 kg d'eau de mer. Il est supposé que la matière organique a été oxydée, le brome et l'iode remplacés par leur équivalent en chlore et les carbonates convertis en oxydes. La chlorinité est définie comme la masse d'halogénures (à l'exception du fluor) exprimée en grammes de chlore par kilogramme d'eau de mer. La chlorosité est définie comme la masse d'halogénures exprimée en grammes de chlore par litre d'eau de mer. [6]

Taux de salinité moyen de la Méditerranée

- Le taux de salinité de la mer Méditerranée varie entre 36 et 38 gr/l.
- Sa valeur oscille autour de 36 gr/l près du détroit de Gibraltar où les eaux se marient par les courants avec celles de l'Atlantique. Le long des côtes françaises, le taux moyen est proche de 37,5 gr/l. Les écarts engendrés par de fortes pluies (baisse du taux) ou par de fortes évaporations lors de pics de chaleur en été, ne sont que temporaires et rapidement compensés.
- Le taux de salinité de la mer est naturellement contrôlé par des éléments régulateurs que sont les micro-organismes marins (qui consomment des sels minéraux), les courants entre mers et océans qui tendent à équilibrer les différences de concentration (ex: détroit de Gibraltar), en contre partie des apports constants de minéraux transportés par les cours d'eau vers la mer et (surtout dans l'Océan) des activités volcaniques sous-marines. [7]

Tableau 1.2: Salinité de différentes mers fermées ou peu ouvertes [8]

Origine	Salinité (g/l)
Mer rouge	43
Golf Arabique	43
Mer méditerranée	39
Océans atlantique et pacifique	33 à 36
Mer noire	13
Mer baltique	17
Mer morte	270

B. Interprétation des analyses physico-chimiques

✓ Viscosité des eaux de mer

La viscosité est un concept qui paraît simple et clair, à première vue, mais qui devient incroyablement confus et complexe si l'on va au fond des choses. Il intervient notamment dans la force avec laquelle les couches plus rapides entraînent les couches plus lentes lors de l'écoulement laminaire d'un fluide. Si F est la force de frottement s'exerçant tangentiellement à une surface de 1 unité de surface, on écrit :

$$F = \eta \frac{\partial v}{\partial n} \quad \text{Eq : 1.1}$$

Avec $\frac{\partial v}{\partial n}$ gradient de vitesse d'écoulement selon un axe normal à la surface

Le coefficient η , ou viscosité dynamique (dynamic viscosity), doit s'exprimer en kg.m l/s. [2]

✓ Densités des eaux de mer

Rapport de la masse volumique de l'eau de mer à celle de l'eau distillée à une température de 4 °C. La densité des océans est en moyenne de l'ordre de 1.035 à 1.036. Elle varie avec la salinité, la température et la pression.

✓ pH des eaux de mer

Le pH correspond à une concentration en ion H_3O^+ . Cette mesure est importante car le pH intervient dans beaucoup d'équilibres physico-chimiques.

La mesure du pH permet notamment de vérifier l'efficacité des prétraitements d'une installation de dessalement, pour éviter les précipitations de sels sur les membranes. [6]

✓ Température

Les propriétés de l'eau, affectées par la température sont :

- la densité et la viscosité ;
- la solubilité des gaz et des sels ;
- les vitesses des réactions chimiques et biochimiques.

Ce paramètre influence fortement les performances d'un osmoseur, en raison principalement de la modification de la viscosité de l'eau : une eau froide, d'une viscosité plus élevée, traverse moins facilement une membrane qu'une eau chaude. La pression d'alimentation de l'osmoseur devra alors être plus importante.

✓ Conductivité

La conductivité exprime la minéralisation globale d'une eau en mesurant son aptitude conductrice au passage d'un courant électrique. Elle dépend de la température du liquide. Pour ramener la valeur mesurée à 20°C, il faut effectuer la correction suivante :

$$C_{20^{\circ}C} = C_T \times f \quad \text{Eq : 1.2}$$

La conductivité est directement liée à la quantité de sels présents dans une eau. Chaque type de sel apporte une conductivité différente et la relation entre les deux mesures est propre à chaque solution saline.

Pour le suivi d'une usine de dessalement, la mesure de conductivité est utilisée, car elle est plus simple et rapide (analyseurs en continu) que la mesure de la salinité.

Il existe des relations empiriques pour déterminer la minéralisation d'une eau à partir de la mesure de sa conductivité.

D'une façon générale, le résultat ainsi obtenu pour la minéralisation est différent de celui obtenu par la mesure directe de l'extrait sec, mais permet d'avoir une première approche et de pouvoir comparer des évolutions de mesure par exemple.

Il permet aussi de vérifier la cohérence d'une analyse d'eau.

Pour une eau de mer on peut utiliser la relation suivante :

$$\text{SDT (mg/l)} = 0,70 \cdot \text{Conductivité à } 25^{\circ}\text{C (}\mu\text{S/cm)} \quad \text{Eq :1.3}$$

✓ Turbidité

La turbidité d'une eau a pour origine la présence de matières en suspension. Cette mesure permet donc de mesurer l'efficacité des traitements, notamment des prétraitements dans le cas d'une installation d'osmose inverse.

✓ Dureté

La dureté d'une eau correspond à la présence des ions: Ca^{+2} et Mg^{+2} . Elle est notée **TH**. Dureté totale. On peut citer 2 duretés: dureté temporaire : indique la concentration ions Ca^{+2} et Mg^{+2} qui précipitent après ébullition d'eau. Dureté permanente: correspond à la concentration en ions Ca^{+2} et Mg^{+2} qui restent en solution après ébullition d'eau. La dureté d'une eau de mer et en moyen de 705°F . [10]

✓ Les Métaux lourds

Les métaux lourds présents dans l'eau de mer peuvent être selon l'ordre de nocivité décroissante: Mercure, cadmium, Argent, Plomb, Zinc, Nickel, Cobalt.....leur toxicité de pend de la forme chimique dans laquelle ils se trouvent. Les métaux lourds représentent un vrai problème de santé publique. De part leur composition chimique, ils ne peuvent être dégradés par les bactéries. [11]

✓ Sels dissous totaux (TDS)

Cette valeur est importante puisqu'il en découle une valeur de pression osmotique, et donc une valeur de pression d'alimentation nécessaire pour l'alimentation des osmoseurs.

✓ Calcium

La mesure de ce paramètre est importante, car dans un osmoseur il y a des risques de précipitations de sels liés au calcium : sulfate de calcium et carbonate de calcium.

Le prétraitement doit être adapté en fonction des concentrations de ces ions.

✓ **Barym, strontium**

Ces deux éléments peuvent précipiter avec les sulfates dans le concentrât pour former du sulfate de baryum et du sulfate de strontium.

Le prétraitement doit être adapté en fonction des concentrations de ces ions.

✓ **Bromures**

Cette mesure est importante en raison de l'interaction du brome avec le chlore comme on le verra par la suite (Titre 5).

✓ **COT (carbone organique total)**

Remarque préliminaire : pour une eau de mer, la mesure de l'oxydabilité au KMnO_4 n'est pas fiable, en raison de sa salinité trop importante qui fausse la mesure. Il sera préféré dans ce cas une mesure du COT.

La présence combinée en proportion importante de matières organiques et de matières biologiques dans une eau de mer, peut laisser présumer de risques de développement important de la biomasse qui se nourrit de matière organique (acide humique principalement).

✓ **Teneur en fer et manganèse**

La mesure de ces paramètres dans l'eau brute doit être faite régulièrement, en raison des risques de précipitation d'hydroxydes de fer et d'oxydes de manganèse sur les membranes d'osmose inverse si le prétraitement n'est pas adapté.

✓ **Bore**

Le bore est présent dans l'eau de mer sous forme d'acide borique (H_3BO_3) à une concentration voisine de 5 mg/l. Si l'eau produite par une usine de dessalement sert à l'irrigation, le bore, au-delà d'une teneur de 1 mg/l, est responsable de l'apparition de tâches sur les fruits et les légumes, ce qui altère leur qualité commerciale. [9]

C. Les organismes aquatiques

Dans l'eau, il y a trois règnes: bactérien, animal et végétal.

✓ **Le règne bactérien** est composé d'organismes microscopiques unicellulaires, isolés ou coloniaux.

✓ **La règne végétale** est formée des champignons, des nombreux types d'algues (qui peuvent être flottantes (plancton) ou accrochées à un support (périphyton). et les végétaux supérieurs.

✓ **La règne animale** comporte les organismes les plus simples qui sont les animaux unicellulaires (protozoaires) et les animaux supérieurs (vers, crustacés, larves, etc.) [10]



Les algues vertes



Bactéries E-coli

Bactéries Choléra

Bactérie flagelle

Figure I.2 : Les Algues et les Bactéries

D. Origine de la salinité des eaux de mer

Il y'a à peu près 4 milliards d'années, l'activité volcanique de la Terre était très forte. A cette époque, l'atmosphère était riche notamment en vapeur d'eau, dioxyde de carbone (plus connu sous le nom de gaz carbonique) et en autres gaz composés de chlore et soufre. Puis au bout d'un certain temps, il y'a environ 100 millions d'années de cela, la terre s'est refroidie et la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère s'est condensée et en se précipitant, elle a emporté avec elle de nombreux autres gaz de l'atmosphère. Cette combinaison entre la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone ou encore le dioxyde de soufre est à l'origine de la formation de pluies acides.

Ces dernières sont responsables du phénomène d'érosion, qui arrache à la croûte terrestre, aux éléments qui la composent, des fragments de leur structure, notamment des sels. Ces sels issus de l'érosion des roches par les pluies acides sont ensuite entraînés dans les rivières et les fleuves pour être conduits jusqu'à ces grandes étendues d'eau que sont les mers et océans. [11]

E. Différents polluants dans les eaux de mer

Le long des côtes fortement urbanisées et industrialisées, la contamination est plus forte, entraînant la pollution des eaux de mer, qui est considérée comme un problème qu'il faut résoudre. Parmi les différents agents qui peuvent contribuer à la pollution des eaux de mer, on peut citer :

- ✓ Les vents qui peuvent transporter sur de grandes distances les matières contaminèrent.
- ✓ Les rivières, par suite des précipitations, les substances toxiques sont entraînées et transportées jusqu'aux océans;
- ✓ Les déversements d'égouts dans les fleuves ou directement dans la mer entraînant les matières organiques et les bactéries. [12]

CHAPITRE 2

**DESSALEMENT DE L'EAU DE MER
PAR
OSMOSE INVERSE**

2.1. Généralités sur le dessalement

Le dessalement consiste à éliminer les sels dissous et les substances organiques présentes dans les eaux, ainsi qu'une partie des bactéries et des virus. Il a connu ces dernières années une avancée remarquable grâce au développement de différents procédés. La méthode la plus répandue mondialement est celle de l'osmose inverse car elle présente un fort intérêt en termes de coût d'investissement, de consommation d'énergie et de qualité de l'eau produite.

2.1.1. Classification des différents procédés de dessalement

On peut classer les méthodes de dessalement en fonction des procédés utilisés, soient

- Les procédés qui font intervenir un changement de phase (distillation et congélation) ;
- Les procédés qui utilisent des membranes (électrodialyse et osmose inverse) ;
- Les procédés qui agissent sur les liaisons chimiques (échange d'ions et extraction par solvant sélectif).

Ces procédés peuvent être classés plus précisément, soit : [13]

✓ Selon le principe sur lequel ils se basent :

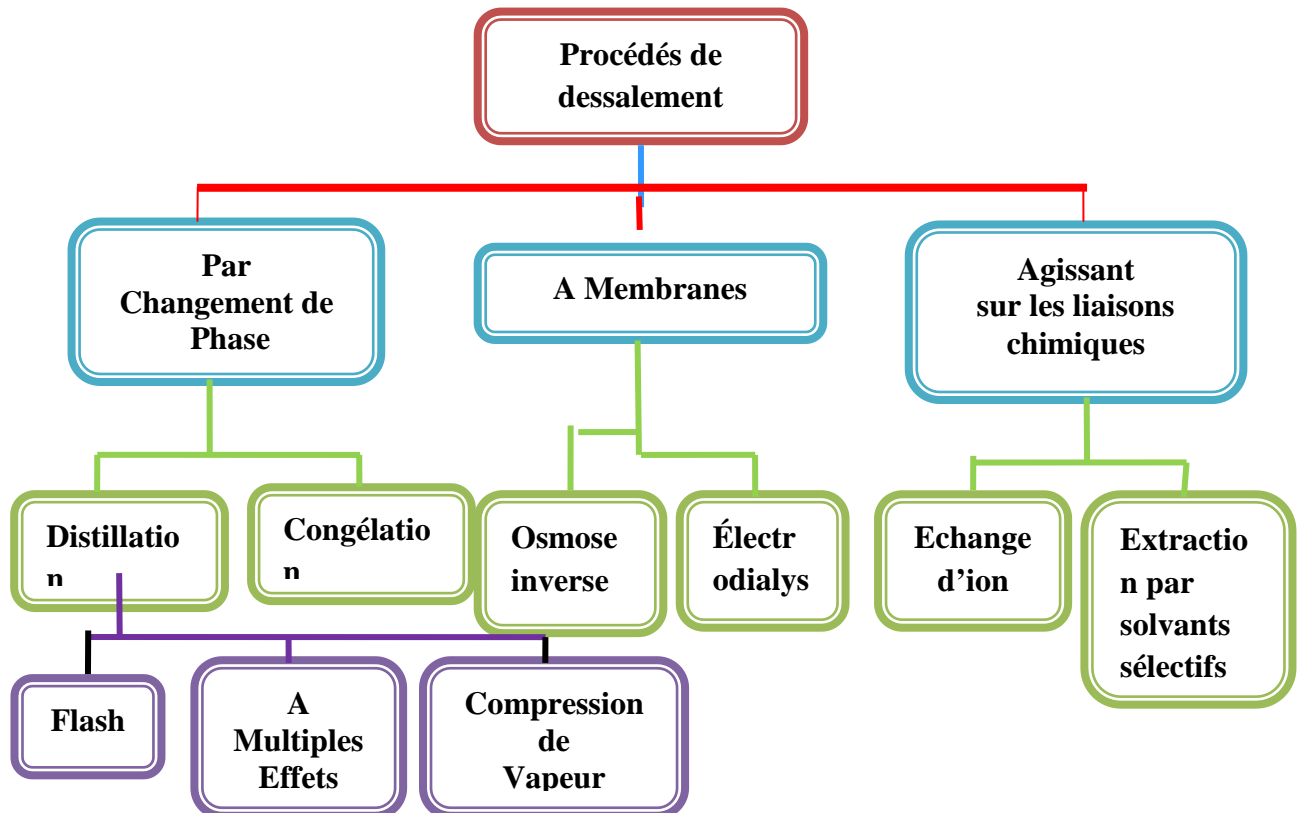


Figure 2.1: Les procédés de dessalement selon différents principes

✓ Selon le type d'énergie consommée :

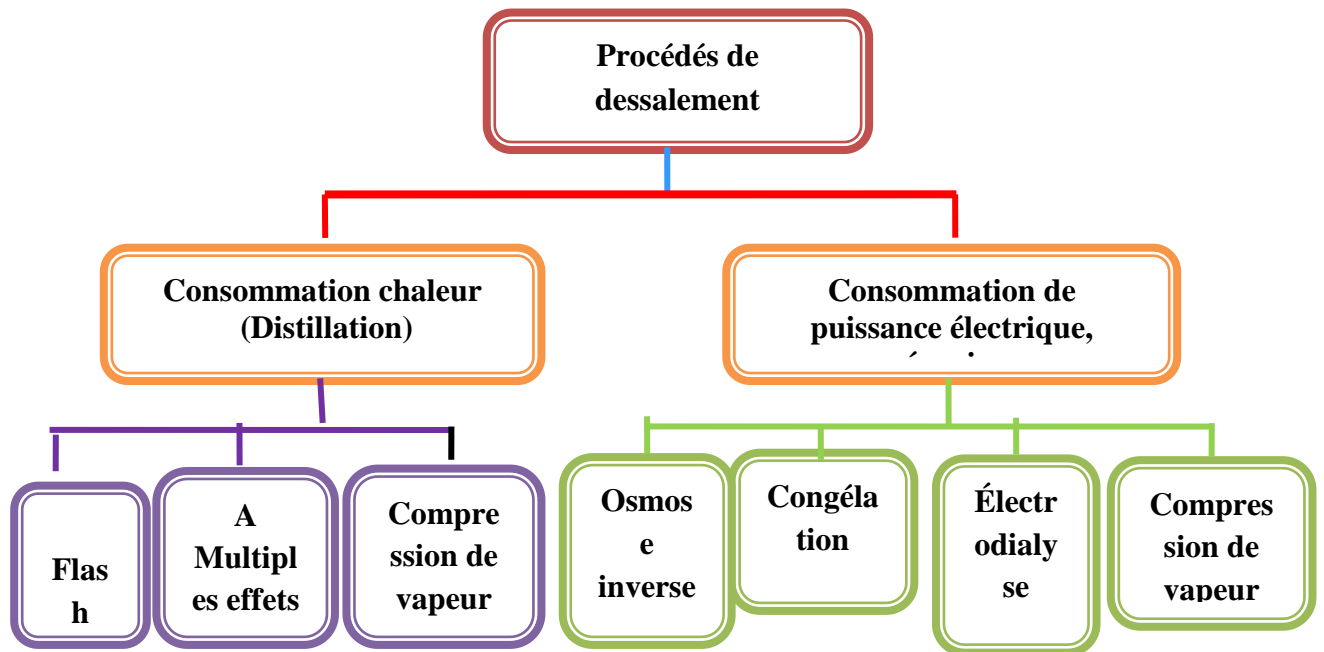


Figure 2.2: Les procédés de dessalement selon le type d'énergie consommée

2.1.2. Les étapes du traitement des eaux de mer

Quel que soit le procédé de séparation du sel et de l'eau envisagé, toutes les installations de dessalement comportent ces étapes :

- Une prise d'eau de mer avec une pompe et une filtration grossière,
- Un prétraitement 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.

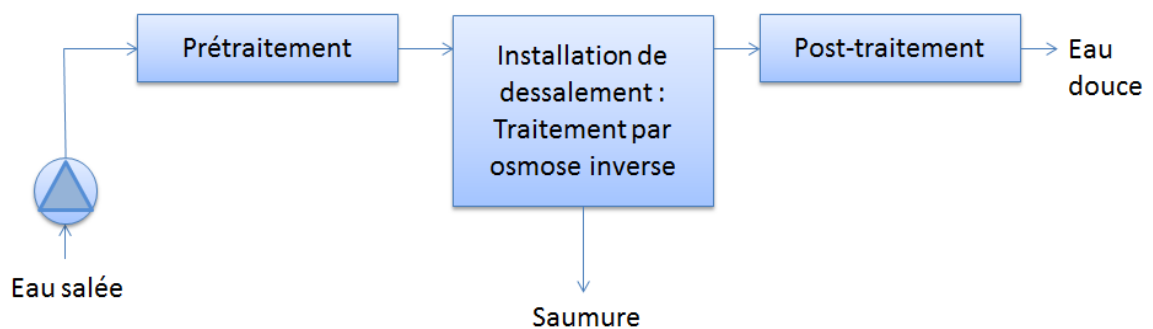


Figure 2.3: Schéma général d'une installation de dessalement [14]

2.2. Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse

2.2.1. L'osmose inverse

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

L'énergie requise par l'osmose inverse est uniquement celle électrique consommée principalement par les pompes haute pression.

La teneur en sels de l'eau osmose est de l'ordre de 0,5 g/l.

A. Principe de l'osmose inverse

On appelle 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.

Soit un système à deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable et contenant deux solutions de concentrations différentes. Le phénomène d'osmose va se traduire par un écoulement d'eau dirigé de la solution diluée vers la solution concentrée. Si l'on essaie d'empêcher ce flux d'eau en appliquant une pression sur la solution concentrée, la quantité d'eau transférée par osmose va diminuer. Il arrivera un moment où la pression appliquée sera telle que le flux d'eau s'annulera. Si, pour simplifier, nous supposons que la solution diluée est de l'eau pure, cette pression d'équilibre est appelée pression osmotique.

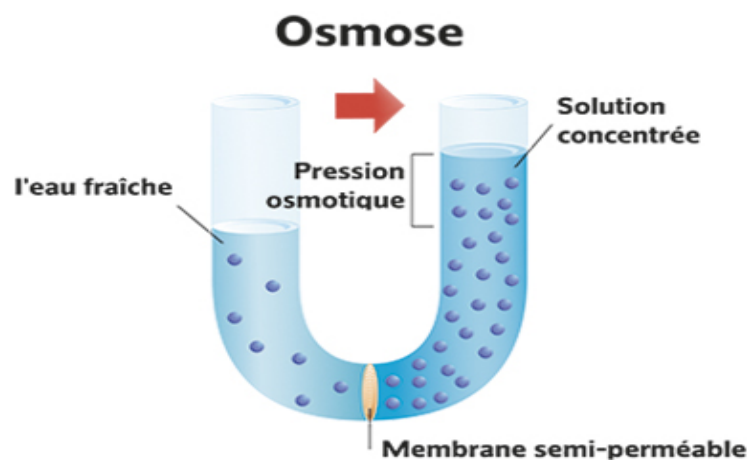


Figure 2.4. Principe de l'osmose et de l'osmose inverse

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. [15]

Pour les solutions suffisamment diluées, la pression osmotique notée π peut être calculée d'après la loi de Van't Hoff :

$$\pi = i \times C \times R \times T \quad \text{Eq : 1}$$

Avec :

i : est le nombre d'ions dissociés dans le cas d'un électrolyte

C : la concentration en sels en mol/m³

R : la constante des gaz parfaits $R = 8,314 \text{ J/mol.K}$

T : la température absolue de la solution en Kelvin. [15]

B. Les membranes d'osmose inverse

❖ Définition de la membrane

Une membrane est une barrière de quelques centaines de nanomètres à quelque millimètres d'épaisseur, sélective, quo us l'effet d'une force de transfert, permettant l'arrêt ou le passage sélectif de substances, dissoutes ou non, sous l'action d'une force motrice de transfert. [16].

Les critères de séparation des particules, des modules et/ ou des ions peuvent être :

- La nature chimique
- La dimension et la forme
- L'état physique
- La charge électrique

❖ Mécanisme de transfert

En osmose inverse les transferts de solvant et de soluté se font par solubilisation/diffusion. Toutes les espèces moléculaires (solvant et soluté) se dissolvent à travers la membrane et diffusent à l'intérieur de celle ci comme dans un liquide sous l'action d'un gradient de concentration et de pression. Le transfert ne dépend plus de la dimension des particules mais de leur solubilité dans le milieu membranaire. Les séparations sont donc d'origine chimique et sont liées au pouvoir solvant de la membrane. [14].

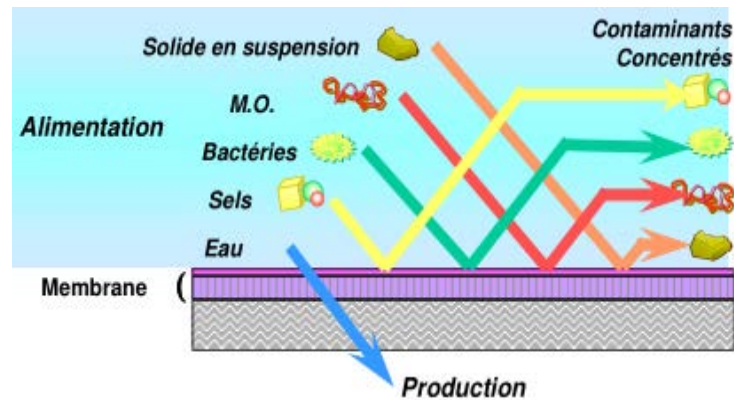


Figure 2 .5: Mécanisme de transfère de matière.

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

Deux paramètres sont pris en compte:

- ✓ **le taux de conversion** : c'est-à-dire la fraction du débit de liquide qui traverse la membrane, rapport entre le débit produit et le débit d'alimentation se définit par

$$Y = \frac{Q_p}{Q_D} \times 100 \quad \text{Eq : 2.2}$$

- ✓ **la sélectivité** : de la membrane définie par le taux de rejet R (ou taux de rétention) de l'espèce que la membrane peut retenir.

$$R = \frac{C_0 - C_p}{C_0} = 1 - \frac{C_p}{C_0} \quad \text{Eq : 2.3}$$

Avec C_0 = concentration de l'espèce à retenir dans la solution

et C_p = concentration de la même espèce dans le perméat

D. Les Modules d'osmose inverse

❖ Module spirale

Au sein de module spirale, une membrane plane est enroulée sur elle-même autour d'un tube poreux qui recueille le filtrat. On obtient ainsi un cylindre multi-couches où le perméat s'écoule selon un chemin spiralé vers le tube poreux tandis que l'alimentation circule axialement dans les canaux [17].

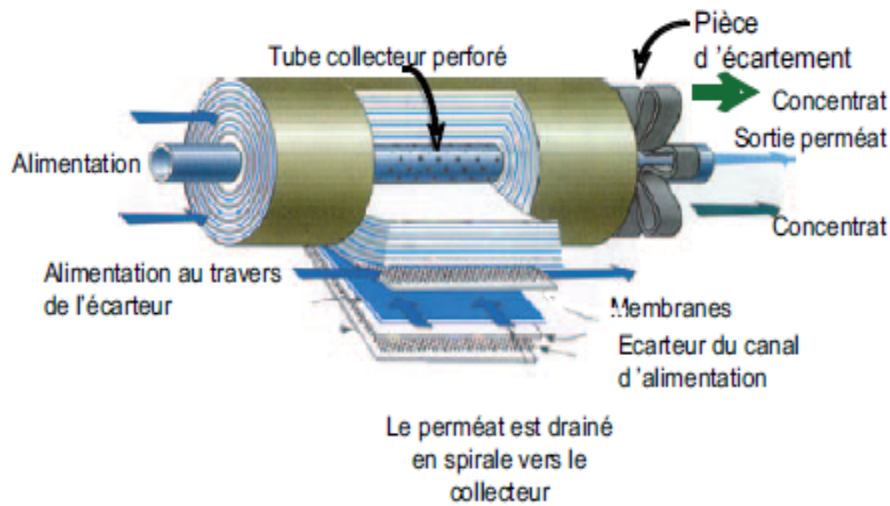


Figure 2.6 : Structure interne d'une membrane à spirale

❖ Les avantages et inconvénients des modules spirales :

Tableau 2.1: Avantages et inconvénients des modules spirales [14]

Avantages	Inconvénients
Compacité élevée	Sensible au colmatage
Faible volume mort	Difficulté de nettoyage
Coût d'investissement relativement faible	

E. Les avantages et les inconvénients de l'osmose inverse [18]

Les avantages :

- ✓ Obtention d'une eau très pure après osmose inverse ;
- ✓ L'eau osmose est antioxydant, alors que l'eau en bouteille est plus oxydée du fait du délai souvent trop long entre la mise en bouteille et la consommation ;
- ✓ Le pH légèrement acide de 6,6, idéal pour la digestion, l'assimilation des aliments ;
- ✓ Le procédé d'OI ne demande pour sa mise en marche ou son arrêt que quelques secondes ;
- ✓ L'osmose inverse peut être schématisée par une pompe à haut pression et un ou plusieurs modules (simplicité de représentation) ;
- ✓ Faible consommation d'énergie, comparée à d'autres procédés.

Les inconvénients :

- ✓ Nécessité d'un prétraitement de l'eau brute ;
- ✓ Le remplacement des membranes d'OI représente 5% du coût du traitement ;
- ✓ La séparation membranaire possède un talon d'Achille c'est le « le colmatage » qui est responsable dans trois quart des cas du vieillissement de la membrane ;
- ✓ La capacité unitaire d'un module d'OI ne dépasse pas 20 m³/j d'eau douce à partir de l'eau de mer, et donc une installation de grande capacité sera constituée de plusieurs modules, ce qui entraîne une complexité de l'installation et un coût élevé.
- ✓ Impact négatif du rejet de la saumure sur l'environnement.

2.3. Les problèmes techniques rencontrés dans le dessalement

Les principaux problèmes rencontrés dans le dessalement de l'eau de mer sont [9]:

2.3.1. Colmatage

Du fait de leur très faible seuil de rétention et de leur charge de surface, les membranes d'osmose inverse sont très sensibles au colmatage par une combinaison de matières colloïdales, organiques et biologiques.

Le colmatage peut être également provoqué par l'injection de produits de prétraitements non compatibles avec les membranes. Ainsi du fait de la charge négative (–) des membranes il ne peut être utilisé des produits cationiques (+). Cela provoquerait, par attirance des charges de signes opposés, la formation d'un gel entraînant un colmatage des membranes pouvant être irréversible.

Si la surface membranaire mise en œuvre n'a pas été convenablement dimensionnée et que la densité du flux est trop importante, les membranes auront tendance à se colmater rapidement, ce qui implique :

- ✓ des nettoyages chimiques fréquents, et/ou ;
- ✓ d'améliorer la qualité de l'eau prétraitée, et/ou ;
- ✓ rajouter des éléments.

2.3.2. Entartrage

L'entartrage des membranes est dû à la précipitation de certains sels dissous si leur produit de solubilité a été dépassé. Ce phénomène peut avoir lieu dans la zone alimentation/concentration où la teneur en sels dissous va augmenter au fur et à mesure de la traversée des éléments successifs logés dans le corps de pression, augmentation due à la perméation d'une partie de l'eau.

2.3.3. Dégradation La dégradation de la structure membranaire peut être provoquée par la présence de résiduels d'oxydants ayant servis au prétraitement de l'eau d'alimentation.

2.3.4. La corrosion Dans l'ensemble, les cas de corrosion les plus courants sont dus à :

- ✓ Une présence excessive en sels minéraux (chlorures, sulfates) ;
- ✓ Un pH inférieur au pH de saturation (pHs) ;
- ✓ Une saturation en oxygène dissous.

2.4. Nettoyage des membranes

Le choix des solutions de nettoyage dépend, d'une part, de la nature des dépôts qui sont à l'origine du colmatage et d'autre part, de la nature des membranes : il faut en effet dissoudre des dépôts sans détériorer ces dernières. 16

- On comprend dans ces conditions que chaque fournisseur de membrane préconise pour chaque cas une solution de nettoyage fonction de la nature de la membrane et de la nature du dépôt.
- Quand les membranes sont encrassées une pression plus élevée est nécessaire pour maintenir les flux (capacité).
- Pour éviter un encrassement irréversible les fabricants des membranes recommandent de nettoyer chimiquement les membranes quand la pression augmente de 10-15%

❖ Nettoyage par contre pression

Cette procédure appelée en anglais « back flushing » consiste à employer une pression dirigée du circuit de perméat vers le circuit de concentrât. Un volume contrôlé de perméat traverse la membrane en sens inverse et, dans de nombreux cas, élimine une partie des dépôts, l'efficacité de ce nettoyage dépend beaucoup d'une part de type de dépôt, et d'autre part de la fréquence et de l'amplitude des impulsions de la pression appliquée à contre-courant.

❖ Les produits chimiques utilisés pour le nettoyage des membranes :

- Acide citrique pour éliminer le fer
- Soude caustique avec EDTA (pH=10, non acétate cellulose) pour éliminer la matière organique et le biofouling.
- Produits Commerciaux (détergents) [14].

CHAPITRE 3

**DESCRIPTION ET
FONCTIONNEMENT DE L'USINE DE
DESSALEMENT FOUKA**

3.1. Présentation de l'organisme d'accueil Myah Tipaza

La Station de Dessalement d'Eau de Mer de Fouka est l'une des 13 projets décidés par le Gouvernement Algérien au début des années 2000 qui faisait suite à 20 ans de sécheresse. Sur décision du Conseil Interministériel du 12 Octobre 2003, L'Algérie opte pour le Dessalement d'Eau de Mer. Un grand programme est lancé et la société Algerian Energy Company (AEC, crée en 2001) est chargée de sa mise en œuvre. L'Algérienne des eaux et la Sonatrach, deux sociétés détenues à 100% par le gouvernement algérien, achèteront la totalité de la production d'eau de l'usine pour une durée de 25 ans.

AEC lance un Appel d'Offre international dans le cadre d'un BOO (Build Own Operate) afin de sélectionner une Entreprise ayant les compétences, dans le cadre d'une Société de Projet créée à cet effet, pour concevoir, réaliser, posséder, exploiter, maintenir et commercialiser l'eau produite, à savoir 120.000 m³/jour d'eau potable destinée à l'Ouest de la Wilaya d'Alger et l'Est de la Wilaya de Tipaza.

Le marché est remporté en 2005 par le Groupement SNC Lavalin, Société d'ingénierie et de construction canadienne présente depuis 20 ans en Algérie, et Acciona Agua, Société espagnole spécialiste dans le Dessalement d'Eau de Mer.

L'Usine de Dessalement d'Eau de Mer de Fouka est gérée par – MYAH TIPAZA SPA créée en 2007. Les travaux de construction de l'Usine ont commencé en Avril 2008.

L'usine est mise en service en Juillet 2011.

Cette station de dessalement de l'eau de mer de Fouka a coûté la bagatelle de 900 millions de DA dont 24 millions en euros. Pour rappel, une dizaine d'autres stations sont en cours de réalisation au niveau national [21].

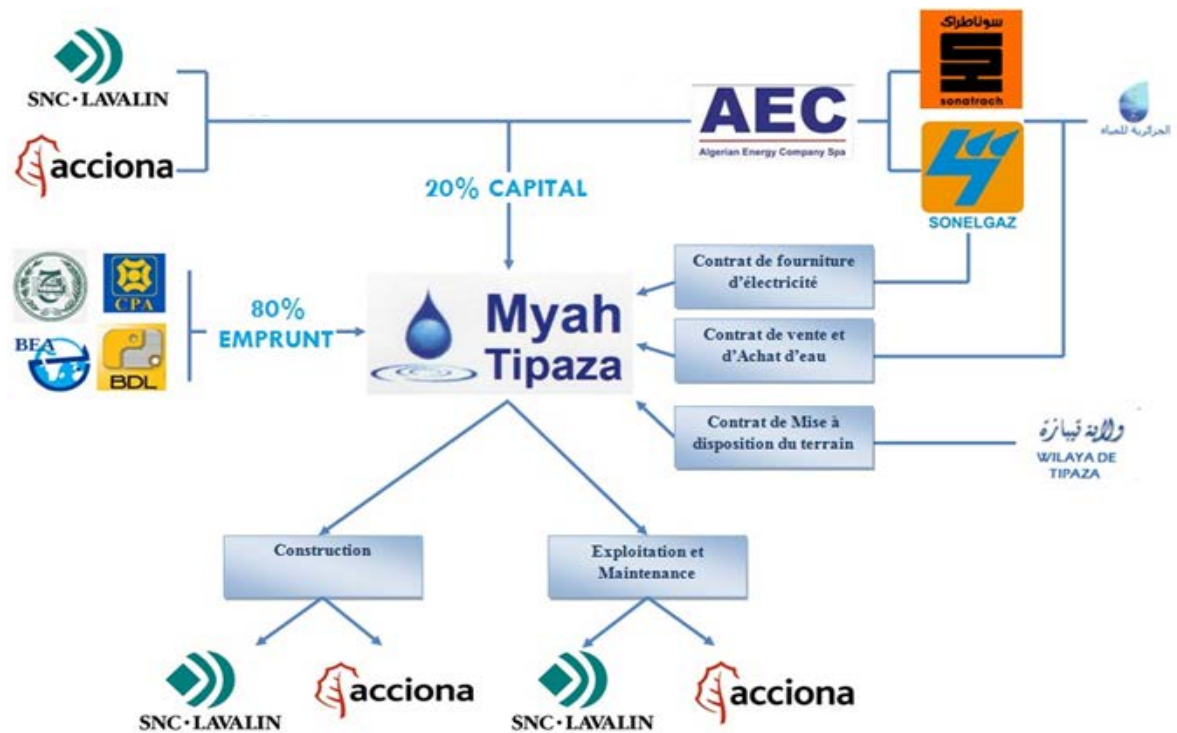


Figure 3.1 :l'organigramme de l'usine de FOUKA [19].

3.1.1 Situation géographique de l'usine de dessalement

Le site de l'usine de dessalement d'eau de mer de Fouka est localisé dans la wilaya de TIPAZA, Daïra de FOUKA, Commune de FOUKA à la sortie de la ville de Douaouda marine et à l'entrée de Fouka.

Situer à 20 km du chef lieu de wilaya et à environ 35 km à l'Ouest d'Alger, elle est sillonnée par la Route Nationale RN°11 en provenance d'Alger et en direction de Chlef et elle est relié à Koléa par le chemin de wilaya N°110 et à Bou-Ismaïl par le chemin de wilaya N°126

La commune de Fouka s'étend sur une superficie de 1273 Ha et se situe au Nord- Est de la ville de Tipaza. Elle est limitée :

- ✓ Au Nord : Par la mer Méditerranée ;
- ✓ Au Sud : Par la commune de Koléa ;
- ✓ A l'Est : Par la commune de Douaouda ;
- ✓ A l'Ouest : Par la commune de Bou Ismaïl ;

3.2. Installation de l'usine de dessalement fouka

La figure III.3 présente une vue sommaire de l'usine de dessalement, les unités de dessalement sont comme suit : [20]

- 1- Tour de captage ;
- 2- Traitement chimique ;
- 3- Bâtiment de captage ;
- 4- Filtre à anthracite et sable ;
- 5- Filtre à cartouche,
- 6- Bâtiment d'osmose inverse;
- 7- Usine de CO2 ;
- 8- Saturateur de chaux ;
- 9- Réservoir d'eau produite ;
- 10- Bâtiment de pompage d'eau produite ;
- 11- Sous-station électrique ;
- 12- Station de pompage SEAAL.



Figure 3.2: Description générale de la station de Fouka[21].

3.3. Description détaillée de l'usine

L'usine de dessalement offre une superficie de 4 hectares, et présente une longueur de 300 m et une largeur variant de 70-150 m. Signalons aussi que l'Oued Mazafran se situe à environ 4 km du côté Est du site de la station de dessalement.

La capacité de la station de traitement est de 120 000 m³/jour ou la production est étalée sur une période de 24 h/jour soit 5 000 m³/heure [20].

3.3.1. Une prise d'eau de mer :

L'eau de mer arrive gravitairement via une conduite d'une longueur de 1100 m de la prise d'eau située à la courbe bathymétrique de 13 m. Les deux têtes de prises d'eau sont installés au profondeur 8 à 10 m et distance de 845 à 950 m afin de pouvoir chercher une eau de bonne qualité (sans algues, ou d'autre polluantes). les prises sont construites en acier noir [20].

A. Tours de captage d'eau

Une chloration choc est prévue à l'intérieur des têtes de prises d'eau. Il n'est cependant pas réaliste de considérer que les grilles, compte tenu de leur surface, seront exposées à des concentrations assez élevées de chlore pour empêcher la prolifération biologique. La chloration choc aura cependant un effet positif pour limiter la prolifération des organismes à l'intérieur des conduites.

Le dosage d'acide sulfurique à l'intérieur des têtes de prise sera prévu pour augmenter l'effet bactéricide du hypochlorite et protéger plus efficacement les conduites jusqu'au puits d'eau de mer. Les prises d'eau sont munies de trappes d'accès permettant un accès aux conduites [20].



Figure 3.3: Tour de captage



Figure 3.4: Tête de prise d'eau [22].

B. .Conduites de prises d'eau

La conception est basée sur les principes suivants :

- ✓ Les conduites d'amenés épouse le fond marin ;
- ✓ Les conduites sont de DN 1600 et ont une longueur de 900 m et sont construits en PEHD.
- ✓ Les conduites d'adduction sont posées en pente constante à un niveau de radier croissant en direction de la berge afin d'éviter l'accumulation d'air ou de gaz (éviter le phénomène de cavitation);
- ✓ Des regards d'inspection sont prévus à tous les 300 m environ afin de permettre une inspection visuelle.

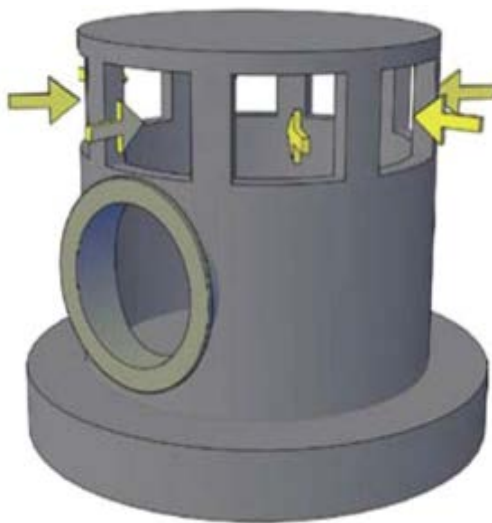


Figure 3.5: Conduite en PEHD

Figure 3.6: Émissaire submersible [22].

C. Station de pompage d'eau brute

La station de pompage d'eau brute sert à relever les eaux jusqu'aux filtres à sable. Trois (3) dégrilleurs verticaux sont à l'entrée de la station pour la protection des pompes.

-Des vannes murales permettront l'isolation du puits de pompage pour l'entretien.

-Des vannes d'isolement sont également prévues de chaque côté des dégrilleurs pour isoler chacun d'eux pour entretien. Les pompes de type horizontale verticalisée sont soigneusement choisies pour résister à la forte agressivité de l'eau de mer. La station de pompage est basé sur 6 + 1R pompes [20].

- **Critères de conception des dégrilleurs**

Trois (3) dégrilleurs verticaux sont prévus à l'entrée de la station pour la protection des pompes.

Épaisseur des barreaux (mm) 10

Espacement entre les barreaux (mm) 80

Vitesse à travers les barreaux (m/s) ≈ 0.1



Figure 3.7: Dégrilleur.

3.3.2. Post de prétraitement

Pré-chloration

Une pré-chloration est prévue à l'eau brute (soit au chlore gazeux ; où l'hypochlorite de calcium ; où l'hypochlorite de sodium), ce dernier est utilisé comme traitement choc de l'eau à l'entrée de la station pour limiter la formation de biofilm dans les conduites de la prise d'eau et les filtres.

Coagulant et polymère

Du Chlorure Ferrique (où sulfite ferrique) est ajouté à l'eau brute en amont des filtres pour agir en tant que coagulant et agglomérer les particules fines. Un coagulant à base de polymère pourra être injecté lorsque l'eau brute sera très turbide (ex : lors d'un orage).

Le métabisulfite de sodium où Bisulfite sodium

Pour éliminer le chlore résiduel où de l'oxydant lorsqu'il y a une pré-chloration à l'eau brute. Ces oxydants doivent être éliminés parce qu'ils peuvent détériorer de façon irréversible les membranes de polyamide aromatique.

L'acide sulfurique

Pour réduire le pH =7 de l'eau de mer avant son entrée aux filtres.

L'objectif de cette réduction est de :

- ✓ Garantir l'effet bactéricide du chlore
- ✓ Aider la performance du coagulant ;

- ✓ Éviter la précipitation de CaCO_3 à l'intérieur des membranes.

3.3.3. Filtres bicouches gravitaires

Les filtres sont opérés à un niveau et débit constant.

- Au niveau de la filtration gravitaire, il est opté pour l'installation des filtres bicouches.

Dans les filtres bicouches, la couche supérieure est faite d'un matériel épais et de faible densité (anthracite dans notre cas). C'est dans cette première couche que la majorité des particules est retenue. La couche inférieure inclut un matériel fin et plus épais, constituant un traitement d'affinage.

Les caractéristiques des filtres ouverts sont : [20]

■	Nombre d'unités en service :	18
■	Nombre d'unités en maturation ou lavage :	2
■	Type de filtre :	Filtre ouvert
■	Largeur:	5 m
■	Longitude:	15,5 m
■	Hauteur de couche :	1 000 mm
■	Surface de filtration:	77,5 m ²
■	Surface totale:	1 395 m ²
■	Temps de rétention sur couche pour coagulation:	15 min
■	Volume requis :	159 m ³
■	Hauteur d'eau :	2,1 m
■	Perte de charge minimale:	0,32 m
■	Perte de charge maximale admise:	2 m

A. Couche filtrante

- **Anthracite**

Hauteur de couche	400 mm
Taille effective	1,5 mm
Coefficient d'uniformité	1,3
Volume par filtre	31 m ³
Volume total	620 m ³
Densité apparente	0,74
Poids par filtre	23 t
Poids total	459 t

- **Sable de silex**

Hauteur de couche	600 mm
Taille effective	0,66 mm
Coefficient d'uniformité	1,57
Volume par filtre	47 m ³
Volume total	930 m ³
Densité apparente	1,50
Poids par filtre	70 t
Poids total	1 395 t

- **Gravier (ou membrane filtrante)**

Hauteur de couche	100 mm
Taille effective	2 mm
Coefficient d'uniformité	1,45
Volume de sable par filtre	8 m ³

Chapitre 3 Description et fonctionnement de l'usine FOUKA

Volume total	155 m ³
Poids de sable par filtre	12 t
Poids total	233 t

Les bassins de filtration ont été couverts avec des dalles en plastique afin d'éviter le développement des algues



Figure 3.8: Filtres gravitaires.

B. Lavage des filtres

Le lavage des filtres se fait automatiquement à l'air et à l'eau. Pour le lavage des filtres, un réservoir de saumure de 750 m³ est prévu. Ce réservoir a une capacité suffisante pour réaliser un lavage de filtres.

Le lavage des filtres se fait avec de la saumure. Le remplissage du réservoir de saumure se fait grâce à une conduite d'un diamètre de 1000 mm en GRP provenant du rejet des unités d'osmose.

Le lavage des filtres avec saumure est recommandé pour les raisons suivantes :

- La saumure est un sous-produit qui, dans ce cas, est réutilisée.
- Le lavage avec saumure permet une diminution des besoins en eau filtrée et donc une économie énergétique dans le pompage d'eau de mer.
- Le lavage avec saumure permet un choc osmotique aidant au contrôle de la croissance bactérienne.

Chapitre 3 Description et fonctionnement de l'usine FOUKA

Le réservoir d'eau filtrée a un volume de 950 m³, il est prévu pour stocker les eaux filtrées avant leur pompage vers les filtres à cartouches. Le réservoir est séparé en deux compartiments pour en permettre l'entretien [20].

3.3.4. Filtres à cartouches :

Afin de filtrer les petites particules pouvant s'échapper des filtres à sable et protéger ainsi les membranes contre un encrassement, des filtres à cartouches capables de filtrer des particules jusqu'à 5 microns sont installés en amont des unités d'osmose.

Lorsque la baisse de pression à travers les filtres à cartouches dépasse une valeur préétablie (environ 1,5 bars), la cartouche du filtre doit être remplacée. La fréquence de remplacement est estimée à environ 4 fois l'an.

Les caractéristiques des filtres à cartouches sont les suivantes :

◆ Nombre de vaisseaux	9 + 1R
◆ Nombre de filtres par vaisseau	360
◆ Nombre total de filtres	3 600
◆ Température de l'eau	15 – 27 °C
◆ Solides totaux en suspension	< 4 mg/l
◆ Niveau de filtration	5 µm Nominal
◆ Pression à l'entrée	4 bars
◆ Perte de charge	
✓ Minimum	0,5 bar
✓ Moyen	1,0 bar
✓ Maximum	1,5 bars
◆ Filtre	
✓ Diamètre du filtre	1 700 mm
✓ Longitude cylindrique	2 000 mm

Chapitre 3 Description et fonctionnement de l'usine FOUKA

✓ Pression de design	7 bars
✓ Composition des filtres	Ebonited Carbon Steel
✓ Débit par vaisseau	1 268 m ³ /h
◆ Cartouches	
✓ Type	Double open ended
✓ Longueur unitaire des cartouches	1 500 mm (6 cartouches)
✓ Diamètre par cartouche	63 mm
✓ Débit par cartouche	3,52 m ³ /h – 58,7 l/min
✓ Débit max. autorisé par cartouche	100 l/min
✓ Débit par 10" de cartouche	587 l/h
✓ Débit recommandé par 10" de cartouche	600 l/h/10"



Figure 3.9: L'unité des filtres à cartouches

Chapitre 3 Description et fonctionnement de l'usine FOUKA

Les paramètres suivants sont mesurés une dernière fois avant l'arrivée de l'eau aux membranes :

- ◆ Turbidité
- ◆ PH avec alarme de bas et haut niveaux
- ◆ Température avec alarme de bas et haut niveaux
- ◆ Potentiel redox avec alarme de bas et haut niveaux
- ◆ Chlore libre résiduel avec alarme de bas et haut niveaux
- ◆ Indice d'encrassement (SDI) (mesures manuelles périodiques)

3.3.5. Osmose inverse

Le système d'osmose inverse est conçu de façon modulaire. Il est composé de six (6) unités d'osmose inverse (OI) d'une capacité unitaire de 20 000 m³/jour chacune. Il n'y a pas d'unités en réserve. Il est possible de faire fonctionner l'usine afin de produire les gammes de débits journaliers suivantes :

Tableau 3.1: Capacité de la station

Nombre d'unité d'osmose inverse en service	Débit (m ³ /jour)	% du débit nominal
1	20 000	17 %
2	40 000	33 %
3	60 000	50 %
4	80 000	67 %
5	100 000	83 %
6	120 000	

A. Filières d'osmose inverse

Après le traitement, l'eau est pompée avec des pompes haute pression jusqu'aux modules d'osmose inverse. L'eau de mer à pression passe à travers les membranes, produisant deux courants à la sortie des membranes : l'eau osmotisée (perméat) et la saumure. Six (6) filières d'osmose à une (1) passe sont installées, chaque filière est constituée des tubes de membranes. Les filières d'osmose sont raccordées à un collecteur commun alimenté pour les six (6) pompes haute pression.

Les paramètres de conception adoptés pour les unités d'osmose inverse sont résumés ici

◆ Nombre de racks (unité) en opération	6
◆ Conversion	≈ 45 % Total
◆ Fluide	Eau de mer
◆ Température	15 à 27 °C
◆ Salinité	38 g/l
◆ Nombre de tubes par rack	216
◆ Membranes par tube	7
◆ Espace libre	10 %
◆ Nombre total de membranes	9 072
◆ Caractéristiques des membranes :	
✓ Configuration	Spiralée
✓ Matériel	Polyamide
✓ Matériel du tube	Fibre de verre et époxy
✓ Dimensions	Diamètre 8", Longueur 40"
✓ PH d'opération	2 – 11
✓ Température maximale d'opération	45°
✓ Débit de perméat	27,7 m3/jour
✓ Réjection de sel	99,7 %



Figure 3.10: Membrane (vue de l'intérieur).

B. Configuration du système d'osmose inverse et taux de récupération

La station d'osmose inverse nécessite seulement une (1) passe afin d'atteindre le taux de solides dissous requis. Le taux de récupération est estimé à 45 %.

La station d'osmose est dotée des équipements suivants :

- Six (6) pompes hautes pression, six (6) dispositifs de récupération d'énergie et six (6) pompes Booster;
- Six (6) trains d'osmose inverse 1ère passe;
- Un système de nettoyage et de flushing.

Dans les conditions nominales du fonctionnement, la production est assurée par les six (6) filières.



Figure 3.11: Filières d'osmose inverse.

C. Dimensionnement des pompes hautes pression :

Les pompes HP sont dimensionnées de façon à pouvoir fournir une pression de 67 bars requis par les membranes à 15 °C et pour une salinité de 38 g/l.

- **Pompe à haute pression**
 - ✓ Nombre d'unités en opération 6
 - ✓ Nombre d'unités en réserve 0
 - ✓ Variateur de vitesse NON
 - ✓ Fluide Eau de mer

- ✓ Densité 1 030 kg/m³
- ✓ Débit de pompe 860 m³/h
- ✓ Puissance du moteur adoptée 2000 kW



Figure 3.12: Pompe

D. Système de récupération d'énergie

La récupération d'énergie de saumure produite pendant le procédé d'osmose se fait grâce à des échangeurs de pression.

- **Système de récupération d'énergie :**
 - ✓ Numéro d'unités en service 6
 - ✓ Numéro d'unités en réserve 0



Figure 3.13: Système de récupération d'énergie.

3.3.6. Reminéralisation :

Chapitre 3 Description et fonctionnement de l'usine FOUKA

Le post-traitement est conçu pour rendre le perméat des unités d'osmose (une eau relativement agressive de faible salinité, de très faible dureté et d'alcalinité) moins agressif et plus approprié à la distribution dans le réseau municipal.

Le perméat d'osmose est traité (post-traitement) avant d'être distribué aux consommateurs.

L'usine de FOUKA est équipée de dispositifs de correction de la dureté et de l'alcalinité pour stabiliser la nature relativement agressive de l'eau dessalée produite et lui conférer un goût plus satisfaisant. Un dispositif additionnel de désinfection par chloration est également inclus pour prévenir tout risque de développements bactériens dans les réservoirs et les systèmes de distribution.

Le système de reminéralisation se fait avec :

- ✓ La chaux (CaOH_2) (figure 3.14)
- ✓ Le CO_2 (figure 3.15)



Figure 3.14: Silos de la chaux.



Figure 3.15: CO_2 fabriqué sur site.

Chapitre 3 Description et fonctionnement de l'usine FOUKA

Une désinfection est réalisée avant distribution, un chlore résiduel de 0,5 mg/l est prévu au point de livraison.

3.3.7. Station de pompage d'eau traitée Le système de stockage d'eau est constitué d'un bac de stockage d'une capacité de 3 600 m³ en béton armé.

- La station de pompage d'eau traitée permet de refouler l'eau commerciale jusqu'au point de livraison.

- Les six pompes (6 +1R) de la station de pompage fonctionnent avec un débit fixe et/ou variable afin de garantir les fluctuations de débit et de pression.

Le tableau 3.2 résume les caractéristiques des pompes.

Tableau 3.2: Résumé des caractéristiques des pompes.

Description	Ligne 1
Nombre de pompes	6 + 1
Débit des pompes (m ³ /h)	833,3
Pression des pompes (bars)	24
Puissance électrique moteur (kW)	750 kW



Figure 3.16: Station de pompage d'eau traitée.

CHAPITRE 4

COLMATAGE DES MEMBRANES D'OSMOSE INVERSE

INTRODUCTION

Un inconvénient majeur de l'application d'une membrane à osmose inverse (OI) dans le dessalement de l'eau de mer est la sensibilité de la membrane à l'encrassement. En effet, l'encrassement entraînera des coûts de fonctionnement plus élevés tels qu'une demande d'énergie plus élevée, une fréquence de nettoyage accrue et une durée de vie réduite des éléments de membrane. L'encrassement des membranes RO peut être classé selon le type de encrassement : Encrassement particulaire / colloïdal, bio-encrassement, encrassement organique et inorganique (entartrage).

Les encrassements particuliers / colloïdaux comprennent principalement des solides en suspension et certains hydroxydes à base de métaux qui peuvent s'accumuler à la surface de la membrane en temps voulu et former un encrassement du gâteau. Les micro-organismes tels que les bactéries, les champignons ou les algues peuvent sécréter des polymères qui s'ancrent à la surface de la membrane, ce qui favorise la croissance du biofilm.

Les composés organiques constitués de substances humiques, de polysaccharides et de composés aromatiques peuvent provoquer un encrassement par adsorption. L'encrassement ou l'entartrage inorganique est causé par le dépassement de la solubilité de sels spécifiques. Ce type d'encrassement peut être contrôlé en ajustant le pH et en ajoutant des anti-détartrants. [23]

4.2. Détermination du caractère colmatant

Pour réduire au minimum le colmatage rencontré dans l'unité de filtration et son impact, la détermination du caractère colmatant de l'alimentation est une question importante. Pour caractériser le colmatage des membranes, plusieurs indices ont été proposés tel que le SDI (Silt Density Index) ou le MFI (Modified Fouling Index). Dans un premier temps, un bref aperçu sur le principe fondamental de ces indices est présenté. [24]

A. Définition du SDI

L'ASTM (American Society for Testing and Materials) introduit l'indice SDI comme test standard pour déterminer le potentiel du colmatage induit par des particules. Il dépend de la quantité de particules présentes dans un liquide mais également des

Chapitre 4 Colmatage des membranes d'osmose inverse

autres composants colloïdaux. Un essai de SDI consiste en une filtration d'un liquide à travers une membrane de 0,45 µm de diamètre de pores (microfiltration) et de surface filtrante de 1,73.10⁻⁴ m² (équivalent au diamètre de membrane de 47 mm) à une pression transmembranaire constante de 2,07 bar (30 PSI). L'indice SDI est exprimé en [%/minute] et calculé par:

$$SDI_{t_f} = \frac{100}{t_f} \left(1 - \frac{t_1}{t_2}\right) \text{ Eq. 4-1}$$

Avec :

t_1 Temps nécessaire pour filtrer 500 mL de l'échantillon à $t_f = 0$

t_2 Temps nécessaire pour filtrer 500 mL de l'échantillon à t_f

Pour de l'eau très colmatante : $t_2 \gg t_1$ donc $SDI_{t_f} = \frac{100}{t_f}$

$$t_f = 15\text{min} \quad \rightarrow \quad SDI_{15} < 6.67$$

$$t_f = 10\text{min} \quad \rightarrow \quad SDI_{10} < 6.67$$

$$t_f = 5\text{min} \quad \rightarrow \quad SDI_5 < 6.67$$

Si $(1 - t_1/t_2)$ excède 75%, la mesure de SDI doit être effectuée toutes les 10 voire 5 minutes (au lieu de toutes les 15 minutes) afin d'éviter un colmatage important et un flux trop faible.

❖ Dispositif destiné à la mesure du SDI

La configuration du dispositif de mesure du SDI se compose d'un réservoir d'alimentation, d'une pompe qui pourrait traiter refouler jusqu'à 400 kPa. La conductivité d'alimentation est mesurée par un capteur connecté au réservoir d'alimentation (dans la gamme de 10 µS/cm à 20 mS/cm). La pression appliquée est mesurée à l'aide d'un capteur (gamme : 0-10 bar). En outre, le débit est mesuré continuellement en utilisant un débitmètre (de 0,06 à 300 L/min).

L'appareil assemblé est montré schématiquement sur la Figure 3. Le SDI est calculé selon l'Eq. 2-1.

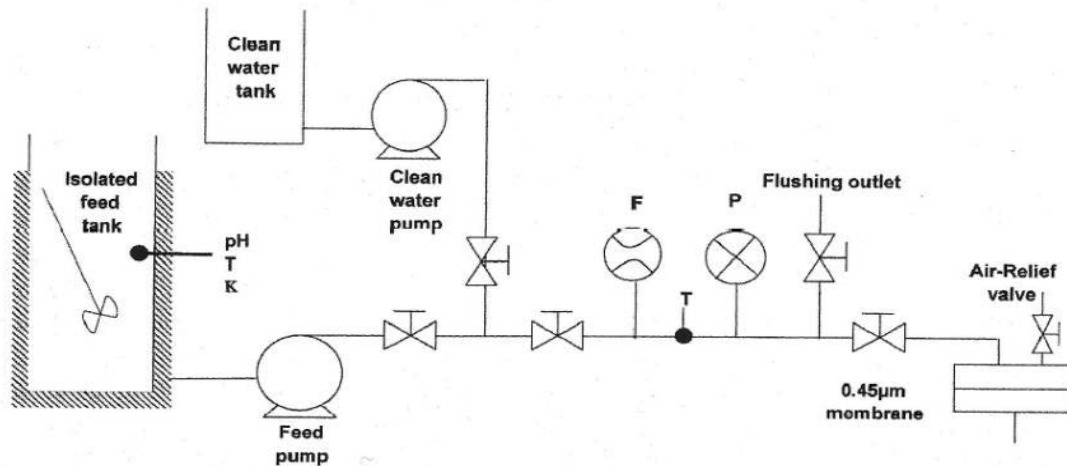


Figure 4.1 : Schéma de l'installation de SDI. Notation des capteurs : Température (T), Conductivité (K), Pression (P) et Débit (F)

Il faut noter que la mesure étant réalisée avec une membrane de taille de pore fixée, l'information qu'elle délivre n'est pas directement transposable à un système employant une membrane d'un autre type (tailles de pores plus élevée ou plus faible, pour ne prendre que cet exemple). Toutefois, malgré toutes les limites posées par ce test, il est encore utilisé en routine par des traiteurs d'eau pour des buts divers tels que la comparaison de différentes méthodes de prétraitement, la conception de nouvelles usines de dessalement et le contrôle de performance.

Des améliorations sont indispensables pour rendre cet indice de colmatage plus représentatif de la variété des situations rencontrées (fluides, géométries, types de membranes, hydrodynamique, etc.). Des tentatives ont été proposées pour adapter le SDI à un panel de membranes plus large que les membranes de microfiltration. Néanmoins, ce type d'approche ne prend pas en compte les phénomènes physiques à l'origine du colmatage et est limité par les conditions standards dans lesquelles sont réalisées les mesures, et notamment le diamètre de pore des membranes. Ce test n'est pas encore satisfaisant [24].

B. Modified Fouling Index (MFI)

❖ Modèle d'Hermia

Des chercheurs ont tenté, depuis le début des années 80, de développer d'autres méthodes de quantification du colmatage à partir de modèles physiques. Les plus communément utilisés de ces modèles sont les Modèles dits de « Hermia », même si ce

Chapitre 4 Colmatage des membranes d'osmose inverse

ne sont pas les plus pertinents dans le domaine des membranes car ils ont été développés pour la filtration traditionnelle.

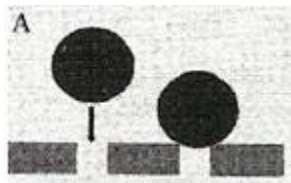
La forme caractéristique du modèle d'Hermia [2] est :

$$\frac{d^2t}{dV^2} = K\left(\frac{dt}{dV}\right)^n \quad \text{Eq. 2-2}$$

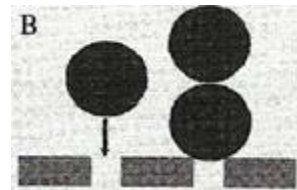
Où t [seconde] et V [m³] signifient le temps de filtration et le volume cumulé du perméat, respectivement. Ils sont obtenus à partir des expériences de filtration à pression constante. k et n définissent deux paramètres du modèle : le paramètre n (un nombre sans dimension) est lié au mécanisme du colmatage et présenté dans le Tableau qui est figuré dans l'annexe 2.

La matière qui se dépose à la surface de la membrane peut participer à un colmatage selon différents types de mécanismes amenant à différentes lois de colmatage basées sur les hypothèses suivantes, que l'on a pris l'habitude de répartir en catégories, à partir des travaux de Hermia :

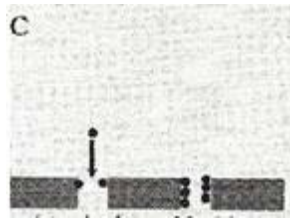
- **Blocage complet** : toutes les particules arrivant à la surface de membrane participent au blocage complet des pores. L'aire obstruée est proportionnelle au volume filtré,
- **Blocage intermédiaire** : une partie des particules arrivant à la surface de membrane contribue au blocage des pores,
- **Blocage standard** : des particules se déposent sur la paroi interne des pores. La section de passage des pores diminue proportionnellement au volume filtré,
- **Filtration sur gâteau** : les particules accumulées constituent un gâteau qui contribue à créer une résistance au transfert additionnelle.



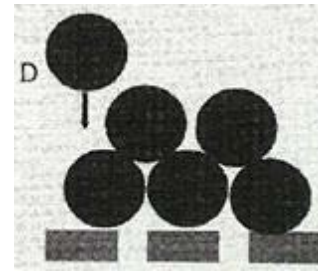
Blocage complet



Blocage intermédiaire



Blocage standard



Filtration sur gâteau

Figure 4.2: Quatre types des mécanismes du colmatage proposés par Hermia

Pour la filtration sur gâteau, $n = 0$ est appliqué dans l'Eq. 2-2. L'intégration de l'équation est :

$$\frac{dt}{dV} = B V \quad \text{Eq. 2-3}$$

Le paramètre k trouvé dans l'Eq. 2-2 est substitué par b . Indice du colmatage b basé sur le modèle d'Hermia est proposé en supposant que la filtration sur gâteau est le mécanisme dominant du colmatage rencontré dans l'application de filtration membranaire.

Une limitation importante du modèle développé par Hermia, c'est qu'il n'est valable que pour des systèmes à pression constante. dt/dV est utilisé comme paramètre de base pour évaluer le taux de colmatage. Au contraire, des usines à grande échelle sont conçues et opérées à flux imposé. Dans ce cas, dt/dV du côté gauche de l'Eq. 2-3 est une constante équivalente à l'inverse du débit, tandis que le terme V présentant le volume cumulé de perméat sur le côté droit augmente avec le temps de filtration. Par conséquent, l'indice de colmatage b exprimé dans l'Eq. 2-3 ne peut plus être un paramètre constant.

❖ Définition du Modified Fouling Index (MFI) :

Devant les incertitudes liées à l'usage du SDI commentées précédemment, des efforts ont été déployés pour mieux caractériser le caractère colmatant d'un fluide, notamment avec le développement de la filtration membranaire, et le besoin de prendre en compte la rétention de colloïdes, protéines, matière organique, qui dépassent la définition du « Silt » (limon alluvionnaire) et de mieux décrire physiquement les mécanismes pris en compte. Le « Fouling Index » ou indice de colmatage, est destiné à caractériser la résistance hydraulique du gâteau formé sur un filtre selon le modèle de la filtration sur gâteau qui apparaît dans la classification de Hermia. Par rapport au SDI, il

distingue donc les mécanismes initiaux de colmatage internes du filtre (de la membrane) du mécanisme ultérieur qui arrive en régime établi en second lieu.

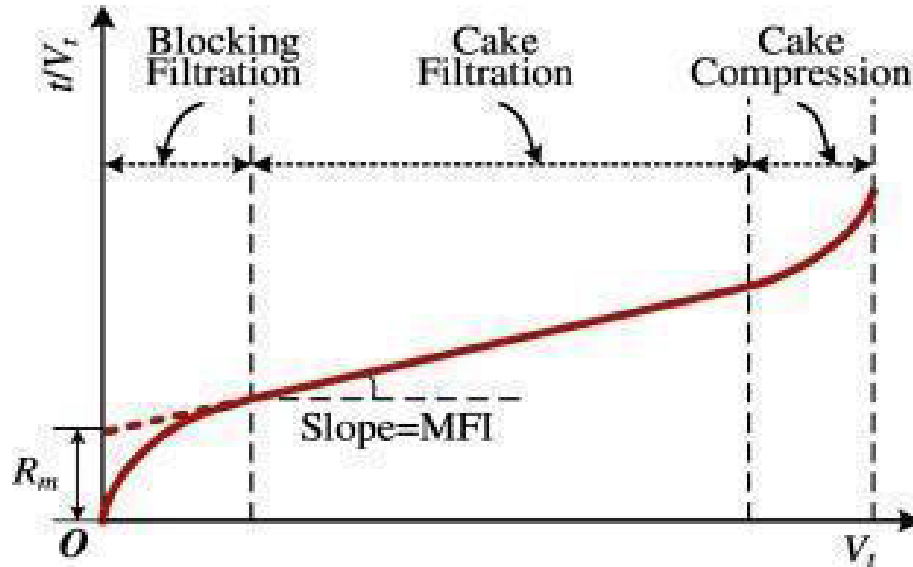


Figure 4.3 : Courbe de filtration t/V en fonction de V . (Li et al, 2017).

Le calcul du MFI inclut la correction de température et il a une relation linéaire avec les particules colloïdales.

L'indice de colmatage (ou Fouling Index FI) caractérise la formation des dépôts sur la surface de membrane. Il est proportionnel à la concentration des matières colloïdales et particulaires présentes dans l'alimentation. Les dépôts formés ajoutent la résistance supplémentaire (R_c) à la résistance de la membrane (R_m).

$$\frac{dv}{A dt} = \frac{\Delta p}{\eta(R_m + R)} \quad \text{Eq. 4.4}$$

Où V , t , ΔP , η et A représentent respectivement le volume du filtrat, le temps de filtration, la pression transmembranaire appliquée, la viscosité dynamique de l'eau et la surface de la membrane. La résistance des dépôts, en supposant que la rétention des particules est constante, est proportionnelle à la quantité de dépôts déposés sur la membrane et à l'indice de colmatage I .

$$R = \frac{V}{A} I \quad \text{Eq. 4-5}$$

L'indice de colmatage d'un milieu donné, I caractérise donc la résistance hydraulique créée lorsque l'on filtre un volume V de fluide contenant ce milieu sur une membrane de

Chapitre 4 Colmatage des membranes d'osmose inverse

surface A. En combinant les équations **Eq. 4-4** et **Eq. 4-5**, suivies par l'intégration à pression constante, on obtient l'équation de filtration bien connue:

$$\frac{t}{V} = \frac{\eta R_m}{A \Delta P} + \frac{\eta T}{A^2 2 \Delta P} \quad \text{Eq. 4-6}$$

Dans la pratique, on manipule préférentiellement le « Modified Fouling Index » MFI, qui est défini comme la pente de la partie linéaire de la courbe $t/V = f(V)$. Dans un but de standardisation des mesures, les traiteurs d'eau ont convenu de le déterminer dans des conditions de référence : ΔP_0 (2 bar), η_0 ($\eta_{20^\circ\text{C}}$) et $A_0 = 1,38 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ (en utilisant une membrane de microfiltration de diamètre de pore nominal de $0,45 \mu\text{m}$). Si on souhaite détailler un peu plus la signification de l'indice de colmatage, on peut faire l'hypothèse qu'il est le produit de la résistance spécifique des dépôts déposés (α) et de la concentration des particules présentes dans l'alimentation (C_f) :

$$I = \alpha C_f \quad \text{Eq. 4-7}$$

Si de plus on suppose que le milieu considéré respecte les hypothèses de Kozeny-Carman, la résistance spécifique peut être liée à la porosité des dépôts (ε), à la densité (ρ_p) et à la surface spécifique (A_s) des particules formant des dépôts.

$$\alpha = \frac{5 \eta}{\rho_p} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} A_s^2 \quad \text{Eq. 4 - 8}$$

En combinant les Eq. 4-7 et Eq 4-8 et en les remplaçant ensuite dans l'Eq. 4-6, on obtient finalement:

$$MEF = \frac{5 \eta}{2 \rho_p} \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{C_f A_s^2}{A^2 \Delta P} \quad \text{Eq. 4 - 9}$$

Il faut noter que le MFI peut également être défini pour des dépôts compressibles. On introduit un terme représentant la pression transmembranaire affecté d'un exposant qui permet de prendre en compte la compressibilité du dépôt de filtration. L'indice de colmatage I prenant en compte la compression des dépôts est défini comme :

$$I = \alpha C_f \Delta P_c^\omega \quad \text{Eq. 4-10}$$

Où ω est le coefficient de compressibilité et α_0 est une constante. Pour les dépôts incompressibles, ω est égal à zéro. Pour des dépôts compressibles, ω doit être déterminé par une expérimentation soignée. L'indice de colmatage est empirique et ne permet

Chapitre 4 Colmatage des membranes d'osmose inverse

pas de prévoir a priori les paramètres de procédés ni les fréquences de nettoyage des membranes par exemple. Il est utilisé pour estimer le potentiel du colmatage causé par des matières organiques ou inorganiques en suspension et colloïdales. Les bio polymères (de faible poids moléculaire) qui amènent au bio colmatage ne sont pas retenus par la membrane de microfiltration, par conséquent le potentiel de bio colmatage ne peut pas être estimé par le test du MFI.

Le MFI représente physiquement la résistance d'une unité de masse du dépôt par unité de surface de membrane filtrante. Théoriquement, plus le dépôt formé est dense avec des espaces faibles entre les particules, plus cela sera difficile pour le fluide de traverser et donc plus le MFI sera grand. Cet indice de colmatage est basé sur la formation du dépôt à pression constante.

Dans la pratique, le MFI est un moyen pour caractériser les étapes du prétraitement des eaux et pour comprendre comment fonctionne un système. L'eau qui sort du bioréacteur, par exemple, est une eau qui est assez chargée. Donc, elle va avoir un MFI très élevé. Après ultrafiltration, le MFI sera beaucoup plus faible. Donc en fait, cet indice de colmatage permet de caractériser les eaux aux différents endroits du procédé.

Le MFI caractérise le caractère colmatant des fluides, donne des indications utiles, mais sa signification n'est pas absolue, car la résistance du dépôt peut dépendre des conditions opératoires. [24]

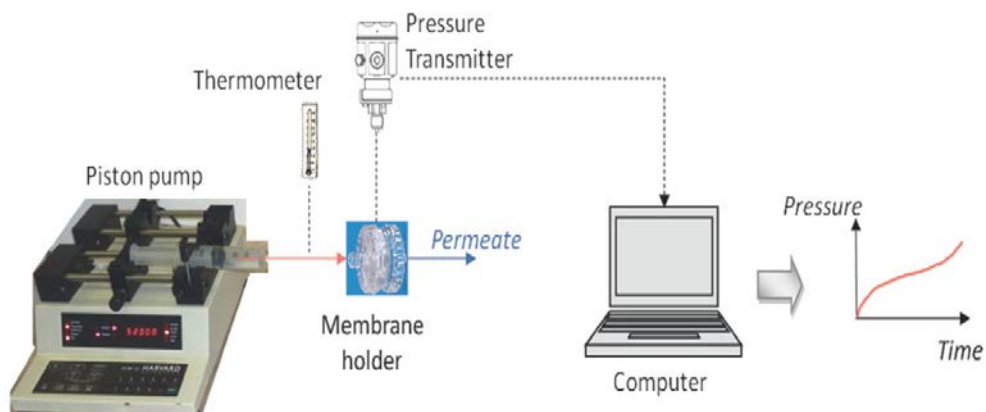


Figure 4.4 : Installation de filtration pour mesurer MF-UF à flux constant [25]

C. Relation entre SDI et MFI

Un modèle mathématique décrivant la relation entre SDI et MFI a été développé: [24]

$$SDI = \frac{100}{t_{f(\min)}} \left(1 - \frac{\eta R_m + MFI V_c A \Delta P}{MFI V_c A \Delta P + \sqrt{\eta^2 R_m^2 + MFI 4d P^2 A^2 t_f}} \right)$$

MFI MFI mesuré [s/m⁶]

V_c Volume des premiers et deuxièmes échantillons V_c = V₁ = V₂ [m³]

A Surface de la membrane [m²]

t_f Temps de filtration, généralement 15 minutes (900 s)

ΔP Pression appliquée [Pa]

η Viscosité dynamique de l'eau [Pa.s]

D. Les avantages et inconvénients entre SDI ET MFI

La différence la plus importante entre le SDI et le MFI serait leur relation avec la particule colloïdale présente dans l'alimentation. Cette différence a été illustrée dans l'expérience avec la formazine.

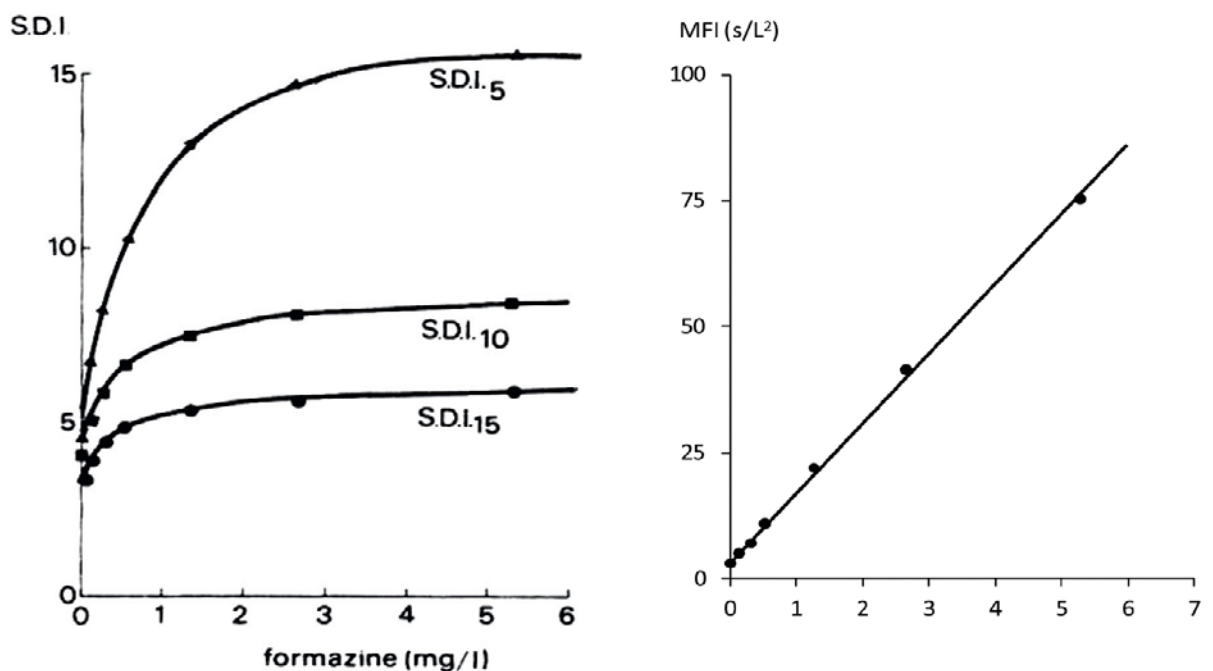


Figure 4.5 : Expérience de formazine sur SDI et MFI [26].

Chapitre 4 Colmatage des membranes d'osmose inverse

À partir de la figure, on peut voir que les valeurs MFI augmentent linéairement lorsque la concentration de formazine dans l'alimentation a été ajoutée, tandis que les valeurs SDI ne sont pas liées à la concentration. Contrairement à SDI, MFI n'a pas de limites de valeur et de limites (maximum et minimum). Cela rend difficile la comparaison des valeurs de la large plage en termes de potentiel d'encrassement et l'examen du risque d'encrassement réel.

Le tableau 1 présente un résumé des différences entre les deux indices exprimées en désavantages et avantages.

Tableau 4.1. Différences avantages et inconvénients courants de l'SDI et de l'MFI [28].

	Avantages	Inconvénients
SDI	<ul style="list-style-type: none"> - Procédure simple - Normalisé 	<ul style="list-style-type: none"> -N'a pas de corrélation avec la concentration violente. -Ne repose pas sur la théorie de la filtration
MFI	<ul style="list-style-type: none"> - Comparaison facile - D'après la théorie de la filtration - Correction des paramètres de l'eau - Gamme plus large de valeurs - Relation linéaire avec la faute 	<ul style="list-style-type: none"> - Aucune correction de la température - Plus complexe et plus cher - Difficile à comparer - La valeur dépend uniquement de la méthode de l'opérateur - Indépendant de la pression
SDI et MFI		<ul style="list-style-type: none"> - Ne reflète pas le processus d'osmose inverse - Opération sans issue - Inexactitude, problème de précision - Ne convient pas aux échantillons hautement concentrés.

Chapitre 4 Colmatage des membranes d'osmose inverse

L'imprécision et la précision des valeurs étaient des problèmes constants de ces indices, ainsi tout au long de l'histoire de sa mise en œuvre, MFI, qui est la dérivation de SDI, a été continuellement ajustée et améliorée.

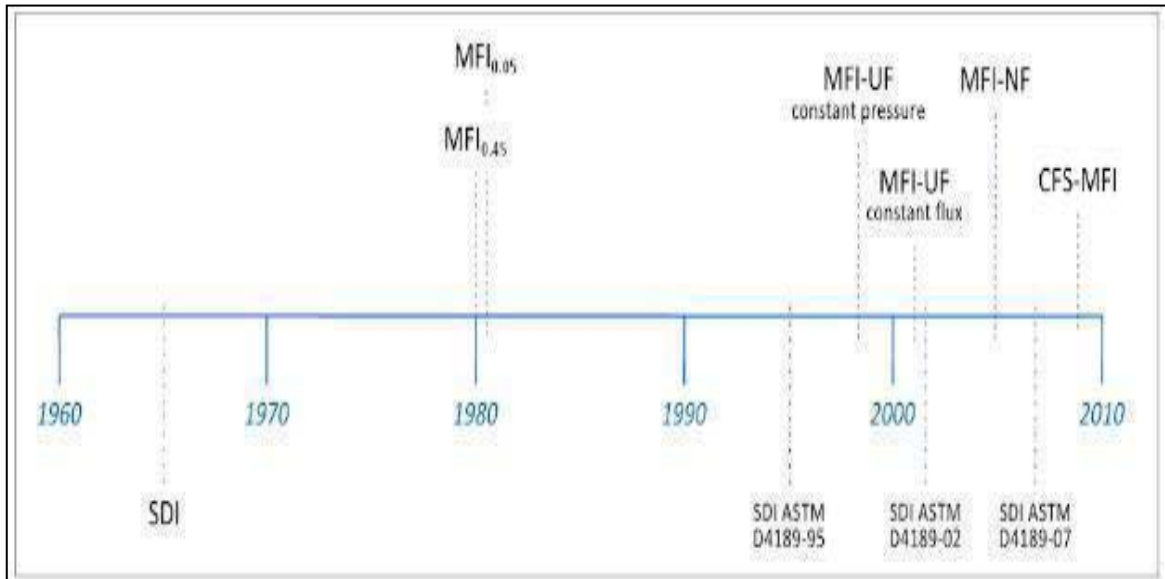


Figure 4.6 : Graphique de l'historique des évolutions de l'indice d'encrassement.

Les méthodes de mesures sont constamment améliorées. Les indices d'encrassement suivent la tendance pour refléter pleinement le système membranaire d'osmose inverse. Les procédures détaillées de chaque méthodologie de détermination d'indice seront examinées plus en détail. [26].

CHAPITRE 5

**RÉSULTATS ET
INTERPRÉTATIONS DES
ANALYSES**

5.1. Matériels et méthodes

A. **Caractéristiques de l'eau de mer** L'eau de mer utilisée dans les différents essais est une eau provenant de l'usine de dessalement de FOUKA. Le tableau 1 regroupe les caractéristiques physico-chimiques de cette eau.

Tableau 5.1: les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer FOUKA.

Paramètres	Conception usine FOUKA	
	Min	Max
Température (C°)	15	27
ph	7.5	8.5
Solides totaux en suspension (mg/l)	/	10
Turbidité (NTU)	/	5
SDI (mg/l)	/	< 10
Calcium (mg/l)	/	489
Magnésium (mg/l)	/	1528
Sodium (mg/l)	/	14000
Potassium	/	448
Chlorures (mg/l)	/	23000
Sulfates (mg/l)	/	3000
Bicarbonate (mg/l)	/	146
Ammonium (mg/l)	/	< 0,5
Fer (µg/l)	/	< 100
Aluminium (µg/l)	/	< 100
Manganèse (µg/l)	/	< 80
STD (mg/l)	/	38000
Strontium (mg/l)	/	8,5
Baryum (mg/l)	/	<0,2
TOC (mg/l)	/	< 3

B. Analyse des particules et colloïdes**➤ Détermination le SDI (l'indice de colmatage)**

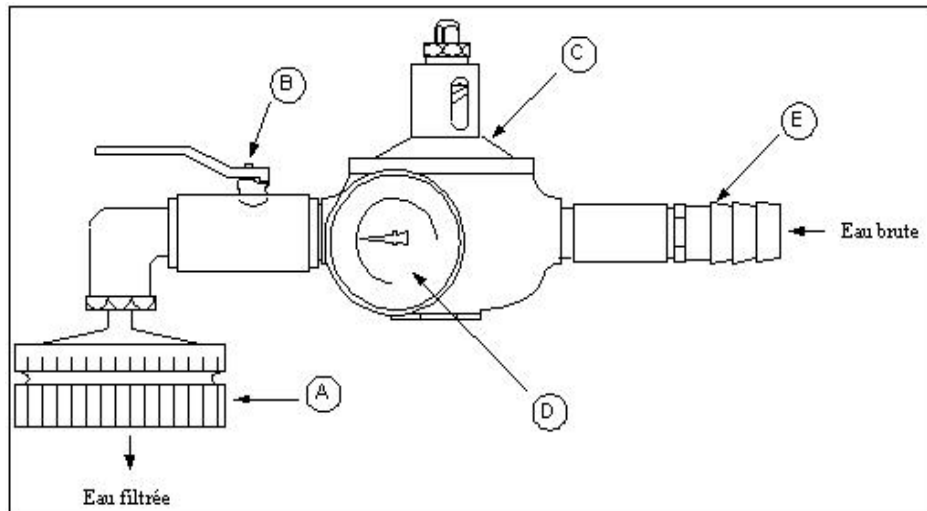
Principe : Détermination de l'encrassement d'une membrane de porosité 0,45 μm et de 47 mm de diamètre par filtration de l'eau au travers de cette membrane à une pression de 2,1 bars. Filtration de l'eau en continue avec mesures à différents intervalles de temps et de volumes.



Figure 5.1 : Matériel nécessaire pour mesure SDI.

❖ Matériel nécessaire :

- ✓ Chronomètre électronique
- ✓ Éprouvette graduée 100 ou 500 ml
- ✓ Membranes 0,45 μm
- ✓ Kit de mesure du Fouling Index :



Ensemble comprenant embout de raccordement (E), détendeur régulateur de pression (C), manomètre (D), vanne d'isolement (B) et support de membrane (A)

❖ **Mode opératoire :**

- Placer la membrane de porosité $0,45 \mu\text{m}$ dans son support et l'humidifier.
- Purger l'air du circuit.
- Ajuster la pression à 2,1 bars.
- Mettre en route le chronomètre et le début de la filtration de l'eau en même temps et ne plus arrêter le chronomètre et la filtration de l'eau pendant toute la durée de l'opération.
- Mesurer le temps nécessaire t_0 pour filtrer 100 ml d'eau (volume mesuré grâce à l'eau recueillie dans l'éprouvette graduée) ce temps doit être voisin ou supérieur à 10 secondes, si ce n'est pas le cas, chronométrer le temps de passage de 500 ml.
- La filtration de l'eau étant continue, la pression maintenue à 2,1 bars et le chronomètre n'étant pas arrêté, quand ce dernier affiche 5 min, mesurer le deuxième temps nécessaire t_5 pour filtrer à nouveau 100 ml (ou 500 ml) d'eau.
- Le temps t_5 est équivalent au temps affiché moins 5 min.
- Quand le chronomètre affiche 10 min, mesurer le troisième temps nécessaire t_{10} pour filtrer 100 ml (ou 500 ml) d'eau.
- Le temps t_{10} est équivalent au temps affiché moins 10 min.
- Quand le chronomètre affiche 15 min, mesurer le temps nécessaire t_{15} pour filtrer 100 ml (ou 500 ml) d'eau.
- Le temps t_{15} est équivalent au temps affiché moins 15 min.

Mode de calcul :

Le pouvoir encrassant est donné par la relation :

$$P (\%) = 100 * (1 - t_0 / t) \quad \text{Eq : 5.1.}$$

Calculer P avec $t = t_{15}$:

Si $P > 80 \%$ avec $t = t_{15}$, refaire le calcul avec $t = t_{10}$.

Si $P > 80 \%$ avec $t = t_{10}$, refaire le calcul avec $t = t_5$.

L'indice de colmatage est donné par la relation :

$$IC = P (\%) / T$$

T = temps total de la mesure : 5, 10 ou 15 min selon le temps retenu.

1) Valeurs repères :**Tableau 5.2 : Les valeurs de repères de SDI.**

0 à 3	Eau non colmatant peut être utilisée directement sans traitement spécifique
3 à 6	Eau peu colmatant nécessite l'utilisation d'un traitement physique: Pré filtres
6 à 20	Eau très colmatant Traitement d'eau plus poussé obligatoire: MFT, UF Coagulation floculation.

2) Contrôle de coloration de la membrane :

La vérification de l'aspect de la membrane donnera une indication sur l'origine des matières comatantes.

- ✓ Membrane jaune gélatineux: Présence de silices colloïdales.
- ✓ Membrane rouille gélatineux: Présence de matières ferriques sous forme colloïdale.
- ✓ Membrane aux traces noires: Contamination par relarguage de charbon actif
- ✓ Membrane aux traces rouges: Contamination d'oxydes de fer générée par réseau.

5.2. Résultats et Discussions :

Les résultats obtenus sont exprimés dans les tableaux ci après, ils sont comparé, aux normes de potabilité établit par l’ADE pour certains paramétrats pour d’autres les normes sont celle de l’entreprise.

Tableau 5.3: Résultats du SDI ₅, MES et Turbidité.

N° d’analyse	La date	SDI ₅	MES	Turbidité
1	1 mars 2020	11,00	8,4	0,73
2	2 mars 2020	11,70	7,4	0,81
3	3 mars 2020	17,60	/	4,93
4	4 mars 2020	13,90	12,4	1,5
5	5 mars 2020	12,50	10,4	0,76
6	6 mars 2020	13,10	9,2	1,87
7	7 mars 2020	13,20	9,6	3,07
8	8 mars 2020	16,60	10,6	3,85
9	9 mars 2020	11,30	5,4	0,83
10	10 mars 2020	12,30	8,4	0,83
11	11 mars 2020	16,60	10	2,46
12	12 mars 2020	11,00	9,4	1,66
13	13 mars 2020	13,10	9,8	1,34
14	14 mars 2020	12,70	15,2	0,95
15	15 mars 2020	11,40	9,2	0,62
16	16 mars 2020	10,90	9,6	0,92
17	17 mars 2020	12,00	9,4	0,93
18	18 mars 2020	10,50	10,2	0,81
19	19 mars 2020	11,50	12,4	0,86
20	20 mars 2020	11,20	9,8	0,86
21	21 mars 2020	13,60	8,2	0,75
22	22 mars 2020	11,10	10,8	0,7
23	23 mars 2020	12,40	8,6	0,64
24	24 mars 2020	12,00	10	0,9
25	25 mars 2020	16,90	14,2	3,03
26	26 mars 2020	16,40	10,2	1,99
27	27 mars 2020	13,70	12	1,71
28	28 mars 2020	15,30	10,6	1,46
29	29 mars 2020	13,70	9,8	1,42
31	31 mars 2020	13,20	9,4	0,81

✓ Turbidité : (<5 NTU)

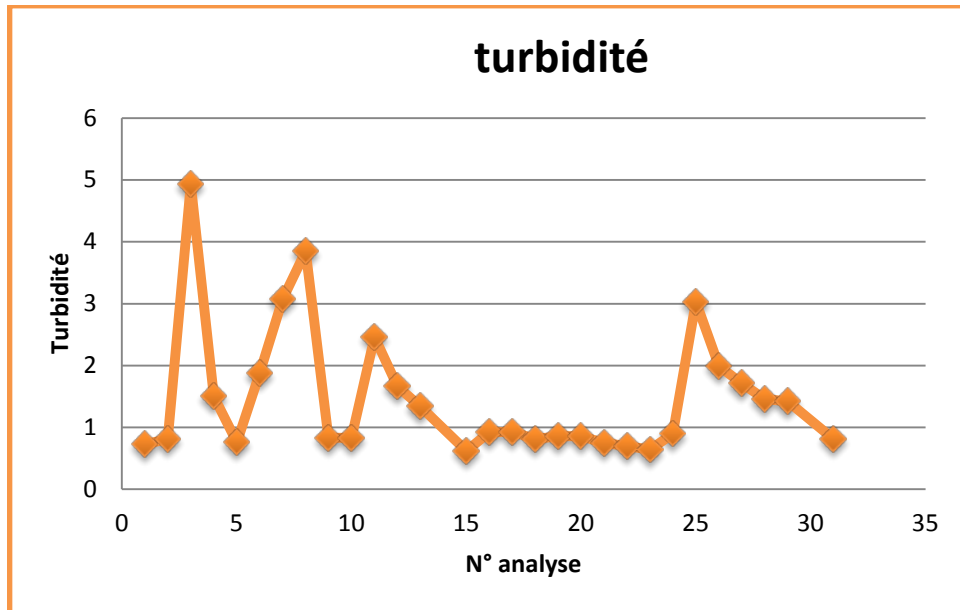


Figure 5.2 : courbe représentative de la variation de la turbidité.

La turbidité évolue dans l'intervalle de 0,62 à 4.93 NTU, Ces faibles valeurs font que la turbidité de l'eau de mer répond à la norme (<5 NTU), mais dans les valeurs élevés 4.93 à 3.85 on remarque une variation de la turbidité du aux changements climatique (vents, pluies).

✓ MES : Norme OMS* (5-10 mg/l)

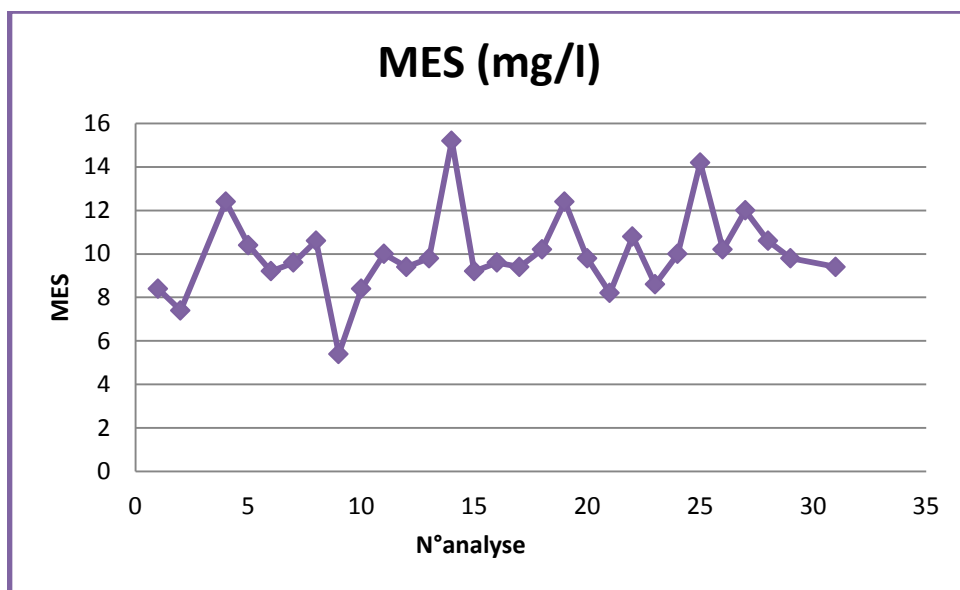


Figure 5.3 : courbe représentative de la variation des MES.

Les matières en suspensions dans l'eau de mer sont soit des particules visibles, décantée ou colloïdale. Elles se composent d'argile, de limons, de sable, de boues diverses, de particules colloïdale organique, de planctons, de micro-organisme etc....

Le taux des MES dans l'eau brute varie de 5.4 à 15.2 mg/l, la variation de ce paramètre est due au mouvement de la mer et au changement climatique

✓ **SDI₅ : Norme OMS* (< 5)**

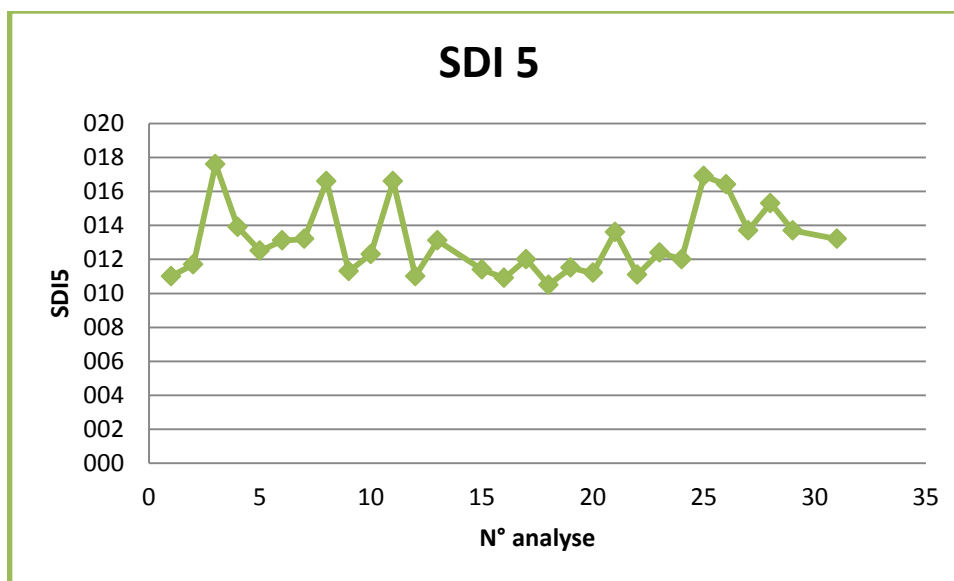


Figure 5.4: courbe représentative de la variation du SDI₅.

Le SDI₅ a une relation directe avec la turbidité et les MES, le taux du SDI₅ dans l'eau brute varie de 10.50 à 17.60, indiquant une eau très colmatant et la nécessité d'un traitement d'eau poussé, avant le passage de l'eau dans l'unité d'OI.

Tableau 5.4: Résultats du SDI₁₅ avant filtre à cartouche.

N° analyse	la date	T0	T1	SDI ₁₅ avant
1	1 mars 2020	22	34	2,35
2	2 mars 2020	24	38	2,46
3	3 mars 2020	28	51	3
4	4 mars 2020	28	51	3,6
5	5 mars 2020	24	41	2,75
6	6 mars 2020	22	35	4,47
7	7 mars 2020	24	36	2,22
8	8 mars 2020	23	35	2,28
9	9 mars 2020	21	33	2,42

10	10 mars 2020	22	34	2,35
11	11 mars 2020	24	39	2,39
12	12 mars 2020	22	35	2,47
13	13 mars 2020	22	33	2,22
15	15 mars 2020	24	37	2,34
16	16 mars 2020	21	32	2,29
17	17 mars 2020	23	36	2,4
18	18 mars 2020	23	37	2,52
19	19 mars 2020	24	38	2,45
20	20 mars 2020	23	36	2,4
21	21 mars 2020	23	37	2,52
22	22 mars 2020	22	34	2,35
23	23 mars 2020	22	32	2,08
24	24 mars 2020	23	34	2,15
25	25 mars 2020	23	36	2,4
26	26 mars 2020	24	39	2,56
27	27 mars 2020	24	41	2,76
28	28 mars 2020	20	33	2,62
29	29 mars 2020	22	35	2,47
31	31 mars 2020	23	36	2,4

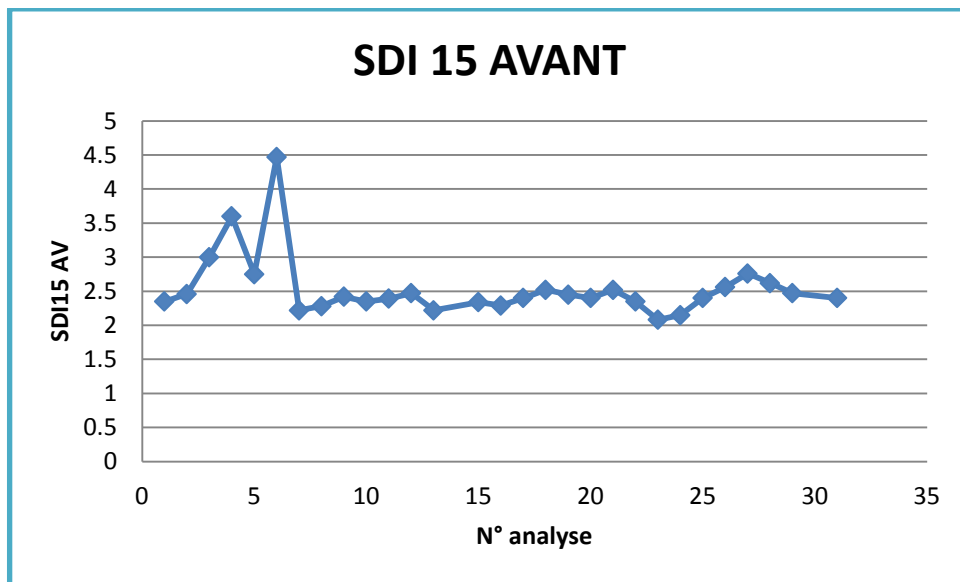


Figure 5.5: courbe représentative de la variation du SDI₁₅.avant filtre à cartouche

- ✓ Les résultats SDI15 et MFI des filtres avec des tailles de pores de 0,45 µm diamètres sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 5.5: Résultats du SDI₁₅, après filtre à cartouche :

N° analyse	la date	T0	T1	SDI ₁₅ AP
1	1 mars 2020	24	36	2,18
2	2 mars 2020	25	41	2,5
3	3 mars 2020	24	36	2,45
4	4 mars 2020	25	39	2,47
5	5 mars 2020	24	39	2,56
6	6 mars 2020	22	33	2,22
7	7 mars 2020	22	32	2,08
8	8 mars 2020	21	31	2,15
9	9 mars 2020	23	33	2,02
10	10 mars 2020	21	30	2
11	11 mars 2020	24	35	2,22
12	12 mars 2020	22	32	2,08
13	13 mars 2020	21	31	2,14
15	15 mars 2020	22	33	2,22
16	16 mars 2020	21	31	2,15
17	17 mars 2020	21	31	2,15
18	18 mars 2020	23	37	2,5
19	19 mars 2020	22	34	2,35
20	20 mars 2020	22	33	2,22
21	21 mars 2020	22	34	2,35
22	22 mars 2020	22	33	2,22
23	23 mars 2020	21	30	2
24	24 mars 2020	21	31	2,14
25	25 mars 2020	23	34	2,15
26	26 mars 2020	24	37	2,34
27	27 mars 2020	23	36	2,4
28	28 mars 2020	21	32	2,28
29	29 mars 2020	22	32	2,08
31	31 mars 2020	22	34	2,35

Tableau 5.6: Résultats du MFI.

N° analyse	la date	T0	T1	MFI
1	1 mars 2020	24	35	2,09
2	2 mars 2020	24	37	2,34
3	3 mars 2020	25	45	2,02
4	4 mars 2020	21	55	3,39
5	5 mars 2020	24	40	2,66
6	6 mars 2020	22	34	2,35
7	7 mars 2020	22	33	2,26
8	8 mars 2020	22	34	2,29
9	9 mars 2020	21	30	2
10	10 mars 2020	24	34	1,97
11	11 mars 2020	23	35	2,27
12	12 mars 2020	24	34	2,06
13	13 mars 2020	23	33	2,06
15	15 mars 2020	23	33	2,14
16	16 mars 2020	22	33	2,23
17	17 mars 2020	24	35	2,05
18	18 mars 2020	23	35	2,28
19	19 mars 2020	23	34	2,27
20	20 mars 2020	23	34	2,18
21	21 mars 2020	22	33	2,13
22	22 mars 2020	23	34	2,2
23	23 mars 2020	22	31	1,94
24	24 mars 2020	24	35	2,1
25	25 mars 2020	20	29	2,06
26	26 mars 2020	23	34	2,18
27	27 mars 2020	23	37	2,43
28	28 mars 2020	20	31	2,36
29	29 mars 2020	22	33	2,24
31	31 mars 2020	22	33	2,3

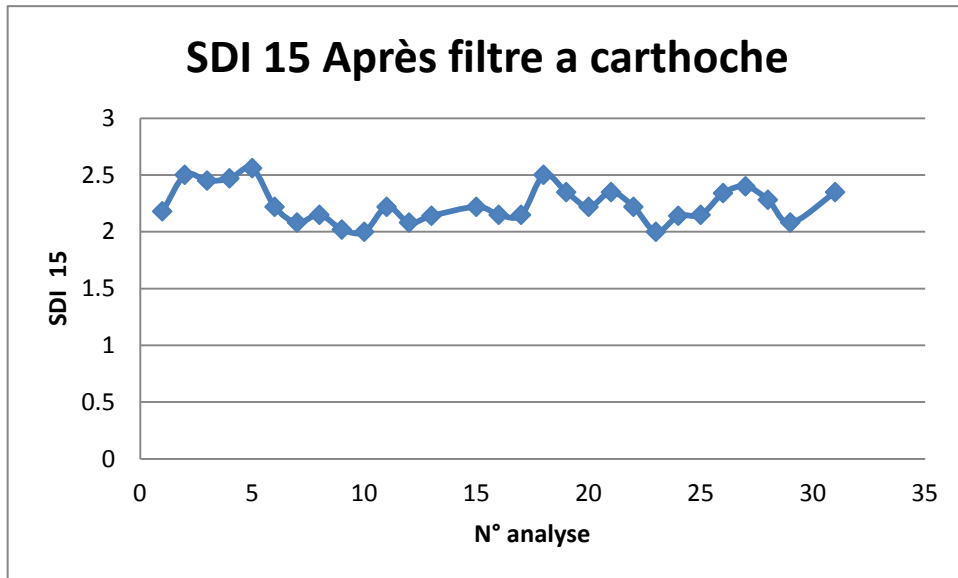


Figure 5.6 : courbe représentative de la variation du SDI₁₅.après filtre à cartouche.

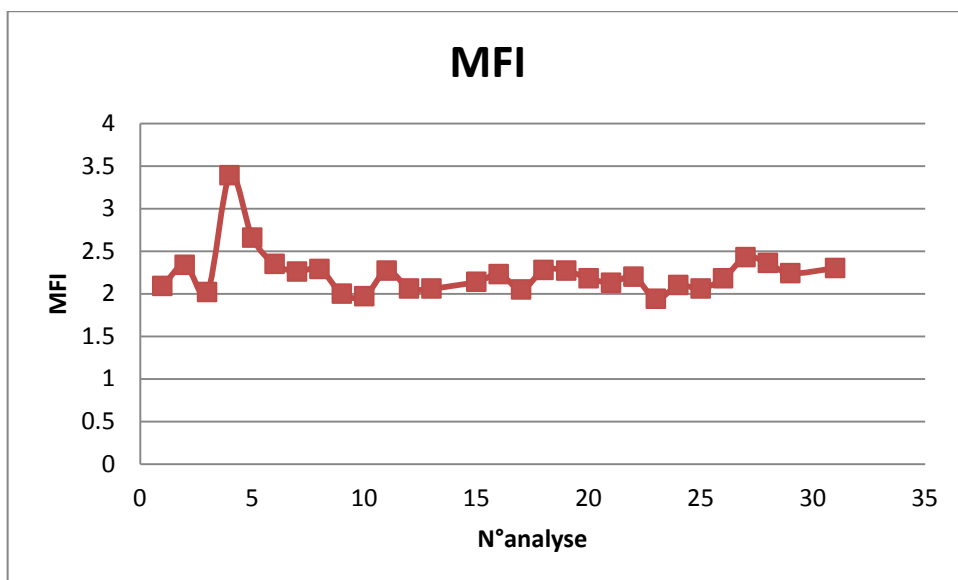


Figure 5.7: courbe représentative de la variation du MFI.

Le SDI₁₅ après filtre à cartouche dans l'eau filtré varie de 2 à 2.56, et Le MFI après filtre à cartouche dans l'eau filtré varie de 1.94 à 2.66. on remarque que les valeurs de MFI et SDI₁₅ sont presque les mêmes. Il n'y a pas une grande différence.

Conclusion générale

Le dessalement est un outil extrêmement efficace pour convertir l'eau de mer, l'eau saumâtre en eau douce pour l'usage. Cependant, un prétraitement est nécessaire pour s'assurer que l'eau d'alimentation ne causera pas de problèmes de colmatage et de précipitation sur la membrane d'osmose inverse. Le prétraitement des membranes d'osmose inverse alimentant l'eau de mer est reconnue comme un élément clé dans la conception des usines de dessalement.

Pour caractériser le colmatage des membranes d'osmose inverse, différentes méthodes d'évaluation du potentiel de colmatage d'une eau ont été développés. Les plus utilisées sont le Silt Density Index (SDI) et le Modified Fouling Index (MFI).

Lors du suivi de l'eau de mer, le MFI 0,45 était beaucoup plus sensible que le SDI aux variations de qualité de l'eau en particulier lors de la croissance des algues. Comme les tests SDI et MFI 0.45 peuvent être mesurés à l'aide du même équipement, il est recommandé de mieux aligner les protocoles ASTM pour les deux méthodes.

MFI est un indice intéressant pour évaluer le potentiel d'encrassement de l'eau de mer car il montre un SDI plus large pendant un prétraitement, ce qui lui permet d'être beaucoup plus sensible qu'un changement potentiel SDI des changements de qualité de l'eau de mer prétraités. Néanmoins, le SDI et MFI restent des indices pour l'évaluation de la teneur en particules de l'eau de mer.

Par conséquent, il ne fournit pas d'information sur la teneur en matières organiques de l'eau de mer prétraitée ni sur son potentiel de sédimentation, ce qui est crucial pour la prévision de l'étendue de l'encrassement sur le système RO en aval.

Une collaboration internationale des organismes de recherche et de l'industrie dans le monde entier est proposée afin d'établir une base de données de données opérationnelles et de mesures MFI-UF pour une large gamme d'eau d'alimentation RO, d'options de prétraitement et de régimes opérationnels. Une telle base de données serait d'une valeur considérable pour les ingénieurs de procédés et les opérateurs d'usines dans la conception et l'exploitation des usines de dessalement.

Référence bibliographiques

- [1] **Dr RACHID Sahghi** « *chimie des eaux* ». Professeur à l'école nationale des sciences Appliquées d'agadir.
- [2] **Gérard COPIN-MONTÉGUT, 2002.** Référence internet 170, Techniques de l'Ingénieur, traité Constantes physico-chimiques.
- [3] **Docteur ès sciences Observatoire océanologique de Villefranche-sur-mer Maître de conférences à l'université Pierre-et-Marie-Curi. Techniques de l'Ingénieur.** « Propriétés physiques de l'eau de mer ».PDF
- [4] **site internet.**
- [5] **Site Internet, chambre syndicale de la recherche et de la production du pétrole et du gaz naturel comité des techniques Paris 1993** « *circuits eau de mer traitement et matériaux édition technique*».
- [6] **JEAN RODIER Paris, 2005** « L'ANALYSE DE L'EAU » 8eme édition
- [7] <http://www.cotebleue.org/eau5.html>.
- [8] **RAYMOND Desjardins 1997 ;** « *le traitement des eaux 2eme édition polytechnique canada* ».
- [9] **GLS OIEAU ACTIVITES 2006 SOUS L'EGIDE DE L'AMBASSADE DE FRANCE EN ALGERIE ;** Formation A L'exploitation Et A La Maintenance Des Unites De Dessalement D'eau De Mer De L'algerienne Des Eaux.
- [10] **Site Internet, JADDAH June 1996;** «*Now to control biological and organic fouling of reverse osmosis membranes*».
- [11] <http://salinite-des-oceans.e-monsite.com/pages/origine-du-sel-de-la-mer.html>.
- [12] **Cardot C, (1999),** « Les traitements de l'eau du génie de l'environnement "procédés physico chimiques et biologiques », Edition ellipses, Paris.éruptions des puits sous marins.

- [13] **MAUREL Alain. 2001** ; « *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. Technique & Documentation, Paris* ».
- [14] **MAUREL Alain 2006 ; Doc. Lavoisier**, « *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres* ».
- [15]**NICOS Tsiourtis,2005** ; « Desalination and the environnement ».
- [16] **SAFEGE, 2003** ; « Étude général du dessalement de l'eau de mer » .tous les rapports de mission.
- [17] **jean- Marec BERLAND et Catheréne JUERY,2002** ; « les procédés membranaire pour le traitement de l'eau ».Direction de l'Espace Rural et la Foret. Document techniques N° 14.71p.
- [18] **DANT ,2008** ; « dessalement de l'eau de mer».
- [19] **<http://www.myah tipaza .dz>**
- [20] **SNL-LAVALIN et aciona, USINE DE DESSALEMENT D'EAU DE MER DE FOUKA 29 JUIN 2010** ; REF SNC :017254-0000-40PR-3-0002. « Notice d'exploitation Fouka Plant ».
- [21] **www.Google erath.dz**
- [22] **SNL-LAVALIN et aciona, USINE DE DESSALEMENT D'EAU DE MER DE FOUKA 13 AVRIL 2011** ; REF SLI : 017245-0000-40MV-8-0026. « MANUEL D'EXPLOITATION ET MAINTENANCE FOUKA PLANT »
- [23] **N. Prihasto and Seung-Hyun Kim, 2012**, The sensitivity of SDI and MFI to a change in particle concentration and properties under saline conditions; Journal of Water Reuse and Desalination.
- [24] **THESE Doctorat de l'université de Toulouse, waritha jantaporn 2016**, « technologies membranaires innovant pour réutilisation des eaux ».
- [25] **Jan Cornelis Schippers on 22 March 2016**. « Why MFI is edging SDI as a fouling index».PDF.
- [26] **ERDENE, NOMUNDARI**, Assessment of the water quality by means of fouling indexes. Universität für Bodenkultur Wien.

ANNEXES

- 1) La qualité de l'eau brute utilisée pour la conception est la station de dessalement FOUKA :

Paramètres	Conception usine Fouka	
	Min.	Max.
Température (°C)	15	27
pH	7,5	8,5
Turbidité (NTU)	N/A	5**
Calcium (mg/l)	N/A	489
Magnésium (mg/l)	N/A	1528
Sodium (mg/l)	N/A	14000
Potassium	N/A	448
Chlorures (mg/l)	N/A	23000
Sulfates (mg/l)	N/A	3000
Bicarbonate (mg/l)	N/A	146
Ammonium (mg/l)	N/A	< 0,5
Fer (µg/l)	N/A	< 100
Aluminium (µg/l)	N/A	< 100
Manganèse (µg/l)	N/A	< 80
STD (mg/l)	N/A	38000
Solides totaux en suspension	N/A	10
Strontium (mg/l)	N/A	8,5
Baryum (mg/l)	N/A	<0,2
TOC (mg/l)	N/A	< 3
SDI (mg/l)	N/A	< 10
Coliformes aérobie (cf/ml)	N/A	< 1000
Particules solides (>2 µm)	N/A	< 5000
Algues (µ/l)	N/A	< 200000
Pétroles et hydrocarbures	N/A	< 0,05
Bore (mg/l)	N/A	5,0

2)

Le terme UMFI est exprimé en m^{-1} , ou m^2/L si l'unité de V_s est L/m^2 .

Mécanisme du colmatage	n	k_v	Equation linéaire	Forme intégrée
Formation de couche des dépôts	0	$C_f \hat{R}_c / R_m$	$\frac{1}{j_s} = 1 + k_v V_s$	$\frac{t}{V} = \frac{K_C}{2u_0 A^2} V + \frac{1}{Q_0}$
Blocage intermédiaire des pores	1	$C_f \sigma$	$\ln j_s = -k_v V_s$	$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_0} + \frac{K_A}{A} t$
Blocage standard des pores	$\frac{3}{2}$	$2C_f / L\rho$	$j_s^{1/2} = 1 + \frac{k_v}{2V_s}$	$\frac{t}{V} = \frac{K_B}{A} t + \frac{1}{Q_0}$
Blocage complet des pores	2	$C_f \sigma$	$J_s = 1 - k_v V_s$	$Q = Q_0 - K_A u_0 V$

Tableau 2-1 : n, k_v et équations liant aux différentes lois de filtration

$K_B [m^{-1}]$	Diminution de la section droite des pores par unité du volume total de filtrat
$K_A [m^{-1}]$	Aire de média bloqué par unité du volume total de filtrat
$1/K_C$	Volume total de filtrat par unité de surface filtrante (qui coïncide avec l'aire du gâteau déposé) (K_C en m^{-1})
$u_0 [m.s^{-1}]$	Moyenne de la vitesse initiale du filtrat
$A [m^2]$	Surface filtrante du média
$Q_0 [m^3.s^{-1}]$	Débit volumique initial du filtrat ($Q_0 = A \cdot u_0$)
$C_f [kg/m^3]$	Concentration du colmatant présent dans l'alimentation