République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Yahia Fares de Médéa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie des Procédés et Environnement
Laboratoire de Biomatériaux et Phénomènes de Transport (LBMPT)



THESE

Présentée par :
ADDA Asma

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en sciences en Génie des Procédés

Thème

Modélisation dynamique et optimisation d'un système hybride de dessalement membranaire fonctionnant en énergie solaire

Soutenue publiquement devant le jury composé de :

M.Salam ABUDURA	Professeur, Université de Médéa	Président
M. Lahcène DJAFER	Professeur, Université de Chlef	Examinateur
M. Rabah KERFAH	Maitre Conférence A, Université de Khemis Miliana	Examinateur
M. Mohamed ABBAS	Directeur de Recherche, UDES	Directeur de thèse
M. Salah HANINI	Professeur, Université de Médéa	Co-Directeur de thèse



Dédicaces

Je dédie ce travail à mon mari Salah Qui est Mon soutien, ma motivation, Ma force Sans lui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

A ma mère, mes frères, mes sœurs et mon père qui nous a quitté en 2010 et qui m'a toujours encouragé et incité à aller plus loin.

À tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin.

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier ***ALLAH*** *Tout Puissant pour toutes les merveilles qu'il fait dans ma vie et pour m'avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.*

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, Monsieur ***Mohamed Abbas****, Professeur à l'UDES qui m'a guidé avec grande patience tout au long de l'élaboration de ce travail, pour ses aides précieuses qui ont judicieusement éclairés mon chemin vers l'aboutissement et la réussite de la concrétisation de ma thèse de Doctorat.*

J'adresse également mes plus grands remerciements au, Professeur ***Salah Hanini****, à l'UYFM, pour son aide, son accompagnement et son éclairage technique. Je lui dois les remerciements les plus sincères. Je ne peux conclure sans un mot de remerciements à mon Co-directeur de thèse de doctorat.*

Je profite de l'occasion de la présentation de ce travail pour exprimer mes vifs remerciements à Monsieur ***Salam ABUDURA****, Professeur à Université de Médéa, pour avoir accepté de présider le jury de soutenance.*

Je tiens également à présenter ma profonde gratitude à Monsieur ***Lahcene Djafer****, Professeur à l'Université de Chlef et Monsieur* ***Rabah kerfah*** *Maître de Conférences (A) à l'Université de Khemis Meliana, d'avoir accepté de juger ce modeste travail.*

Merci à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin durant ces années de recherches et d'études.

Résumé

Modélisation et optimisation d'un système hybride de dessalement membranaire fonctionnant en énergie solaire

L'objectif de ce modeste travail est de modéliser, optimiser et évaluer les performances membranaires du système de dessalement de l'eau de mer associé en énergie solaire. Cette étude comprend trois axes :

Le premier axe, est modélisation de la performance du procédé membranaire, ainsi que développement de deux modèles :

Le premier modèle, est non linéaire basé sur des hypothèses réelles de filtration. Une comparaison a été effectuée entre les modèles cinétiques (premier & deuxième ordre) de l'adsorption et le modèle développé .En Met en évidence leurs performances et optimiser le pseudo-ordre de modèle à l'aide du logiciel MATLAB.

Les résultats obtenus montrent que les valeurs prédites du modèle concordent avec les valeurs expérimentales, ce qui donne un bon coefficient de corrélation $R^2 = 0{,}997$ et une erreur quadratique moyenne minimale $RMSE = 0{,}0171$. En effet, les résultats expérimentaux suivent le nouveau modèle et le pseudo- ordre optimale est $n = 1{,}115$. Le deuxième modèle est numérique basé sur l'apprentissage des algorithmes de réseau de neurone artificielle (RNA) a été mis au point pour prédire la performance d'une installation pilote de dessalement d'eau de mer hybride NF /OI tel que les données expérimentales sont de taille n = 60. Les paramètres simulées sont la conductivité du perméat ; le débit de perméat et le taux de conversion globale. Ensuite, le modèle comprend cinq paramètres d'entrée et trois paramètres de sortie d'une configuration5-8-3 (5 entrées, 8 neurones cachés et 3 sorties), une fonction de transfert sigmoïde et de transfert linéaire à la couche d'entrée et sortie respectivement. Le modèle RNA formé présentait un très bon accord entre les résultats prédites et les valeurs expérimentales avec un coefficient de régression égal à 0,9636 ; 0,9422 et 0,9691 et une erreur quadratique moyen de l'ordre 11,7 ; 0,0132 et 0,2630 respectivement pour la conductivité du perméat, le débit de perméat et récupération de perméat. Une comparaison entre les résultats obtenus de RNA et la régression linéaire multiple (RLM) est réalisée montre la robustesse de modèle neuronal.

Deuxième axe, un dimensionnement du système d'énergie solaire effectué pour alimenter la station de dessalement NF/OI.

Troisième axe, une étude technico-économique est également effectuée pour une installation de dessalement de l'eau de mer pilote à l'unité de développement des équipements solaire (UDES) à Tipaza fonctionnant en énergie solaire photovoltaïque. Les possibilités sont présentées sous deux scénario : station alimentée par réseau publique (On-grid) et station alimentée par photovoltaïque (Off-grid). Les résultats de la méthode de calcul de taux de rentabilité interne montrent que le dispositif Off-grid est le plus rentable.

Mots clé : dessalement de l'eau de mer, OI/NF membrane, énergie renouvelable, modélisation**,** étude technico-économique

Abstract

Dynamic modelling and optimization of a hybrid membrane desalination system operating with solar energy

The objective of this modest work is modelling, optimize and evaluate the membrane performances of the seawater desalination system associated with solar energy. This study has three axes:

The first axis is modelling the performance of the membrane process, as well as developing two models: The first model is non-linear based on real filtration hypotheses. A comparison was made between the kinetic models (pseudo first & second order) of the adsorption and the developed model. Highlights their performance and optimize the model n^{th} pseudo-order using MATLAB software.

The results obtained show that the predicted values of the model agree with the experimental values, which gives a good correlation coefficient $R^2 = 0.997$ and a minimum mean square error RMSE = 0.0171. Indeed, the experimental results follow the new model and the optimal pseudo-order is n = 1.115. The second model is numerical based on the learning of artificial neuronal network (ANN) algorithms was developed to predict the performance of a hybrid NF / RO seawater desalination pilot plant such as experimental data are of size n = 60. The simulated parameters are the permeate conductivity; permeate flow rate and overall recovery Then, the model includes five input parameters and three output parameters of a 5-8-3 configuration (5 inputs, 8 hidden neurons and 3 outputs), a sigmoid transfer function and linear transfer to the layer of input and output respectively. The ANN model formed presented a very good agreement between the predicted results and the experimental values with a regression coefficient equal to 0.9636, 0.9422 and 0.9691 and a mean square error of the order 11.7,

0.0132 and 0.2630 respectively for the permeate conductivity, the permeate flow rate and permeate recovery. A comparison between the results obtained from ANN and multi-linear regression (MLR) is performed shows the robustness of the neural model.

Second axis, a sizing of the solar energy system carried out to supply the NF / OI desalination station.

Third axis, a technical-economic study is also carried out for a pilot seawater desalination plant at the Solar Equipment Development Unit (UDES) in Tipaza operating on photovoltaic solar energy. The possibilities are presented under two scenarios: station supplied by public network (On grid) and station supplied by photovoltaic (Off grid). The results of the internal rate of return calculation method show that the Off grid system is the most profitable.

keywords : seawater desalination, NF /RO membrane, renewable energy , modelling**,** technical-economic study

خلاصة

النمذجة الديناميكية وتحسين نظام تحلية الغشاء الهجين الذي يعمل بالطاقة الشمسية

الهدف من هذا العمل المتواضع هو تصميم وتحسين أداء الغشاء في نظام تحلية مياه البحر المرتبط بالطاقة الشمسية. تحتوي هذه الدراسة على ثلاثة محاور:

المحور الأول هو نمذجة أداء عملية الغشاء، وكذلك تطوير نموذجين:

النموذج الأول غير خطي يعتمد على فرضيات الترشيح الحقيقية. تم إجراء مقارنة بين النماذج الحركية (الرتبة الأولى والثانية) من الامتزاز والنموذج المطور، وذلك من خلال تسليط الضوء على أدائها وتحسين ترتيب معادلة النماذج باستخدام برنامج MATLAB .

أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن القيم المتوقعة للنموذج تتفق مع القيم التجريبية، والتي تعطي معامل ارتباط جيد R^2 = 0.997وحد أدنى من الخطأ لمتوسط التربيع RMSE = 0,0171 في الواقع، تتبع النتائج التجريبية النموذج الجديد وترتيب المعادلة الأمثل هو n = 1,115 النموذج الثاني يعتمد على تعلم خوارزميات شبكة الخلايا العصبية الاصطناعية (RNA)التي تم تطويرها للتنبؤ بأداء تركيب غشاء تحلية مياه البحر الهجين NF / OI التجريبي مثل البيانات التجريبية هي ذات قياس ن = 60. المعلمات محاكاة هي الموصلية للنفاذية. التدفق للنفاذية ومعدل التحويل الكلي. ثم يشتمل النموذج على خمسة معلمات إدخال وثلاثة معلمات خرج بتكوين 5-8-3 (5 مدخلات، 8 خلايا عصبية مخفية و3 مخرجات)، معادلة نقل السيجما اود ونقل خطي إلى طبقة الإدخال والخروج على التوالي. قدم نموذج RNA الذي تم تشكيله اتفاقًا جيدًا للغاية بين النتائج المتوقعة والقيم التجريبية بمعامل انحدار يساوي 0.9636 ,0.9422 و0.9691 وخطأ مربعًا متوسطًا للترتيب 11.7، 0.0132 و0.2630 على التوالي للموصلية المتخللة، وتدفق النفاذية واستعادة النفاذية. تظهر مقارنة بين النتائج التي تم الحصول عليها من الشبكة العصبية النووي المصطنع والانحدار متعدد الخطي (RML) يدل على قوة نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية.

المحور الثاني، تم إجراء تحجيم لنظام الطاقة الشمسية الموصول بمحطة تحلية المياه NF / OI .

المحور الثالث، يتم إجراء دراسة تقنية اقتصادية أيضًا من أجل تركيب رائد لتحلية مياه البحر في وحدة تطوير معدات الطاقة الشمسية (UDES) في تيبازة التي تعمل على الطاقة الشمسية الكهروضوئية. يتم تقديم الاحتمالات في إطار سيناريو هين: المحطة التي تزودها الشبكة العامة بالكهرباء (على الشبكة) والمحطة التي ما توفره لها الخلايا الكهروضوئية من كهرباء (خارج الشبكة)، وتوضح نتائج طريقة حساب معدل العائد الداخلي أن الجهاز خارج الشبكة هو أكثر ربحية.

الكلمات المفتاحية: تحلية مياه البحر، غشاء، الطاقة المتجددة، النمذجة، دراسة تقنية اقتصادية

Table des matières

Abréviations i
Nomenclature et symboles iv
Liste des tableaux vii
Liste des figures x

Introduction générale 1

Chapitre I. Généralité sur le dessalement de l'eau de mer 5
I.1. Introduction 5
I.2. Historique 5
I.3. Technologies de dessalement 6
I.3.1 Procédés thermiques 7
I.3.1.1. Procédé de distillation par détentes successives (Multi-Stage Flash MSF) 7
I.3.1.2. Procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effects Distillation MED) 9
I.3.1.3. Multi-effets avec compression de vapeur 9
I.3.2. Filtration membranaire 10
I.3.2.1. Les techniques membranaires à gradient de pression 10
I.3.2.1.1 Microfiltration 11
I.3.2.1.2 Ultrafiltration 11
I.3.2.1.3 Nanofiltration 12
I.3.2.1.4 Osmose inverse 13
I.3.2.2. Techniques membranaire à gradient de potentiel électrique 14
I.3.3. Configuration des modules membrane 16
I.3.3.1. Module à membrane plane 17
I.3.3.3. Module à membrane tubulaire 17
I.3.3.3. Module à membrane fibre creuse 18
I.3.3.4. Module à membrane spirale 19
I.4. Distillation membranaire 20
I.5. Dessalement par procédé hybride Nanofiltration/Osmose Inverse 21
I.5.1. Mécanismes de transport de NF/OI 21
I.5.1.1. Modèle thermodynamique irréversible (IT) 22
I.5.1.1.2. Taux de rétention (sélectivité) 23
I.5.1.1. 3. Taux de conversion 24
I.5.1.1. 4. Densité de flux de perméat 24
I.5.1.1. 5. Pression transmembranaire 24
I.6. Facteurs de limitation de la performance membranaire 24
I.6.1 Phénomène de polarisation de concentration 24
I.6.1.1. Modélisation de la polarisation 25
I.6.1.2. Les coefficient de transfert de masse 25
I.6.2. Le colmatage ou fouling 26
I.6.2.1 Les mécanismes de colmatage 26
I.6.2.2. Résistance de colmatage 27
I.6.2.3. Pouvoir de colmatage 28

I.6.3. Entartrage (scaling) 28
I.6.4. Bio-fouling 29
I.6.5. Prévention et lutte contre le colmatage 29
I.7. Procédé de prétraitement de l'osmose inverse 30
1.7.1. Prétraitement conventionnel 31
1.7.2. Prétraitement par les procédés membranaires 33
I.8. Consommation énergétique de procédé de dessalement 34
I.8.1. Système de récupération d'énergie 35
I.8.1.1.Installation échangeur de pression 36
I.8.1.2.Installation de turbine 37
I.9. Le dessalement en Algérie 37
I.10. Impact environnemental 39
I.11. Conclusion 40

Chapitre II. Etat de l'art des procèdes de dessalement associés aux énergies renouvelables 41
II.1. Introduction 41
II.2. Revue des travaux sur le procédé de Nanofiltration au prétraitement du dessalement par osmose inverse 41
II.2.1.Optimisation de la performance du système hybride NF/OI 44
II.3. Etat de l'art sur la modélisation du procédé NF/OI par Réseau de Neurone Artificiel 45
II.3.1. Réseau de neurones artificiels (RNA) 46
II.3.1.1. Neurone biologique 46
II.3.1.2. Neurone formel 46
II.3.1.3.Description d'un réseau de neurone 46
II.3.1.4. Architectures de réseaux de neurones 48
II.3.1.3.1. Réseaux multicouches (MLP) 48
II.3.2. Revue des travaux 49
II.4. Intégration de l'énergie solaire dans le système du dessalement 50
II.4.1. Energie solaire associée au procédé RO 51
II.4.2. Système de dessalement par NF-OI couplé avec énergie solaire 54
II.4.3.Considération sur l'échelle économique 55
II.4.4. Rapport coût-efficacité par rapport aux sources d'énergie conventionnelles 56
II.5. Conclusion 59

Chapitre III. Etat Matériels et Méthodes 60
III.1. Introduction 60
III.2. Modélisation de performance du système de dessalement 61
III.2.1 Premier modèle mathématique 61
III.2.1.1. Equation de Premier pseudo ordre 63
III.2.1.2. Equation de pseudo second ordre 63
III.2.1.3. Modélisations du phénomène d'Adsorption 63
III.2.1.4. Méthode Mathématique 64
III.2.1.5. Mesure de précision 65
III.2.1.5.1. Erreur absolue moyenne *MAE* 65
III.2.1.5.2. Erreur quadratique moyenne *RMSE* 65
III.2.1.6. Cas étudie 66
III.2.1.6.1. Collecte des données expérimentales 66

III.2.2. Deuxième modèle mathématique 69
III.2.2.1. Modélisation 69
III.2.2.2. Collecte des données et prétraitement des données 70
III.2.2.3. Description de l'installation pilote 71
III.2.2.4. Architecture de réseau de neurone 77
III.2.2.5. Paramètres statistiques 79
III.2.2.6. Régression linéaire multiple 80
III.2.2.7. Etude de sensibilité 80
III.3. Description et modélisation du système d'énergie solaire 81
III.3.1. Introduction 81
III.3.2. Modélisations de la consommation énergétique du procédé de dessalement 82
III.3.2.1. Modélisation de la consommation énergétique du procédé Osmose inverse 82
III.3.2.2. Modélisation de la consommation énergétique du procédé hybride NF/OI 83
III.3.3.Description du système photovoltaïque associé au dessalement 84
III.3.4. Modélisation du système photovoltaïque /dessalement 85
III.4. Conclusion 88

Chapitre IV. Résultats & discussions 89
IV.1. Introduction 89
IV.2. résultats de la simulation du premier modèle 89
IV. 2.1. Comparaison des modèles 92
IV. 2.2. Validation du modèle 95
IV.3. Résultats de la simulation de la deuxième modèle 96
IV.3.1. Etude des performances du modèle RNA 96
IV.3.2. Comparaison entre les valeurs expérimentales et calculée par le RNA 99
IV.3.3. Etude de sensibilité 101
IV.3.4. Expression mathématique du modèle neuronal optimisé 103
IV.3.5. Modèles du RML 104
IV.3.6. Comparaison entre les modèles RNA et RML 108
IV.4. Dimensionnement du système de dessalement NF/SWRO/PV 109
IV.4.1.Estimation de besoin énergétique de la station de dessalement 111
IV.4.2. Présentation du site 110
IV.4.3. Dimensionnement du système photovoltaïque 111
IV.4.4.Calcul la capacité de stockage de batterie 112
IV.5. Optimisation du système dessalement /photovoltaïque 112
IV.5.1. principe de la méthode 112
IV.6. Conclusion 114

Chapitre V. Etude technico-économique 116
V.1. Introduction 116
V.2. Calcul des indicateurs économiques 117
V.2.1.Modelisation de la faisabilité économique par la méthode TRI 118
V.2.2. Cout d'investissement de l'usine de dessalement SWRO 119

V.2.2.1. Facteurs influant sur les coûts de dessalement 119
V.2.2.2. Eléments de calcul économique 120
V.2.2.3. Coût de l'eau 122
V.3. Etude de cas 123
V.3.1. Données climatiques et l'énergie reçue 124
V.3.2 Présentation de de la station du dessalement osmose inverse/photovoltaïque 125
V.3.3. Présentation de l'approche utilisée 129
V.3.3.1. Scénario 1(On Grid) 129
V.3.3.2. Scénario 2 (Off Grid) 131
V.3.4. Récapitulation des résultats 132
V.4. Conclusion 132
Conclusion générale et perspectives 134
Références bibliographiques 136
Valorisation Scientifique

Abréviations

Symbole	Signification
AARD	Erreur relative absolue moyenne
AM	acrylamide
AMPS	2-acrylamido-2-methylpropane sulfonic acid
BSA	Albumine sérum bovine
BP	Back propagation
BWRO	Brackish water reverse osmosis
CBS	Composants de la balance du système
C_{inv}	Cout de l'investissement
C_{pv}	Cout du système photovoltaïque
$C_{o\&m}$	Cout de maintenance et opération
CSP	Concentrateur solaire photovoltaïque
DMAC	Distillation membranaire air gaz
DMD	Distillation membranaire directe
DMV	Distillation membranaire sous vide
DS	Déviation Standard
ED	Electrodialyse
ER	Energie Renouvelable
FI	Fouling index
FFNN	Feed forward neural network
IgG	From human serum
IR	Importance Relative
IT	Thermodynamique irréversible
LM	Levenberg–Marquardt
MAE	Erreur absolue moyenne
MD	Membrane distillation
MEA	Membrane électrodialyse anionique
MEC	Membrane électrodialyse Cationique
MED	Multi effect distillation
MF	Microfiltration
MLP	Multi layer percepton

MSE	Erreur moyenne quadratique
MSF	Multi stage flash
MVC	Mécanique compresseur vapeur
NF	Nanofiltration
NP	polystyrene
OI	Osmose Inverse
PA	Pression d'alimentation
PCTE	track-etched polycarbonate membrane
PES	Polyethersulfone
PMC	Perceptron Multi- Couches
PNO	Pseudo n^{eme} ordre
PPO	Pseudo premier ordre
PS	Polysulfone
PSL	Polystylene latex
PSO	Pseudo second ordre
PTM	Pression transmembranaire
PVDF	Polyvinylidene difluoride
PV	Photovoltaique
PX	Echangeur de pression
R	Coefficient de régression linéaire
$\mathbf{R_e}$	Nombre de Reynolds
RBF	Radial basis function
RLM	Régression Linéaire Multiple
RMSE	Erreur quadratique moyenne
RN	Réseaux de Neurones
RNA	Réseaux de Neurones Artificiels
RNFF	Réseaux de Neurones Feedforward
RSM	Reponse surface methodology
Sc	Nombre de Schmidt
$\boldsymbol{SDI}$	Silt density index
SGMC	Distillation membranaire à entrainement gazeux
$\boldsymbol{sh}$	Nombre de Sherwood
$\boldsymbol{SI}$	Silting index

SSS	sodium p-styrenesulfonate
STD	Standard deviation (écart type)
SVR	Support vector regression
SWRO	Seawater reverse osmosis plant
TDS	Total dissous solides
TRI	Taux de rendement interne
TVC	Compresseur de vapeur thermique
UF	Ultrafiltration
UDES	Unité développement des équipements solaire
VAN	Valeur actuelle nette
VC	Compresseur à vapeur

Nomenclatures et symboles

Lecture	Désignation	Unité
$\mathbf{A_{filtration}}$	Surface de filtration	(cm^2)
$\boldsymbol{A_i}$	Entrée de trésorerie de chaque année	(DA)
$\mathbf{A_m}$	Perméabilité membranaire en solvant (eau)	$(m^{-1}.s)$
$\boldsymbol{A_s}$	Perméabilité membranaire en soluté (sel)	$(m^{-1}.s)$
$\boldsymbol{A_{PV}}$	Surface de panneau photovoltaïque	(m^2)
$\boldsymbol{A_{PVM}}$	Surface de module photovoltaïque	(m^2)
C	Capital de l'investissement initial	(DA)
$\mathbf{C_A}$	Concentrations de soluté dans le flux d'alimentation	$(mol.m^{-3})$
$\boldsymbol{C_{in}}$	Concentration massique des substances chimiques dans le flux d'alimentation	$(kg.m^{-3})$
$\mathbf{C_M}$	Concentrations de soluté à l'interface	$(mol.m^{-3})$
$\boldsymbol{C_p}$	Concentration de soluté dans le permeat	$(mol.m^{-3})$
$\boldsymbol{C_R}$	Concentration de soluté dans le retentat	$(mol.m^{-3})$
$\boldsymbol{C_U}$	Capacité d'une seule batterie	(kwh)
$\boldsymbol{CES}$	Consommation énergétique spécifique	(kwh/m^3)
$\boldsymbol{D}$	Densité	(g/cm^3)
$\boldsymbol{d_h}$	Diamètre hydraulique	(m)
$\boldsymbol{D_{particle}}$	Diamètre de particule	(µm)
$\mathbf{E_C}$	Energie consommé	(kwh/m^3)
e	Rendement de la pompe à haute pression	(%)
g	Gravité spécifique de l'eau de mer	(m/s^2)
$\boldsymbol{G}$	Rayonnement solaire incident moyen	(w/m^2)
$\boldsymbol{G_{soc}}$	Rayonnement solaire sous les conditions opérationnelles standard	(w/m^2)
$\boldsymbol{H_f}$	Hauteur de pression	(m)
$\boldsymbol{I_{mp\ soc}}$	Courant du module sous les conditions opérationnelles standard	(A)
$\mathbf{J_v}$	Flux de solvant	$(l.h^{-1}m^{-2})$

$\mathbf{J_S}$	Débit de soluté	$(\mathrm{l.h^{-1}m^{-2}})$
$\boldsymbol{K}$	Coefficient de transfert de masse	
$\boldsymbol{k_1}$	Constante de la réaction d'adsorption d'équation premier ordre	$(\mathrm{min^{-1}})$
$\boldsymbol{k_2}$	Constante de la réaction d'adsorption d'équation seconde ordre	(mg/g min)
$\boldsymbol{k_n}$	Constant de la réaction	$(\mathrm{mg/g})^{1-\mathrm{n}}\mathrm{s^{-1}}$
$\boldsymbol{LCOW}$	Levelized cost of water (coùt de l'eau)	$(\mathrm{DA/m^3})$
$\boldsymbol{L_p}$	Permeabilité hydraulique	$(m^{-1}.s)$
$\boldsymbol{M}$	Masse membranaire	(g)
$\boldsymbol{N_a}$	Nombre des jours d'autonomie de la batterie	jour
P	Energie	$(\mathrm{kwh/m^3})$
PTM	Pression transmembranaire	(Bar)
$\boldsymbol{p}$	Pression	(Bar)
$\boldsymbol{P_{operation}}$	Pression opérationnelle	(Bar)
$\boldsymbol{P_{filtration}}$	Pression de filtration	(Bar)
$\boldsymbol{P_d}$	Profondeur de décharge	(-)
$\boldsymbol{P_{pvM}}$	Energie journalière moyenne des modules PV	(kwh/j)
$\boldsymbol{P_{des}}$	Energie requise par le dessalement	(kwh/j)
$\boldsymbol{P_{des,ep}}$	Energie requise par système d'échangeur de pression	(kwh/j)
$\boldsymbol{P_{des,turb}}$	Energie requise par système turbine	(kwh/j)
q (t)	Quantité adsorbée par unité de masse de la membrane	(mg/g)
$\boldsymbol{q_{max}}$	Quantité adsorbée maximum par unité de masse de la membrane	(mg/g)
$\mathbf{Q_A}$	Débit volumique d'Alimentation	$(\mathrm{m^3/h})$
$\mathbf{Q_P}$	Débit volumique de Permeat	$(\mathrm{m^3/h})$
R	Rétention	(%)
$\mathbf{R_m}$	Résistance due à la membrane	$(\mathrm{m^{-1}})$
$\mathbf{R_c}$	Résistance due au colmatage	$(\mathrm{m^{-1}})$
$\boldsymbol{S_m}$	Surface membranaire	$(\mathrm{m^2})$

T	Température	(K)
$\boldsymbol{T_c}$	Température réelle de cellule	(°C)
$\boldsymbol{T_{soc}}$	Température sous la condition opérationnelle standard	(°C)
t	Temps	(h)
$\boldsymbol{t_{hd}}$	Heures de lumière moyenne par jour dans la région	(h/jour)
U	Tension continue du système	(volt).
$\boldsymbol{V_{mpsoc}}$	Tension à la puissance maximale	(V)
$\boldsymbol{V}$	Volume de filtrat	(m^3/m^2)
$\boldsymbol{V_m}$	Volume de filtrat maximum	(m^3/m^2)
y	Taux de conversion	(%)

Lettres Grecques

Lecture	Désignation	Unité
ΔΠ	Différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane	(Bar)
ΔP	Perte de charge dans les modules	(Bar)
Π	La pression osmotique	(Bar)
α	Pente de la droite du meilleur ajustement linéaire	(-)
β	Ordonnée à l'origine de la droite du meilleur ajustement linéaire	(-)
$\boldsymbol{\delta}$	Facteur de polarisation	
$\boldsymbol{\delta_f}$	Conductivité d'alimentation	$(\mu S/cm)$
$\boldsymbol{\delta_p}$	Conductivité de permeat	$(\mu S/cm)$
$\boldsymbol{\sigma}$	Coefficient de réfection	(-)
$\boldsymbol{\rho}$	Masse volumique	(kg/m^3)
$\boldsymbol{\mu}$	Viscosité dynamique	$(Pa.s)$
$\boldsymbol{\mu_{p,mp}}$	Coefficient d'efficacité de température au point maximale de puissance	(%)
$\boldsymbol{\eta_{mod,soc}}$	Efficacité du module sous les conditions opérationnelles standard.	(%)
$\boldsymbol{\eta_e}$	Rendement d'échangeur de pression	(%)

η_{mod}	Efficacité du module PV au point maximal de la puissance	(%)
η_{pv}	Efficacité globale	(%)
η_{turb}	Rendement de la turbine	(%)
η_T	Efficacité totale	(%)
α_{BCH}	Efficacité de la charge de batterie	(-)
α_{BDCH}	Efficacité de décharge de batterie	(-)

Exposants

Lecture	**Désignation**
cal	Calculée
exp	Expérimentale
H	Couche Cachée (Hidden)

Indices

Lecture	**Désignation**
I	Élément i d'un vecteur
i,exp	Élément i d'un vecteur de valeurs expérimentales
i,cal	Élément i d'un vecteur de valeurs calculées
Ij	Croisement de la ligne i avec la colonne j d'une matrice
j	Élément j d'un vecteur
max	Maximum
min	Minimum
$\bar{x}$	Moyenne

Liste de tableaux

Chapitre I. Généralité sur le dessalement de l'eau de mer

Tableau I.1.	OI/NF comparaison en termes de pression, salinité et consommation d'énergie	13
Tableau I.2.	Comparaison entre le procédé de l'osmose inverse et électrodialyse	16
Tableau I.3.	Comparaison entre différents modules	19
Tableau I.4.	Variation du flux et de la conductivité de l'eau par les différents nettoyages acide/base	30
Tableau I.5.	Consommation d'énergie des principales technologies de dessalement	35
Tableau I.6.	Comparaison de la consommation énergétique spécifique de station de dessalement avec /sans système de récupération d'énergie	36
Tableau I.7.	Différentes stations de dessalement et leurs caractéristiques en Algérie	39

Chapitre II. Etat de l'art des procèdes de dessalement associés aux énergies renouvelables

Tableau II.1.	Fonctions d'activité les plus utilisables	47
Tableau II.2.	Calcul de l'évolution des capacités de dessalement de l'eau en 2019-2030	53

Chapitre III. Matériels et méthodes

Tableau III.1.	Conditions expérimentales rapportées par Ho et Zydney	66
Tableau III.2.	Données expérimentales extraient par logiciel Getdata. Graph.	68
Tableau III.3.	L'analyse statistique des entrées et des sorties de l'installation pilote de dessalement	72
Tableau III.4.	Données expérimentaux d'entrée et de sortie extraits avec logiciel Getdata	73

Chapitre IV. Résultats et discussion

Tableau IV.1.	Paramètres cinétiques et coefficients de corrélation de la régression non linéaire de l'équation du PFO, de la PSO et du modèle proposé pour l'adsorption de la BSA sur une membrane en polycarbonate track-etched (PCTE) pour différentes concentrations	90
Tableau IV.2.	Les paramètres cinétiques des résultats du logiciel MATLAB et des coefficients de corrélation pour la régression non linéaire obtenus pour les cas étudiés et la comparaison entre le nouveau modèle, PFO et PSO	95

Tableau IV.3.	Vecteur linéaire d'équation [équation linéaire : $y^{predict} = \alpha\, y^{exp} + \beta$, with α=pente, β = ordonnée à l'origine].	100
Tableau IV.4.	Poids et bias de RNA optimal	101
Tableau IV.5.	Vecteurs de régression linéaire (RML) issue de l'équation linéaire : équation linéaire : $y^{predict} = \alpha\, y^{exp} + \beta$.	104
Tableau IV.6.	Coefficients des modèles (conductivité de permeat, débit de permeat et taux de conversion) estimés par analyse de régression linéaire multiple RLM	107
Tableau IV.7.	Paramètres opérationnelles de la station	110
Tableau IV.8.	Tension recommandées pour les systèmes photovoltaïques en fonction de leurs puissances	111

Chapitre V. Etude techno-économique

Tableau V.1.	Estimations du coût des produits chimiques et des taux de dosage	121
Tableau V.2	Estimation du coût des produits chimiques et des taux de dosage	121
Tableau V.3.	Potentiel solaire en Algérie	123
Tableau V.4	Caractéristiques de l'unité d'osmose inverse	126
Tableau V.5.	Résultats physico-chimique de l'eau	127
Tableau V.6.	Caractéristiques des composants du système photovoltaïque	128
Tableau V.7.	Analyse globale des coûts du système	129
Tableau V.8.	Représentation des détails des frais (On Grid)	130
Tableau V.9.	Paramètres économiques du projet (On Grid)	130
Tableau V.10.	Représentation des détails des frais (Off Grid)	131
Tableau V.11.	Paramètres économiques du projet (Off Grid)	132

Liste de figures

Chapitre I. Généralité sur le dessalement de l'eau

Figure I.1.	La capacité totale des installations de dessalement dans le monde	6
Figure I.2.	Schéma de principe de la distillation Multi-Stage Flash distilla	8
Figure I.3.	Schéma de principe de la distillation multiple effet (MED)	9
Figure I.4.	Compression mécanique de vapeur à un seul effet	10
Figure I.5.	Classification des procédés barométriques membranaires selon la taille de séparation	11
Figure I.6.	Principe d'osmose inverse	13
Figure I.7.	Schéma de principe d'une unité d'osmose inverse	15
Figure I.8.	Principe de l' électrodialyse conventionnelle	16
Figure I.9.	Schéma d'un module plane	17
Figure I.10.	Schéma d'un module tubulaire	18
Figure I.11.	Présentation schématique d'un module fibre creuse	18
Figure I.12.	Structure interne d'une membrane à spirale	19
Figure I.13.	Procédés de distillation membranaire	21
Figure I.14.	Phénomène de polarisation de concentration	25
Figure I.15.	Mécanisme de colmatage	27
Figure I.16.	Prétraitement conventionnel typique	32
Figure I.17.	Récupération d'énergie par système à piston (échangeurs de pression	36
Figure I.18.	Récupération d'énergie par turbine Pelton	37
Figure I.19.	Capacité de dessalement de l'eau de mer dans le monde	38

Chapitre II. Etat de l'art des procèdes de dessalement associés aux énergies renouvelables

Figure II.1.	Nombre des publications traitant le prétraitement par Nanofiltration pour le dessalement de l'eau mer par procédé d'osmose inverse	42
Figure II.2.	Neurone biologique	46
Figure II.3.	Neurone formel	46
Figure II.4.	Réseau de neurone Multicouche	48
Figure II.5.	Consommation d'énergie de différents types de technologie de dessalement	50
Figure II.6.	Schéma de principe d'une unité PV-OI	51
Figure II.7.	Répartition géographique des systèmes solaires - OI	52
Figure II.8.	Nombre des publications traitant le dessalement de l'OI/ Energie solaire	52
Figure II.9.	Nombre de publication traitant l'hybride NF/OI/Energie Solaire	55

Chapitre III. Matériels et méthodes

Figure III.1.	Volume de filtrat en fonction du temps pour différentes concentrations	67
Figure III.2.	Organigramme du procédé de modélisation RNA	70
Figure III.3.	Système pilote d'usine de dessalement d'eau de mer trihybride NF/RO /MSF	71
Figure III.4.	Schéma de principe d'un modèle de réseau de neurones artificiel	79

Figure III.5.	Irradiation solaire distribué sur le moyen orient, golf et Arabie région	82

Chapitre IV. Résultats et discussion

Figure IV.1.	Régression non linéaire entre les valeurs expérimentale et calculée pour différentes concentration	92
Figure IV.2.	Profil d'adsorption de la BSA sur une membrane en polycarbonate track-etched (PCTE) tracée pour les modèles PFO et PSO et différentes concentration	93
Figure IV.3.	Comparaison d'équation pseudo 1erordre, second ordre et le nouveau modèle pour différentes concentrations	94
Figure IV.4.	Diagramme de MSE en fonction de nombre d'itération (epochs)	97
Figure IV.5.	Valeurs expérimentales et prédites :(a) conductivité de permeat ;(b) débit du permeat ;(c) taux de conversion	98
Figure IV.6.	Comparaison entre les données expérimentales et calculées par RNA : :(a) conductivité de permeat ;(b) débit du permeat ;(c) taux de conversion	100
Figure IV.7.	Pourcentage d'importance des paramètres d'entrées sur : :(a) taux de conversion ;(b) débit du permeat ;(c) conductivité de permeat	102
Figure IV.8.	Valeurs expérimentales et calculées d'après la méthode de RLM pour les sorties :(a) conductivité de permeat ;(b) débit du permeat ;(c) taux de conversion	106
Figure IV.9.	Comparaison des résultats de la base totale entre les modèles RNA et les modèles RLM	109
Figure IV.10.	Moyen mensuel de l'irradiation solaire Horizontal en Arabie saoudite	110
Figure IV.11.	Organigramme de méthode Gradient projeté	113
Figure IV.12	Résultats d'exécution du programme de la méthode gradient projeté.	114

Chapitre V. Etude techno-économique

Figure V.1.	Influence du prix de l'énergie électrique sur le cout de l'eau produite du dessalement	117
Figure V.2.	Composition des coûts pour une usine de dessalement de l'eau mer par osmose inverse	120
Figure V.3.	Augmentation des couts au cours des années	122
Figure V.4.	Carte de l'irradiation solaire en Algérie	124
Figure V.5.	Température ambiante du site de Bousmail	125
Figure V.6.	Irradiation solaire mensuelle du site de Bousmail	127
Figure V.7.	Prototype station de dessalement /photovoltaïque	126
Figure V.8.	Schéma d'un système de dessalement par procédé d'osmose inverse alimenté par Photovoltaïque	127
Figure V.9.	Schéma d'un système de dessalement dépond de réseau publique (On grid)	130
Figure V.10.	Schéma du 2eme scenario dépend d'un système d'énergie solaire (Off grid)	130
Figure V.11.	Taux de rendement interne TRI en fonction de prix de mètre cube d'eau produite	133

Introduction générale

Croissance démographique, réchauffement climatique et industrialisation, une variété de facteurs explique l'augmentation continue des besoins mondiaux en eau potable. Mais bien que de plus en plus convoitée, la ressource reste inégalement distribuée sur la planète.

D'ici 2050, la population mondiale devrait atteindre 9,6 milliards (ONU 2013), ce qui entraînera une augmentation encore plus rapide de la demande en eau. Aujourd'hui, entre 1,5 et 2 milliards de personnes vivent dans des régions où, pendant une partie de l'année l'eau douce disponible ne suffit pas face à la demande croissante. De nombreuses solutions ont été proposées pour aider à répondre à la demande croissante en eau, notamment une meilleure gestion des ressources en eau, une réutilisation accrue de l'eau et le dessalement (ONU 2019).

Afin d'assouvir leurs besoins croissants en eau potable, nombre de pays dépendent de plus en plus largement du dessalement de l'eau mer.

Le recours aux techniques membranaires est plus en plus important pour résoudre le problème d'approvisionnement en eau destinée à la consommation humaine, dont leurs techniques deviennent de moins en moins coûteuses.

Toutefois, la capacité mondiale de dessalement serait d'environ 107.892.000 m^3/j. Les pourcentages de la capacité globale selon la technologie de traitement sont 60%, 27%, 9% et 4% pour l'osmose inverse (OI), Distillation à multi flash stage (MSF), Distillation à multiples effets (MED) et l'électrodialyse respectivement. La technologie concurrente dominante est l'osmose inverse (OI), ayant d'une capacité de production mondiale allant de 600 à 2000 m^3/j (Qasim et al.2019). Cette technique nécessite uniquement de l'électricité, tandis que le dessalement thermique (MSF, MED) nécessite à la fois de l'électricité et de l'énergie thermique, ainsi que OI consomme moins d'énergie que MSF et MED (El-Ghonemy 2012).

Le coût de production du mètre cube pour le dessalement conventionnel à grande échelle est compris entre 1 et 2 \$/m^3. Tandis que, la décomposition des coûts de dessalement (SWRO) a montré que l'énergie représente environ 43% du coût total de production d'eau, contre 59% pour la grande usine de dessalement thermique (Ghaffour et al.2013 ; Burn et al.2015).

L'efficacité des membranes OI est souvent limitée en raison de colmatage de la membrane. Cependant, afin de réduire, dépasser ces limitations, plusieurs études ont récemment été montrées que le procédés de Nanofiltration peut être couplé à l'osmose inverse.

L'intégration de la membrane Nanofiltration au procédés de dessalement osmose inverse peut offrir plusieurs avantages, tels qu'une faible pression de fonctionnement, un flux de permeat élevé, une rétention élevée de sels anioniques multivalents et de matières organiques, un investissement relativement faible et des coûts de fonctionnement et de maintenance faibles

(Altaee et Sharif 2011 ; Bertels et al. 2011). Cependant, l'intégration de NF sera au niveau de l'étape de prétraitement. La compréhension fondamentale et quantitative des mécanismes de transfert et des performances des membranes d'osmose inverse et de nanofiltration sont nécessaires à la sélection, au dimensionnement, au fonctionnement et au contrôle des systèmes industriels. De nombreux modèles de transferts existent (thermodynamique irréversible, solubilisation-diffusion ou de pores), mais ils ne décrivent ou n'expliquent pas toujours correctement le procédé et les résultats obtenus dans le cas du transfert de molécules organiques nécessitent des modifications importantes. De plus, peu de travaux font le lien entre les mécanismes révélés par l'étude de solutions-modèles et les performances de traitement de l'eau de mer. Ils ne se concentrent que sur l'un ou l'autre de ces aspects.

Dans ce contexte, pour réduire la complexité de ces problèmes, des travaux ont été réalisé proposent des approches de modélisation permettant de diminuer le nombre d'expériences à effectuer afin de déterminer les paramètres optimaux pour le dessalement de l'eau de mer.

Depuis quelques décennies, derrière une résolution immédiate d'un problème donné est : la modélisation, avoir un modèle efficace, économique, sûre et réutilisable est l'objectif des différents travaux dans ce domaine. On peut classer la modélisation en deux grandes catégories : modélisation simple (linéaire ou non linéaire) basée sur les hypothèses existant dans littérature et modélisation numérique basée sur l'outil informatique qui devenu un alternative permettre de faciliter la tâche et d'effectuer les calculs scientifiques avec d'avantage de précision et un gain de temps significatif. Notamment les réseaux de neurones artificiels "RNA", les algorithmes génétiques, etc. L'efficacité, la fiabilité et la robustesse de ces méthodes par rapport aux difficultés de l'utilisation des approches classiques, ont été démontrées par leurs nombreuses applications dans différents domaines et sur tout le domaine du génie des procédés (Bouamar et Ladjal 2007). L'avantage des RNA est leur capacité à modéliser des procédés sans connaitre la phénoménologie mis en jeu. En citons aussi que les RNA permettre la modélisation des procédés non linéaire quel que soit le nombre des paramètres indépendants comparent à la méthode de régressions linéaires multiples (RLM) (Dreyfus et al. 2002).

Malgré des recherches et les efforts, le procédé de dessalement de l'eau de mer ou saumâtre reste un grand énergivore d'énergie fossile qu'impacte l'environnement. De nos jours, le dessalement associé aux énergies renouvelables devient une option attrayante en raison de sa viabilité de production d'eau douce, de la poursuite de l'amélioration technologique, de la

limitation des sources conventionnelles et de la compatibilité entre les besoins en eau et la disponibilité des ressources renouvelables, propre et respecte l'environnement.

De nombreux efforts ont été déployés à travers le monde pour trouver un couplage approprié entre le dessalement et les énergies renouvelables. L'adéquation d'une source d'énergie renouvelable donnée pour alimenter un système de dessalement spécifique dépend de son type et de l'ampleur de l'énergie obtenue. Différentes combinaisons entre les sources d'énergie renouvelables (ER) et les technologies de dessalement peuvent être appliquées. Les principales ressources d'Energie Renouvelable les plus courants sont l'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'énergie géothermique (Mahmoudi et al.2009).

A cet effet, l'objectif de ce modeste travail est de développer deux modèles mathématiques différents. Le premier est un modèle simple non linéaire basé sur des hypothèses réelles de filtration membranaire basé sur la rétention des particules à travers le media de la membrane, il permet de calculer le pseudo ordre de l'équation d'adsorption sans tenir compte du type d'espèces retenues. Il est exprimé par un ensemble d'équations non linéaires. Le deuxième est une modélisation numérique, est beaucoup plus développé consiste à appliquer l'apprentissage supervisé et les algorithmes de rétro propagation (back propagation BP) des réseaux de neurones artificiel (RNA) sur l'environnement du logiciel MATLAB, afin d'obtenir un modèle valide du système à commander les performances du système de dessalement hybride NF/OI au cours du temps. Les réseaux de neurones artificiels (RNA) ont été utilisés en raison de leurs flexibilités pour se conformer à tout type des données expérimentales et de leurs succès face à divers problèmes.

Afin de valoriser ces concepts, la structure de cette thèse a été effectuée comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à la description de dessalement de l'eau de mer, leur technologies de traitement existant, on donnera dans un premier temps un aperçu de généralités sur la technique de dessalement et les techniques membranaires, aussi un aperçu sur le dessalement en Algérie.

- Le deuxième chapitre est dédié à la présentation d'un état de l'art des différents travaux qu'ont abordé le dessalement de l'eau mer par système membranaire hybride d'NF/OI et de la revue critique sur les procédés de dessalement associés aux énergies renouvelables.

- Nous présentons dans le troisième chapitre les matériaux et les différentes procédures de modélisations utilisées. Il comptera deux axes : le premier axe sera consacré à la modélisation des performances du système de dessalement comprend deux types différents de modélisation, ainsi la première étude est une modélisation non linéaire basé sur des hypothèses réelles de filtration membranaire. C'est un nouveau modèle développé qui permis d'optimiser le $n^{ème}$ pseudo ordre de modèle d'adsorption à travers la membrane.

  La deuxième approche est une modélisation numérique basé sur les algorithmes de réseau de neurone artificiel (RNA) sur MATLAB permis de modéliser les performances du système hybride de dessalement NF/OI. Ainsi qu'une comparaison des résultats entre la simulation des RNA et la régression linéaire multiple (RLM) est établi.

  Le second axe faits saillants une présentation de l'énergie solaire par photovoltaïque, une compréhension de la cellule de photovoltaïque et ces caractéristiques, ainsi une modélisation photovoltaïque, les différents modèles de dimensionnement de système panneaux solaire afin d'alimenter la station de dessalement.

- Le quatrième chapitre est consacré aux résultats obtenus lors de la modélisation, une simulation avec les données expérimentales et validations du modèle proposé. Les résultats sont probants et nous ont permis de valider les deux modèles développés décrivant ce processus. Ainsi un dimensionnement et optimisation des besoins énergétiques de la station NF/OI associé au système photovoltaïque.

- Dans un cinquième chapitre, une étude technico-économique a été développé afin d'effectuer une configuration optimale du système de dessalement alimenté par l'énergie solaire photovoltaïque. Deux scenarios sont proposés : On Grid (système alimenté par réseau publique) et Off-Grid (système alimenté par photovoltaïque). Le calcul de taux de rendement interne (TRI) et le coût de l'eau produite, nous permettre d'évaluer la rentabilité de chaque configuration. Cette étude est effectuée au niveau de l'unité de développement des équipements solaire (UDES) à Bousmail Tipaza.
- On termine ce travail par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus ainsi que les études qui peuvent être envisagées à l'avenir.

Chapitre I
Généralité sur le Dessalement de l'eau

I.1. Introduction

La pénurie en eau, l'explosion démographique, le climat semi-aride ou aride des certains région et la réduction des ressources en eau conventionnelle, tous ces facteurs conduisent vers le recours à la technologie de dessalement de l'eau de mer. Le dessalement permet l'utilisation les sources de l'eau non conventionnelles l'eau de mer /eau saumâtres pour la production d'eau potable, en utilisant différent type d'énergie et divers techniques. Néanmoins, La capacité mondiale de dessalement installée augmentait de 55% par an.

En 2013, 150 pays avaient entrepris le dessalement pour augmenter l'approvisionnement en eau douce (Ghaffour et al. 2013).

Dans ce chapitre, une introduction générale à la technologie des membranes est présentée en termes de développement historique, de statut actuel et de perspectives futures.

I.2. Historique

Depuis des temps anciens on avait constaté qu'en portant à ébullition de l'eau saline on obtenait, par condensation de la vapeur de l'eau douce. Les marins grecs de l'antiquité distillaient déjà de l'eau de mer en utilisant l'énergie solaire.

La première application industrielle de l'évaporation-condensation a été faite à bord des navires à vapeur vers 1880. Bien que ce soit en 1920 que la première usine de dessalement par voie thermique fut installée à terre (Jeddah – Arabie Saoudite), ce n'est qu'à partir de 1960 que des usines de grande capacité voient le jour, principalement au Moyen-Orient (Boyé 2008).

Les usines de dessalement d'eau de mer utilisant le principe de l'osmose inverse apparaissent à la fin des années 1970. Elles sont tout d'abord adaptées aux faibles capacité de production, pour devenir petit à petit compétitives par rapport à la distillation, et ceci même pour les grandes capacités, du fait principalement de la diminution du prix des membranes et de leurs besoins en énergie électrique. Ainsi, début 2014, il a été mis en service la plus grande usine de dessalement en Algérie par OI (station Magtaa) avec une capacité de production moyenne de 500 000 m^3/j (MRE 2018).

I.3. Les technologies de dessalement

Le choix de la technologie utilisée pour le dessalement de l'eau dépend d'un certain nombre de facteurs spécifiques au site, notamment la qualité de la source d'eau, l'utilisation de l'eau produite, la taille de l'installation, les coûts d'investissement, les coûts énergétiques (Al-Subaie et al.2007).

Le dessalement de l'eau peut être réalisé par différentes techniques pouvant être classées en deux catégories selon le principe appliqué :

- Les procédés thermiques (par vaporisations) basés sur des changements de phase ;
- les procédés membranaires basés sur le transport de l'eau à travers des membranes semi-perméables.

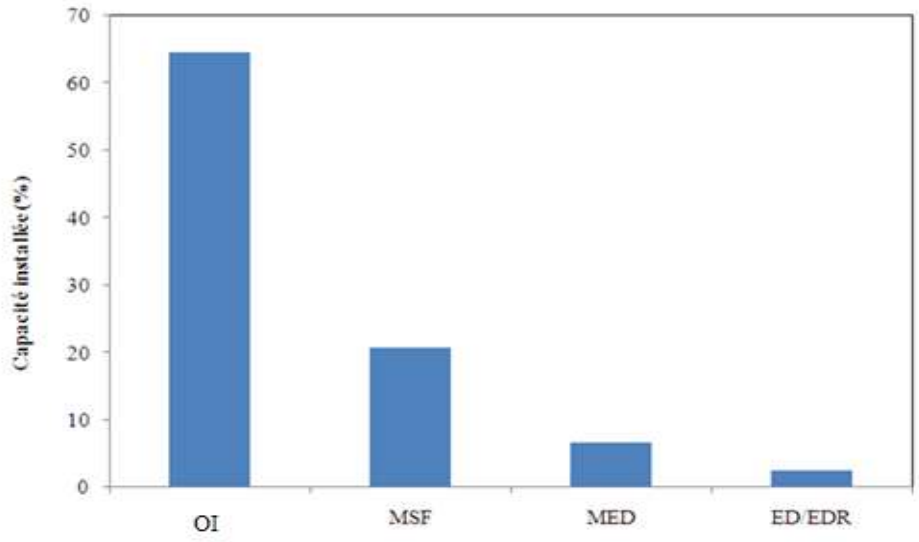


Figure I.1. Capacité totale des installations de dessalement dans le monde (Shemer et al.2017).

Il est clairement apparu que le procédé membranaire est le leader du marché. En effet le dessalement par l'osmose inverse (OI), représente 62% de la capacité totale suivi par le processus thermique : Multi stages flash (MSF) et MD avec 24% de la capacité totale. Les 16% restants sont divisé entre les autres procédés, comme l'électrodialyse (ED) avec 5% et compression de vapeur (VC) avec 5%, et d'autres systèmes à conception récente avec 4% (Al-Karaghouli et al.2009). Les principales sources d'eau d'alimentation pour le dessalement sont l'eau de mer (58%), eau souterraine saumâtre (23%), et d'autres sources telles que rivières et petits lacs de sel.

Le procédé d'osmose inverse nécessite de l'énergie électrique pour alimenter les pompes à hautes pression, par contre les procédés thermiques nécessitent l'énergie sous forme chaleur (Shemer et al.2017).

I.3.1. Les procédés thermiques

Le procédé de distillation consiste à chauffer de l'eau de mer pour évaporiser une partie. La vapeur d'eau produite ne contient pas de sels ; il suffit alors de la condenser pour obtenir de l'eau douce (Babu et al.2018). Il existe trois grands types de procédés de distillation :

- à effet multiple (MED) ;
- à multi flash (MSF) ;
- à compression de vapeur (VC).

Ce principe de dessalement très simple a été utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux.

L'inconvénient majeur des procédés de distillation est leur consommation énergétique importante liée à la chaleur latente de vaporisation de l'eau. En effet, pour transformer un kg d'eau liquide en un kg d'eau vapeur à température constante, il faut environ 2250 KJ. Afin de réduire la consommation d'énergie des procédés industriels, des procédés multiples effets qui permettent de réutiliser l'énergie libérée lors de la condensation ont été mis au point.

I.3.1.1. Le procédé de distillation par détentes successives (Multi Stage Flash MSF)

Ce procédé dit Flash consiste à maintenir l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage ; lorsqu'elle atteint une température de l'ordre de 120°C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où règne une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par détente appelée « Flash ». Une fraction de l'eau s'évapore puis va se condenser sur les tubes condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie en dessous des tubes. C'est l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation, l'ébullition s'arrête quand l'eau de mer a atteint la température d'ébullition correspondant à la pression régnant dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus faible. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans une série d'étages où règnent des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle (Ullah et Rasul 2019).

Pour chauffer l'eau de mer jusqu'à 120°C, l'eau de mer circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant d'abord par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est alors préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur d'eau. Elle est finalement portée à 120 °C grâce à de la vapeur à une température supérieure à 120°C produite par une chaudière ou provenant d'une centrale de production d'électricité (El-Ghonemy 2017).

On remarque lors du phénomène de flash que des gouttelettes d'eau salée peuvent être entraînées avec la vapeur, elles sont séparées grâce à un grillage qui limite le passage des gouttelettes qui retombent alors au fond de l'enceinte. L'énergie requise est principalement l'énergie thermique à fournir à la chaudière, cette énergie peut être peu coûteuse si on récupère de la vapeur basse pression à la sortie d'une turbine de centrale électrique (cogénération).

Il faut également fournir de l'énergie électrique pour les pompes de circulation de l'eau de mer. Le procédé MSF ne permet pas une flexibilité d'exploitation. Aucune variation de production n'est tolérée, c'est pourquoi ce procédé est surtout utilisé pour les très grandes capacités de plusieurs centaines de milliers de m^3 d'eau dessalée par jour (Bouchekima et al.1998).

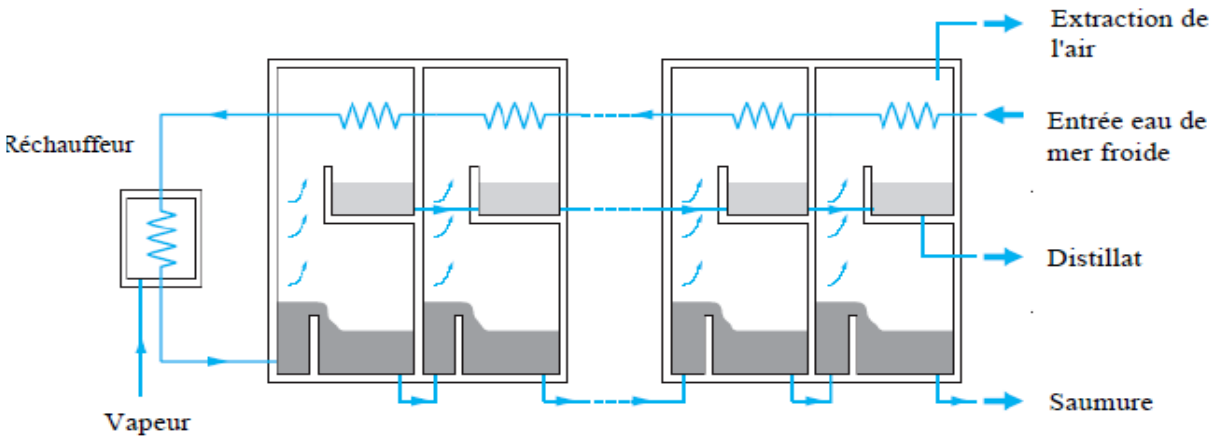


Figure I.2. Schéma de principe de la distillation Multi Stage Flash distillation (El-Ghonemy 2017).

I.3.1.2. Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effects Distillation MED)

Ce procédé est basé sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température variant entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau a lieu sur une surface d'échange, contrairement au procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs (Madani et al.1994). La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude provenant d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi produite dans le 1er effet est condensée pour produire de l'eau douce dans le 2ème effet où règne une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue dans le 2ème effet et ainsi de suite (voir figure I.3) (Al-Karaghouli et al.2009).

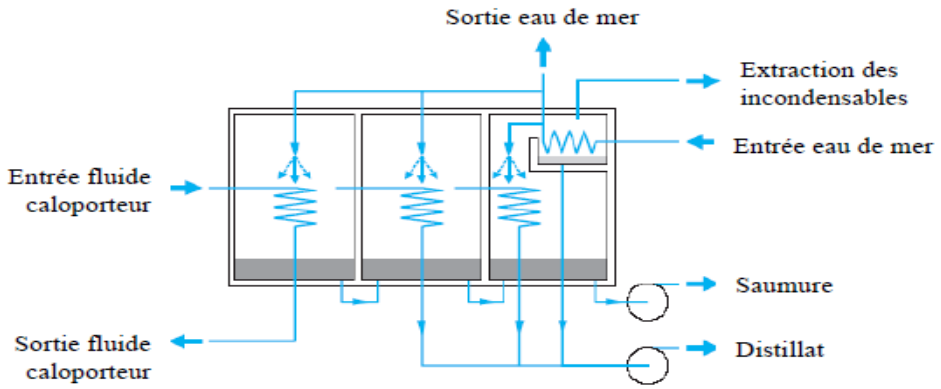


Figure I.3. Schéma de principe de la distillation Multiple Effect (MED) (Al-Karaghouli et al. 2009).

I.3.1.3. Multi-effets avec compression de vapeur

Compression de vapeur(VC) est un processus dans lequel la chaleur nécessaire à l'évaporation de l'eau provient de la compression (au lieu du chauffage direct). L'eau d'alimentation entre par un échangeur de chaleur et de la vapeur est générée dans l'évaporateur. Ensuite, la vapeur est comprimée, soit par des moyens mécaniques (MVC) (Al-Karaghouli et al. 2013**)** soit thermiques (TVC). La compression augmente la température de la vapeur afin qu'elle serve de source de chaleur à l'évaporateur. Le flux de saumure est également divisé, une partie étant mélangée à l'eau d'alimentation entrante.

La plage typique de capacité de production de VC est comprise entre 100 et 3000 m^3/jour pour le MVC et entre 10 000 et 30 000 m^3/jour pour le TVC. Le VC est souvent utilisé en combinaison avec d'autres processus tels que MED pour améliorer l'efficacité globale (Blagin et al.2018).

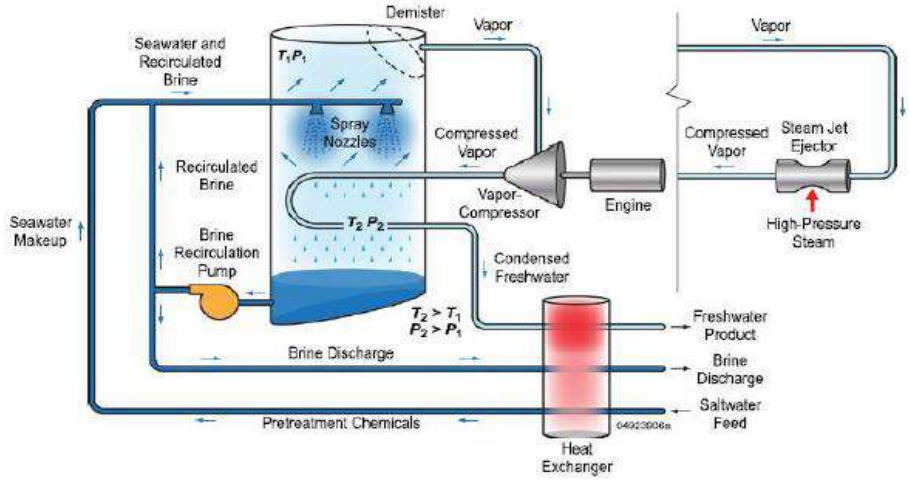


Figure I.4. Compression mécanique de vapeur à un seul effet (Al-Karaghouli et al.2013**).**

I.3.2.Filtration membranaire

La science et la technologie des membranes ont connu un long développement historique dans les études en laboratoire avant de réaliser leur première application industrielle significative dans les années 1960.

La filtration membranaire est une technique de séparation liquide/liquide, liquide/solide, liquide/gaz ou gaz/gaz qui fait intervenir une membrane semi-perméable et sélective sous l'effet d'une force motrice. Cette force motrice peut être soit un gradient de pression (cas de l'osmose inverse (OI), de la Nanofiltration (NF), de l'ultrafiltration (UF) et de la microfiltration (MF), qu'il repose sur une différence de pression entre le milieu et la membrane, appelée pression transmembranaire (PTM) (Chollom et al. 2015). Un gradient de concentration (cas de la dialyse) ou un gradient de potentiel électrique (cas de l'électrodialyse).

I.3.2.1. Les techniques membranaires à gradient de pression

Les constituants qui sont plus petits que les pores de la membrane sont capables de passer à travers la membrane sous l'effet d'une pression appliquée tandis que les substances et les molécules de taille plus importante sont retenues par la membrane.

La figure I.5 illustre les différents domaines d'application membranaires à gradient de pression.

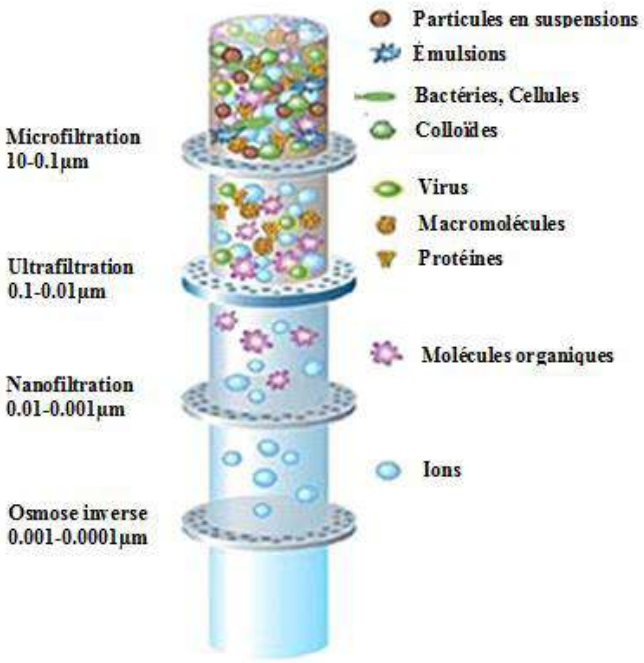


Figure I.5. Classification des procédés barométriques membranaires selon la taille de séparation (Metaiche2014).

I.3.2.1.1.Microfiltration (MF)

La séparation par microfiltration concerne en générale les particules en suspension, les micro-organismes, macromolécules (polymères) pour laquelle la taille des pores de membranes se situant entre 0.1 et 10 µm, les pressions appliquées sont très faible inferieur de 2 bars pour éviter le colmatage (Zeman et Zydney 2017).

I.3.2.1.2. L'ultrafiltration (UF)

UF est une technique utilise des membranes macroporeuses, dont les diamètres des pores sont entre 1 et 100 nm, et les pressions sont supérieures à celle rencontrées en microfiltration entre 1-10 bars. Cette technique permettre la séparation des macromolécules et d'espèces colloïdales (polymères, protéines) (Wu et al.2017).

I.3.2.1.3.Nanofiltration (NF)

NF est une technique de séparation par membranes dont le champ d'application se situe entre ceux de l'osmose inverse et de l'ultrafiltration. De plus, cette technique retient les sels bivalents et les molécules de l'ordre de 0.001 µm et nécessite une pression de travail de 10 à 25 bars .comparée à l'osmose inverse les membranes de nanofiltration sont moins dense ce qui permet d'obtenir des flux de perméat supérieurs pour des pressions inferieures, cela implique que ce procédé est moins couteux et moins consommateur d'énergie.

La Nanofiltration a été développé pour la première fois à la fin des années 1970 comme alternative de la membrane Osmose Inverse, elle a été utilisée pour la déminéralisation du lactosérum dans l'industrie laitière. Jusqu'en 1990, les membranes NF avaient trouvé leurs applications les plus diverses dans les industries de dessalement de l'eau de mer et l'eau saumâtre, de l'alimentation, du textile et des industries extractives (Chollom et al.2015, Paulson 2015). Ce procédé a l'avantage de laisser passer les ions monovalents et les composés organiques non ionisés de masse molaire inférieure à environ 200 - 250 g/mol, mais les ions divalents (Calcium, Magnésium, sulfates...) et les composés organiques non ionisés de masse molaire supérieure à environ 200 – 250 g/mol sont fortement retenus, ayant des pores plus ouverts et fonctionnant avec des pressions plus basses (Tableau I.1) (Berland et Juery 2002 ; Sommariva 2010). En raison de sa faible consommation d'énergie, le rendant moins coûteux que l'osmose inverse.

Les membranes commerciales d'osmose inverse et de nanofiltration sont préparées par les mêmes matériaux. Actuellement, les membranes à couche mince en polyamide sont prédominantes le marché.

Tableau I.1. OI/NF comparaison en terme de pression, salinité et consommation d'énergie (Ettouney etWilf, 2009 ; Sommariva2010).

Membrane	TDS de l'eau Entrée membrane (ppm)	Pression Entrée membrane (bar)	Consommation énergétique (kwh/m^3)
Nanofiltration	<3500	7-10	0,5
OI eau de saumâtre	<10 000	10-20	0,8
OI eau de mer (pays méditerranéens)	35 000	60-70	3,5
OI eau de mer (pays de golf)	38 000-45 000	75-85	4,5

I.3.2.1.4. L'osmose inverse (OI)

Parmi les procédés membranaires, seule l'osmose inverse est adaptée au dessalement de l'eau de mer. Lorsque l'on place une membrane semi-perméable entre deux compartiments remplis d'eau de concentration en sels dissous différents, les molécules d'eau ont tendance à migrer de l'eau la moins concentrée vers la plus concentrée de façon à diminuer sa salinité.

Le phénomène est appelé « osmose directe ». Cette migration s'arrête lorsque la différence des niveaux des deux compartiments a atteint une valeur correspondant à la pression osmotique π (Akther et al. 2015). Pour réduire la concentration en sels dissous d'une eau il suffit d'appliquer une pression supérieure à la pression osmotique afin de forcer les molécules d'eau à travers la membrane semi-perméable, il s'agit alors d'osmose inverse selon la démonstration de la figureI.6 (Oyoh 2016).

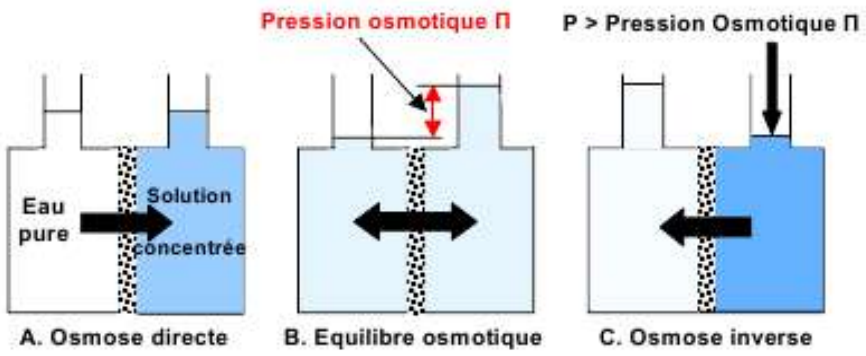


Figure I.6. Principe d'osmose inverse (Oyoh 2016).

Un procédé d'osmose inverse est le cœur du procédé de dessalement. L'osmose inverse consiste donc à appliquer à l'eau salée une forte pression pour la forcer à traverser une série de membranes semi-perméables. Les sels sont retenus par ces membranes qui sont généralement enroulées en spirale à l'intérieur d'un tube afin d'augmenter la surface de filtration, tandis que seules les molécules d'eau les traversent. Une unité de membrane OI (figure I.7) se compose de quatre éléments de base (Akther et al. 2015) :

- Prétraitement ;

- Pompes à haute pression ;

- Bloc membrane ;

- Post-traitement.

Le Prétraitement a pour objectif la réduction du colmatage, l'augmentation de la durée de vie des membranes, l'amélioration de la qualité de l'eau produite et la maintenance des performances de l'osmose inverse. Les procédés de prétraitement peuvent être divisés en deux catégories : les prétraitements physiques et les prétraitements chimiques. Les premiers incluent les préfiltres mécaniques, les filtres à cartouche, la filtration à sable et la filtration membranaire. Le prétraitement chimique consiste en l'addition d'inhibiteurs d'entartrage, de coagulants, de désinfectants et de poly-électrolytes (Berland et Juery 2002). (Plus de détail est présenté en section I.7). La pompe haute pression permet ensuite d'injecter l'eau de mer sous une pression de l'ordre de 50 à 80 bars qui dépend de la salinité et de la température de l'eau dans le module d'osmose inverse (Khawaji 2008). Les deux modules commerciaux les plus fréquents dans le marché sont les modules spiraux et à fibres creuse. Au sein des modules spiraux (figure I.7), une membrane plane est enroulée sur elle-même autour d'un tube poreux (le collecteur du perméat) qui recueille le filtrat. On obtient ainsi un cylindre multicouche où le perméat s'écoule selon un chemin spiralé vers le tube poreux tandis que l'alimentation circule axialement dans les canaux (Arzate 2008).

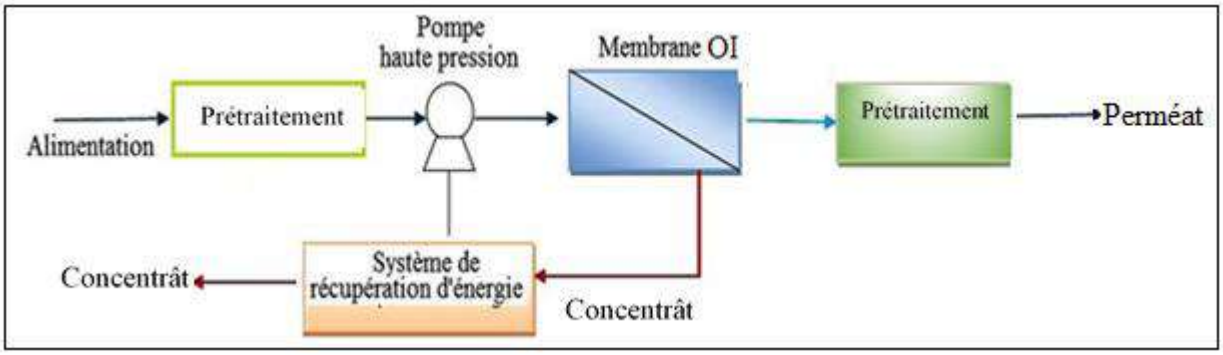


Figure.I.7. Schéma de principe d'une unité d'osmose inverse.

I.3.2.2. Techniques membranaire à gradient de potentiel électrique

L'électrodialyse est le procédé le plus largement appliqué parmi les techniques électro-membranaires (Singlande 2006). Il a été commercialisé dans les années 1960, environ dix ans avant l'introduction de l'osmose inverse pour le dessalement de l'eau de mer. En termes d'installations actuellement implantées, la plus importante application de l'électrodialyse reste celle de la production d'eau potable à partir d'eau saumâtre (Balmann 2006). C'est une technique utilisant un empilement de membranes échangeuses d'ions disposées en alternance orthogonalement à un champ électrique (Bribieska 2005). Les espèces ionisées, minérales ou inorganiques, dissoutes, telles que les sels, les acides ou les bases, sont transportées à travers des membranes ioniques sous l'action d'un courant électrique. Dans une unité d'électrodialyse, les membranes cationiques (perméables aux cations) MEC et les membranes anioniques (perméables aux anions) MEA sont disposées parallèlement et de manière alternée (figure I.8). Sous l'action du champ électrique appliqué à l'aide d'une anode et d'une cathode, les MEC bloquent les anions et laissent passer les cations, tandis que les MEA bloquent les seconds et laissent passer les premiers. Il se crée alors, des compartiments de concentration (concentrât) et d'autres de dilution (diluats). Les solutions sont renouvelées dans les compartiments par une circulation parallèle au plan des membranes. L'injection du courant dans le système est assurée par deux électrodes parallèles au plan des membranes et placées aux extrémités de l'électro-dialyseur (Hamani 2013).

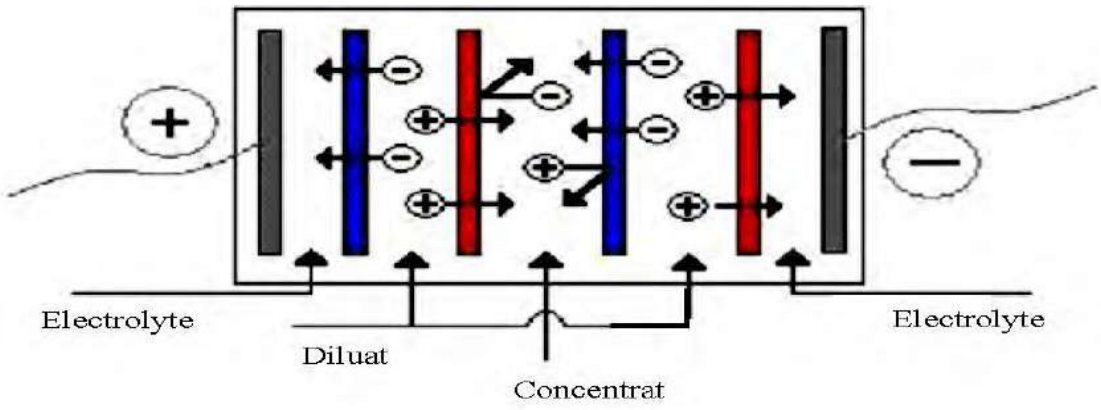


Figure I.8. Principe de l'électrodialyse conventionnelle (Hamani 2013)

Tableau I.2. Comparaison entre le procédé de l'osmose inverse et électrodialyse (Morsli 2013)

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

I.3.3. Configuration des modules à membrane

Pour la mise en œuvre, les membranes sont assemblées sous forme de modules regroupant généralement plusieurs membranes, Cependant en OI, les modules spiralés sont majoritairement employés, ainsi que les fibres creuses. Ces deux types de modules ont l'avantage d'être compacts et peu chers, nécessitent une faible consommation énergétique (Berland et Juery 2002).

Actuellement il existe trois types de modules commercialisés :

- Module à membrane plan ;
- Module à membrane spiralé ;
- Module à membrane fibre creuse.

I.3.3.1. Module à membrane plane

Cet arrangement est le plus ancien et le plus simple, les membranes sont rigides et ne peuvent être enroulées, elles ne sont donc utilisables que dans des dispositifs de type filtre presse (membranes en feuille montées de part et d'autre de cadres rigides, empilés).En raison de leur coût relativement élevé ils ont remplacés dans les procédés d'osmose inverse par les modules spiralés et les modules fibres creuses (Charcosset 2012).

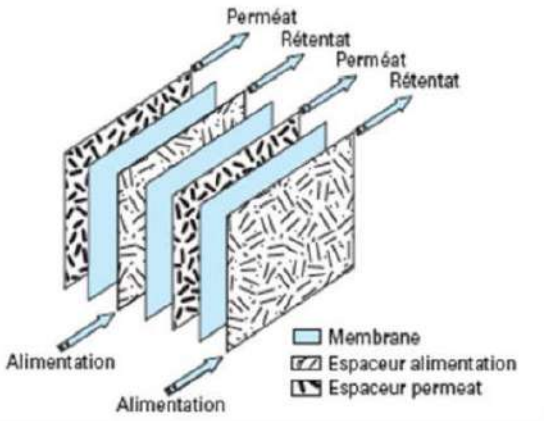


Figure I.9. Schéma d'un module plane (Remigy2005)

I.3.3.2. Module à membrane tubulaire

Les modules tubulaires comme leur nom l'indique, ils sont constitués par des faisceaux de tubes encastrés dans un support résistant (inox, PVC ou fibre de verre en forcée). Le diamètre intérieur de chaque tube est généralement compris entre 4et 25 mm, les dimensions étant régies essentiellement par la viscosité du fluide à traiter. La couche filtrante est localisée à l'intérieur des tubes, supportée par une trame macroporeuse rigide. Les membranes sont généralement de nature minérale (type céramique le plus souvent).Ils sont basés sur une technologie simple, facile d'utilisation et de nettoyage, mais ils sont grands consommateurs d'énergie pour une faible surface d'échange par unité de volume (Fane et al.2011).

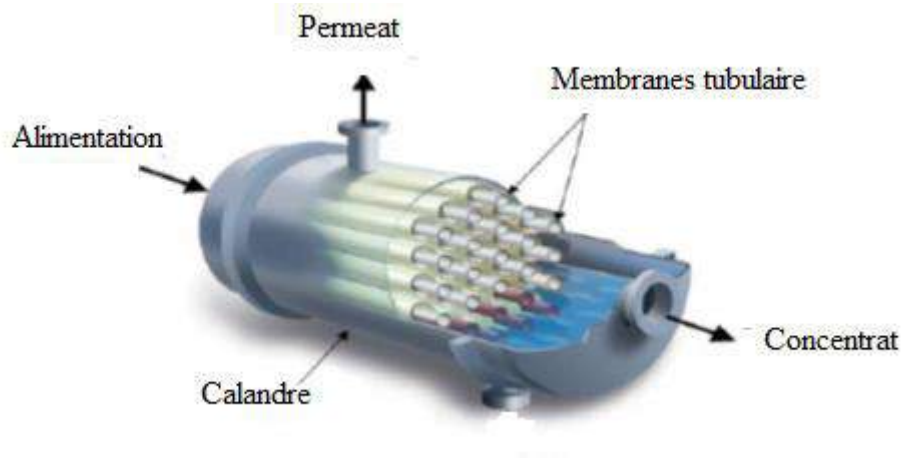


Figure I.10. Schéma d'un module tubulaire (Boucif 2012).

I.3.3.3. Module à membrane fibre creuse

Ce sont des membranes sous forme des fibres en U dont le diamètre est de l'ordre du mm sont mises en faisceau. Les faisceaux ainsi obtenus sont encollés aux extrémités de façon à assurer l'étanchéité entre le compartiment (perméat) et l'alimentation. L'alimentation peut se faire à l'intérieur (interne externe) ou à l'extérieur (externe-interne) des fibres creuses, sont peu coûteux, sensible au colmatage et ils sont Inapplicables hors traitement de l'eau (Charcosset 2012 ; Cui et al. 2010).

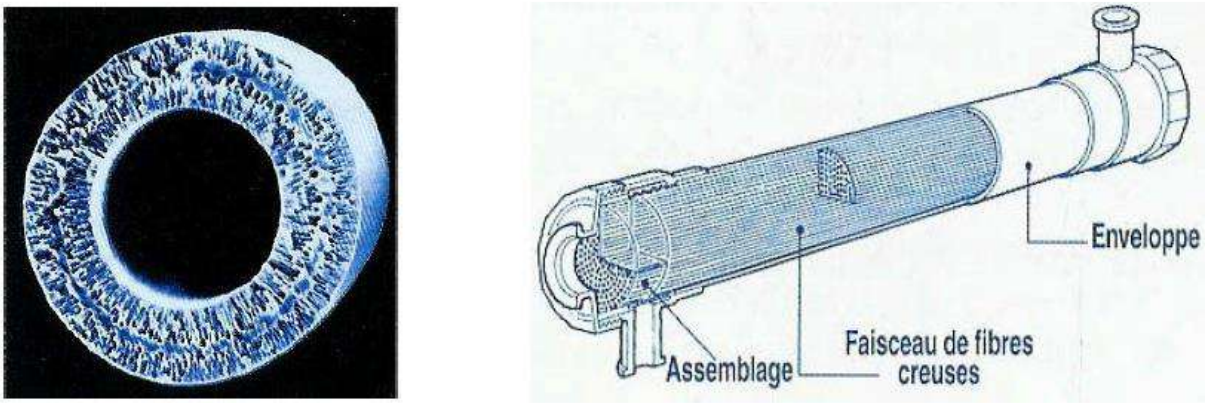


Figure I.11. Présentation schématique d'un module fibre creuse (Antoine 2004)

I.3.3.4.Module à membrane spirale

Pour diminuer les surfaces nécessaires à l'implantation des membranes, celles-ci sont configurées en spirale, comme l'indique la figure I.12. Les zones de circulation de l'eau d'alimentation et de reprise du perméat sont aménagées à l'aide de grilles placées entre les membranes et enroulées avec elle pour former des éléments aux dimensions standardisées (Boulehdid 2008). Cet arrangement est très compact et convient pour les traitements à haute pression. Ces modules sont largement utilisés dans les procédés de traitement d'eaux usées et d'eaux potables. Le principal inconvénient des modules spiralés est qu'ils sont beaucoup plus sensibles au colmatage (Cui et al. 2010).

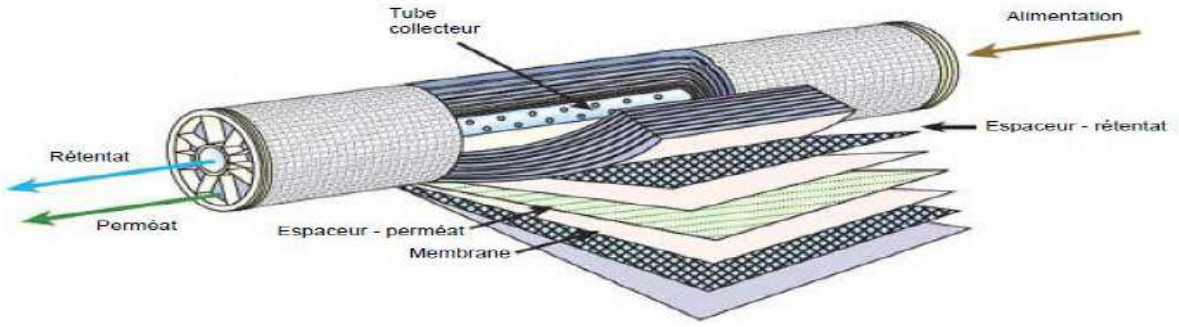


Figure I.12. Structure interne d'une membrane à spirale (Antoine 2004).

Tableau I.3. Comparaison entre différents modules (Dach2008).

Forme de Module	**Fibre Creuse**	**Tubulaire**	**Plane**	**Spiral**
Diamètre hydraulique (mm)	0,1-1	4-25	1-5	0,8-1,2
Matériaux de membrane	Organique	Minérale	Organique Inorganique	Organique
Membrane de Remplacement	Module	Tube	Feuille	Cartouche
Coût	Elevé	Modéré	élevé	Faible
Maintenance	Difficile	Facile	Facile	Difficile
Densité de compactage (m^2/m^3)	Supérieur 9000-30000	1000	Inferieur 100-400	Supérieur 300-1000

I.4. Distillation membranaire (DM)

La Distillation Membranaire (DM) est une combinaison de procédés thermique et membranaire. La membrane met en contact direct un liquide côté alimentation et une phase liquide ou gazeuse côté perméat. La force de transfert du procédé est la différence de pressions partielles entre les deux côtés de la membrane qui provoque une évaporation du côté alimentation. La membrane sert uniquement de support à l'interface liquide-gaz et n'intervient pas dans le procédé séparatif. La membrane macroporeuse doit être hydrophobe afin d'empêcher le liquide de pénétrer à l'intérieur des pores de la membrane (figure I.13) (Abu-Zeid et al. 2015). On recense quatre variantes principales du procède DM :

- Distillation membranaire directe (DMD) ;
- Distillation membranaire air gap (DMAC) ;
- Distillation membranaire sous vide (DMV) ;
- Distillation membranaire à entrainement gazeux (SGMD).

Dans la DMD, le condensat distillé refroidi est réinjecte du côté distillat de la membrane, de sorte que la vapeur passant à travers la membrane depuis le côté alimentation entre directement en contact avec le flux du liquide condensé où la vapeur se condense. A l'opposé, dans la DMAC les cuves d'eau d'alimentation et de refroidissement sont séparées par un entrefer où la vapeur s'accumule et se condense sur le mur extérieur du canal de l'eau de refroidissement. Pour la DMV, un vide d'air est créé du côté distillat de la membrane afin d'augmenter le flux de la vapeur distillée. Dans ce cas, le distillat s'accumule dans la phase vapeur puis se dirige sur un condensateur externe où a lieu la condensation pour produire l'eau distillée. La SGMD a le même objectif (augmenter le flux de vapeur distillée), mais dans ce cas, c'est un gaz qui entraine cette dernière (Gore 1982).

Le procédé de DM fut breveté pour la première fois en 1963 par B.R.R. Bodell aux USA et la première publication date de 1967 (Khawaji 1997). Cependant, les recherches furent rapidement abandonnées en raison des faibles productions de perméat comparées à l'OI et de l'absence de membranes adaptées et utilisables pour ce nouveau procédé. Dans les années 1980, les recherches sur la distillation membranaire connurent un renouveau avec l'apparition sur le marché de nouvelles membranes poreuses et hydrophobes qui conviennent parfaitement à la DM.

L'intérêt pour la DM a connu une envolée à partir des années 1990 avec un nombre toujours croissant de publications sur le sujet (Méricq 2009). Certains aspects de la DM ont été

largement étudiés, tel que l'influence des conditions opératoires tandis que d'autres comme le colmatage et les analyses énergétiques n'ont été abordés que rarement (Jambi etWie1989).

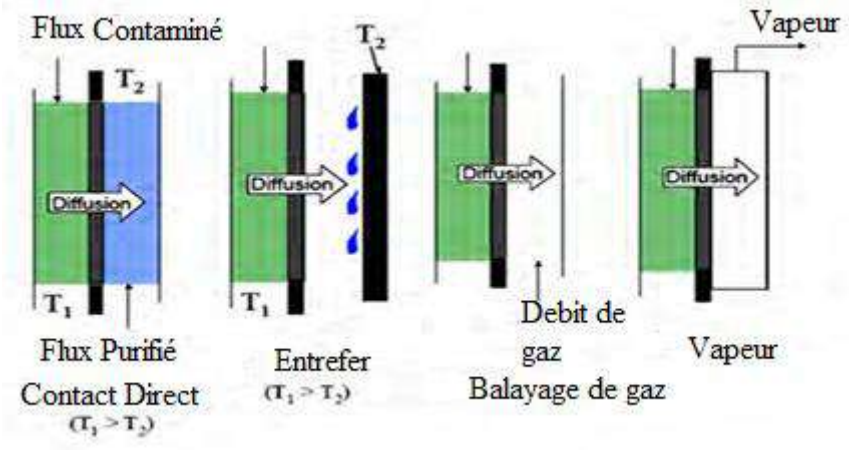


Figure I.13. Procédés de distillation membranaire (Gore 1982).

I.5. Dessalement par procédé hybride Nanofiltration/Osmose Inverse

D'autres types de membranes comme la Nanofiltration NF ont été suggérés comme alternative au Osmose inverse OI pour le dessalement de l'eau de mer où le principal avantage de la NF est de réduire la consommation d'énergie en raison de la plus grande perméabilité du NF comparée à la OI (Altaee et Sharif 2011 ;Bartels et al. 2011). Il présente un taux de rejet modéré entre OI et ultrafiltration (UF), avec des taux de rejet plus élevés pour les ions divalents supérieurs à 98% selon la structure de la membrane (Alnouri et Linke 2013).Cependant, la mise en œuvre de procédé hybride Nanofiltration/Osmose Inverse par rapport au procédé d'osmose inverse seule a conduit à des résultats particulièrement intéressants : un taux de rétention en matières organiques élevé (70 %) et un colmatage très réduit.

I.5.1. Mécanismes de transport de NF/OI

Afin de prédire les débits de solvants et de solutés à travers les membranes Nanofiltration/osmose inverse, il faut comprendre le mécanisme de transport des solvants et des solutés. Un modèle est proposé pour décrire le transport à travers les membranes NF/OI. Le modèle est basé sur la thermodynamique irréversible et considère la membrane comme une "boîte noire" séparant deux phases loin de l'équilibre, tenir en compte la propriété de la membrane (Jye et Ismail 2016).

I.5.1.1. Modèle thermodynamique irréversible (IT)

Le modèle de la thermodynamique irréversible (IT) est l'approche la plus générale à la description de phénomènes de transport dans les systèmes membranaires (Staverman 1952 ; Spiegler et Kedem 1966 ; Kedem et Katchalsky 1963 ; Meares et al.1972 ; Klinowski et al.1974 ; Barannowski 1991).

Les modèles thermodynamiques irréversibles décrivent le transport comme un processus irréversible qui produit continuellement une entropie et dissipe de l'énergie libre. Cette classe des modèles est utile, en particulier lorsque la structure d'une membrane n'est pas connue et que le mécanisme de transport à l'intérieur de la membrane n'est pas complètement maîtrisé (boite noir).

Le modèle basé sur la thermodynamique irréversible a été développé par Kedem et Katchalsky (1958, 1963). Selon le modèle de Kedem – Katchalsky, le flux de solvant J_v et le flux de soluté J_s, de solutions aqueuses contenant un seul soluté sont exprimés par les équations suivantes (Spiegler et Kedem 1966 ; Abdelkader et al.2018) :

$$J_v = L_p(\Delta P - \sigma_i \Delta\pi) \quad \text{(I.1)}$$

$$J_S = P_s \Delta C_s + (1 - \sigma_i) J_v C_{int} \quad \text{(I.2)}$$

Avec :

L_p: Perméabilité hydraulique (m^{-1}. s)

σ_i: Coefficient de réfection.

L'équation (I.1) représente la diffusion et la deuxième équation (I.2) représente la convection (Wang et al. 1997 ;).La diffusion du soluté dépend de sa concentration alors que la convection est proportionnelle à la pression appliquée. Sur la base du modèle de transport phénoménologique simple, il convient de comprendre que la rétention dépend non seulement de débit mais aussi de la concentration en soluté. Spiegler et Kedem ont en outre exprimé le flux de soluté, $J_s$sous une forme différentielle lorsqu'il existe une différence de concentration élevée entre le retentât et le perméat :

$$J_s = -P' \left(\frac{dc_i}{dx}\right) + (1 - \sigma) J_v \overline{C_{int}} \quad \text{(I.3)}$$

P' : Perméabilité locale de soluté et donnée par l'expression suivante : $P' = P_s dx$

Les paramètres inconnus sont σ *et* P_s peuvent être obtenus en ajustant les données expérimentales de R en fonction de débit de perméat à la solution analytique de l'équation de SKK en tenant compte de coefficients constants pour une solution d'un seul sel. On dit ensuite que les coefficients ajustés représentent les valeurs des coefficients de transport pour la composition de sel et sa concentration dans la solution d'alimentation sont évaluée en ajustant les données pour une solution de différentes concentrations des sels (Chaabane et al. 2007). Bien que la concentration de polarisation soit négligée ce modèle est largement utilisé car il décrit bien les résultats expérimentaux tout en étant simple d'utilisation.

La pression osmotique $\Delta\pi$ de l'Eq (I.1) peut être défini plus précisément par l'équation de Van't Hoff comme suit (El KHabbaze 2008) :

$$\Delta\pi = \vartheta RT(C_{i,0} - C_{i,p}) \tag{I.4}$$

I.5.1.1.2. Taux de rétention (sélectivité)

Le taux de rétention R(%) reflète la capacité de rétention des solutés et la sélectivité de la membrane.la rétention tout le long du module membranaire est la moyenne des concentrations d'alimentation du module c_A et en sortie de module c_p. La rétention est exprimée suivant l'équation ci-dessous (Jain et al. 2004 ; Sagne 2008) :

$$R = \frac{C_A - C_p}{C_A} = \frac{\sigma(1-F)}{1-\sigma F} \tag{I.5}$$

$$F = \exp\left(-\frac{1-\sigma}{P_s}\right) - J_v \tag{I.6}$$

Eqs. (I.5) et (I.6) sont les dernières expressions du modèle SKK. R est la rétention et J_v le flux de perméat. Pour simplifier le calcul, l'Eqs. (I.5) et (I.6) peuvent être réorganisés pour donner l'expression suivante :

$$\frac{R}{1-R} = \frac{\sigma}{1-\sigma}(1 - \exp(-\frac{1-\sigma}{P_s})J_v \tag{I.7}$$

I.5.1.1.2. Taux de conversion

Le taux de conversion par définition (Y) c'est la fraction entre le débit de perméat produit par rapport au débit d'alimentation traitée (Maurel 2006).

$$Y = \frac{Q_p}{Q_A} \tag{I.8}$$

I.5.1.1.3. Densité de flux de perméat

La vitesse de perméation ou la densité de flux de perméat représente la productivité de perméat par rapport à la surface de membrane mise en œuvre. La densité de flux de perméat J_p est le rapport du débit de perméat Q_P par unité de surface membranaire S_m (Maurel 2006) :

$$J_p = Q_P/S_m \quad (I.9)$$

I.5.1.1.4. Pression transmembranaire

Le calcul de la pression transmembranaire s'effectue en tenant compte de la moyenne des pressions d'alimentation P_A (pression en entrée) et de retentât P_R (Pression en sortie), de laquelle on soustrait la pression du perméat P_p (Gavach 2010).

$$P_{TRM} = \frac{P_A + P_R}{2} - P_P \quad (I.10)$$

I.6. Facteurs de limitation de la performance membranaire

Nous définissons sous le terme des facteurs limitant, l'ensemble des phénomènes qui limitent le flux à travers la membrane, citons en premier lieu le phénomène de polarisation de concentration, le colmatage (fouling), notamment l'entartrage et colmatage organique (biofouling).

I.6.1. Phénomène de polarisation de concentration

La polarisation de concentration est un facteur important influe directement sur la performance de procédé d'osmose inverse.

Elle est la conséquence de l'accumulation de solutés à la surface de la membrane qui engendre un gradient de concentration. Celui-ci entraine un flux rétrodiffusion de soluté qui tend à équilibrer les concentrations. L'équilibre entre le flux convectif et le flux diffusif conduit à un profil de concentration sur distance à la paroi correspondant à l'épaisseur de la couche polarisée (Sagne 2008 ; Sablani et Goosena 2001). La figure I.14 ci-dessous correspond au profil de la polarisation de concentration.

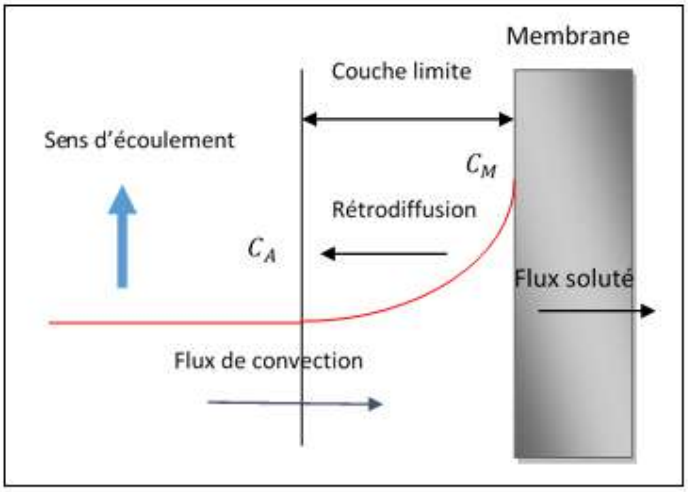


Figure I.14. Phénomène de polarisation de concentration.

Si on appelle C_M la concentration du soluté arrêté de la membrane et C_A la concentration moyenne du soluté dans la solution, le facteur de polarisation est défini par la relation (Fane et al. 2011) :

$$\sigma = \frac{C_M}{C_A} \qquad \text{(I.11)}$$

I.6.1.1. Modélisation de la polarisation : le flux massique de perméat est donné d'après la théorie de film (Sassi et Iqubal 2011) :

$$J_w = k.\ln\left[\frac{C_M - C_p}{C_A - C_p}\right] \qquad \text{(I.12)}$$

I.6.1.2. Les coefficient de transfert de masse

Le coefficient de transfert de matière K a été relié empiriquement aux différents paramètres hydrodynamiques du système (Fane et al. 2011) :

$$\frac{k.d_h}{D_2} = sh = \alpha_1 . Re^{\alpha 2} Sc^{\alpha 3} \qquad \text{(I.13)}$$

Tel que:

- Le nombre de Sherwood $sh = \frac{k.d_h}{D_2}$;
- Le nombre de Reynolds $R_e = \frac{2.r_0.U.\rho_h}{\mu_b}$;
- Le nombre de Schmidt $Sc = \frac{\mu}{\rho D_2}$.

$\alpha_1, \alpha_2 \; et \; \alpha_3$ Sont des coefficients déterminés expérimentalement.

Avec :

d_h: Diamètre hydraulique

U : Vitesse du fluide

ρ : Masse volumique

μ : Viscosité dynamique

I.6.2. Le colmatage ou fouling

L'eau de mer contient des matières organiques en suspension et colloïdales qui vont avoir tendance de se déposer sur les surfaces des membranes et à les colmater. Les quelles créent du substrat. Par conséquent le développement d'un biofilm sur la surface des membranaires (Atallah 2014).

Par conséquent une augmentation de la résistance de transfert et une diminution de la capacité de production du procédé

L'optimisation du procédé membranaire repose principalement sur la maîtrise du colmatage des membranes d'osmose inverse qui ont tendance à se colmater rapidement.

Le colmatage est l'un des facteurs limitant majeur qui limite la performance des procédés d'osmose inverse. On définit le colmatage comme étant l'ensemble des phénomènes qui interviennent dans la modification des propriétés filtrantes d'une membrane. Ces phénomènes qui sont essentiellement de nature physique, chimique, biologique, entraînant à la fois une baisse de la perméabilité et une variation de la sélectivité (Gavach 2010).

I.6.2.1 Les mécanismes de colmatage

Des nombreux mécanismes de colmatage peuvent explique cette baisse de perméabilité, sont généralement présents simultanément (figure I.15).

a. Adsorption sur le matériau membranaire

Le phénomène d'adsorption sur la surface de la membrane peut se produire lors des propriétés physicochimiques des macromolécules qui s'absorbent à la surface de la membrane ou des pores (Foo et Hameed2010).

b. La polarisation de concentration

Accumulation de matière réversible à la surface entraînant une contre pression osmotique Δπ. (Bacchin 2008).

c. Couche de gel et colmatage

C'est la formation d'un dépôt irréversible de particules à la surface de la membrane, qui aboutit à une diminution de la perméabilité de la membrane. Ce dépôt est communément appelé « gâteau », qui se traduit par une résistance hydraulique supplémentaire (Wehebe 2008).

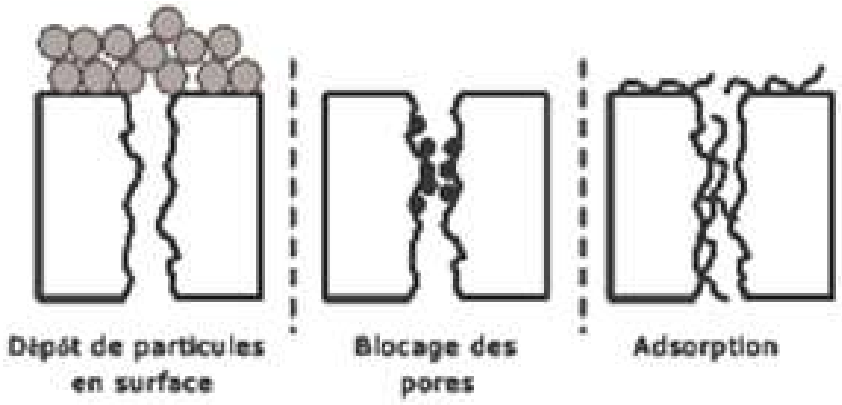


Figure I.15.Mécanisme de colmatage (Tansakul 2009).

I.6.2.2. Résistance de colmatage

Le colmatage dans ses différentes formes ajoute une résistance au transfert de matière à celle de la membrane et la performance globale diminue significativement (Tansakul 2009) :

$$J = \frac{\Delta P - \Delta \pi}{\mu (R_m + R_c)} \qquad (I.14)$$

Avec :

J : Flux d'eau à travers la membrane (m/s).

ΔP : Différence de pression de part et d'autre de la membrane (Pa).

Δπ : Différence de pression osmotique de part et d'autre de la membrane (Pa).

μ : Viscosité dynamique de l'eau (Pa.s).

R_m : Résistance due à la membrane (m^{-1}).

R_c : Résistance due au colmatage (m^{-1}).

I.6.2.3.Pouvoir de colmatage

L'expérience a montré que la rapidité de colmatage d'un module membranaire, dépend non seulement de la quantité de matières en suspension contenue dans l'eau brute, mais surtout de la nature de ces matières en suspension. Pour cela, il est nécessaire de déterminer le pouvoir colmatant de l'eau avant osmose inverse. Ce pouvoir colmatant est couramment appelé indice de colmatage (Fouling Index)'FI', ou Silt Density Index 'SDI', ou Silting Index 'SI'.

L'indice de colmatage (Fouling Index) FI s'obtient en mesurant la vitesse de colmatage d'une membrane de type millipore, d'une porosité calibrée de 0,45 µm, et de diamètre 47 mm de diamètre sous une pression de 2,1 bar.FI est déterminé selon la relation suivante (Maurel 2006):

$$F.I_t = \left[\left(t_f - t_i/t_f\right).100\right]/t \qquad \text{(I.15)}$$

Avec :

t_i: Temps nécessaire pour filtrer 500 mL au démarrage de la mesure.

t_f: Temps nécessaire pour filtrer 500 mL après un temps t.

En général le temps t entre deux mesures de volumes est égal à 15 min, dans le cas particulier d'eaux à pouvoir colmatant élevé, le temps t entre deux mesures de volumes est égal à 10 ou 5 min.

I.6.3. Entartrage (Scaling)

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, une augmentation est due à la perméation d'une partie de l'eau. Compte tenu des ions présents dans les eaux salines (calcium, magnésium, bicarbonates, sulfates) ces dépôts sont constitués principalement par du carbonate de calcium ($CaCO_3$), de l'hydroxyde de magnésium ($Mg(OH_2)$) et du sulfate de calcium ($CaSO_4$) (Wen-Jun et al. 2008).

I.6.4. Bio-fouling (colmatage par matière organique)

La nature des dépôts dans le cas de colmatage par matière organique soit différente de celle rencontrée dans le cas de l'entartrage (scaling). Tandis que les microorganismes tels que des bactéries, des algues et des virus existent dans la mer, sont développés dans les parties des installations où les conditions physicochimiques le permettent, la formation de films biologiques sur les surfaces de transfert (biofouling) (Tansakul 2009).

La matière organique ou les restes d'algues mortes. Après que les bactéries se soient absorbées sur les parois, les premiers éléments d'un biofilm sont formés. Le biofilm augmente en taille tandis que, les bactéries continuent à se multiplier et que la matière organique morte s'adsorbe sur le biofilm. Le biofilm devient un ensemble fort et cohérent qui est très difficile à éliminer. Finalement des morceaux de biofilm sont libérés, et se diffusent dans les composants du système y compris les membranes. Lorsqu'ils sont attachés aux membranes, les micro-organismes commence à se multiplier, en utilisant les nutriments qui sont présent dans l'eau alimentant le système. Par conséquent un biofilm se développe sur la membrane, ce qui gêne l'écoulement de l'eau à travers la membrane. On doit donc utiliser une pression plus importante, les coûts sont donc plus élevés et les membranes sont endommagées de façon irréversible. (Metaiche 2014).

Les conséquences de biofouling sont (Hadjali 2012) :

- Une augmentation de la perte de charge car les sections de passage de l'eau à traiter sont diminuées ;
- La croissance bactérienne est un phénomène exponentiel qui dépend des paramètres tels que la température, les nutriments, le pH, la vitesse du fluide, la pression osmotique, la teneur en oxygène et la présence ou non de biocides ;
- Une attaque chimique éventuelle des métaux (corrosion) ou des membranes par des composés acides produits par des bactéries (acides organiques en général).

I.6.5. Prévention et lutte contre le colmatage

Pour récupérer les performances de la membrane, elle doit être périodiquement nettoyée. Le type de produit de nettoyage dépend largement du type de membrane et de la nature du colmatage. Le tableau I.4 présente les nettoyages chimiques de la membrane d'OI pour le

dessalement d'eau de mer par différentes solutions nettoyantes. Noter qu'une augmentation du flux est considérée comme un résultat favorable, ainsi qu'une réduction de la conductivité.

Tableau I.4. Variation du flux et de la conductivité de l'eau par les différents nettoyages acide/base (Sadhwani et Veza 2001).

Produits chimiques (% volumique)	Variation du flux d'eau produite	Variation de la conductivité de l'eau produite
NaOH, 0,8 %	-13,24	/
HCl, 0,8 %	+22,86	/
NaOH suivi par HCl, 0,5 %	+22,50	+21,73
NaOH détergent, 0,8 %	+22,96	/
HCl détergent, 0,8	/	+54,24
NaOH détergent suivi par HCl et détergent, 0,5 %	/	-17,65
NaOH détergent suivi par HCl et détergent, 1,0 %	-12,24	-20,19

Le colmatage biologique et organique ne peut pas être facilement éliminé car les microorganismes sont protégés des désinfectants par une couche de gel. Il est donc nécessaire pour une bonne performance de l'OI d'éviter l'apparition du colmatage par un prétraitement efficace.

I.7. Procédé de prétraitement de l'osmose inverse

Le prétraitement de l'eau de mer avant osmose inverse est absolument nécessaire car les membranes d'osmose inverse sont très sensibles au colmatage et une bonne qualité de l'eau en entrée des modules d'osmose inverse est indispensable pour assurer des performances stables de l'osmose inverse sur le long terme. Le prétraitement a pour objectif la réduction du colmatage, l'augmentation de la durée de vie des membranes, l'amélioration de la qualité de l'eau produite et la maintenance de l'unité de l'osmose inverse. Les procédés de prétraitement peuvent être divisés en deux catégories : les prétraitements physiques et les prétraitements chimiques. Les prétraitements physiques incluent les préfiltres mécaniques, les filtres à cartouche, la filtration à sable et la filtration membranaire. Le prétraitement chimique consiste en l'addition d'inhibiteurs d'entartrage, de coagulants, de désinfectants et de poly-électrolytes (Berland et Juery2002). A l'heure actuelle, la plupart des usines d'osmose inverse utilisent un procédé de prétraitement

conventionnel qui généralement consiste en un prétraitement physique et chimique sans procédé membranaire. Avec la baisse constante du prix des éléments membranaires et la dégradation de la qualité des ressources en eau, le prétraitement par procédé membranaire trouve de plus en plus sa place dans les étapes de prétraitement avant osmose inverse. Nous allons détailler à présent les deux types de filières de prétraitement : conventionnelle et à membrane.

1.7.1. Prétraitement conventionnel

Le prétraitement conventionnel est encore très majoritairement utilisé dans les usines de dessalement. La filière de prétraitement conventionnel dans une usine de dessalement de l'eau de mer comporte généralement les étapes indique sur la Figure I.16. Le rôle principal de la préfiltration est d'éliminer les gros matériaux qui peuvent endommager les installations et réduire l'efficacité globale du procédé de traitement.

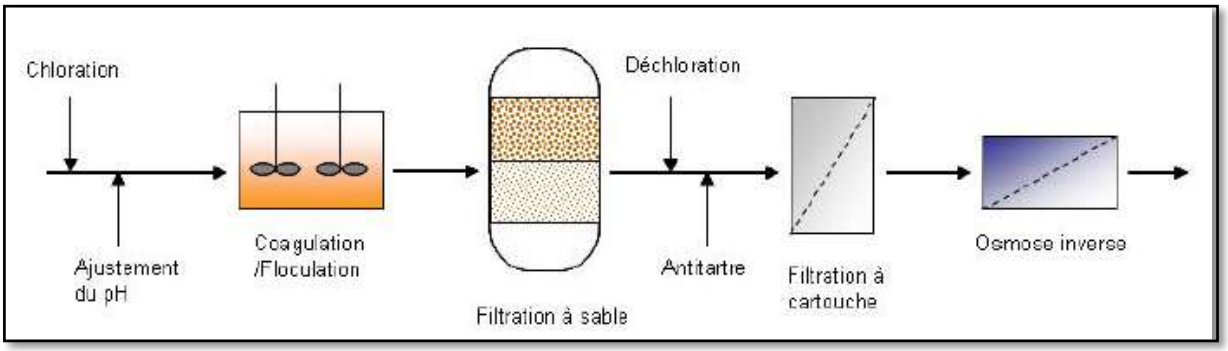


Figure I.16. Prétraitement conventionnel typique (Khanzada et al.2017)

a) *Chloration* : la chloration est nécessaire pour désinfecter et éviter la croissance biologique qui cause le bio-colmatage de la membrane. Le chlore est ajouté sous la forme d'hypochlorite de sodium (NaOCl) ou de gaz dichlore (Cl_2) qui est hydrolysé sous la forme d'acide hypochloreux (Tahraoui 2010).

$$(HOCl).\ Cl_2 + H_20 \rightarrow HOCl + 2HCl$$

$$NaOCl + H_2O \rightarrow HOCl + NaOH$$

Dans l'eau, l'acide hypochloreux se dissocie en ions hydrogène (H^+) et hypochlorite (OCl^-).

$$HOCl \leftrightarrow H^+ + OCl^-$$

La somme du Cl_2, NaOCl, HOCl et OCl^-constitue le chlore résiduel libre. Une concentration en chlore résiduel libre de 0,5 à 1,0 $mg.L^{-1}$ doit être maintenue le long de la filière de prétraitement pour empêcher le colmatage de la membrane.

b) *Ajustement du pH* : l'addition d'acide comme l'acide sulfurique (H_2SO_4) est nécessaire pour empêcher l'entartrage par $CaCO_3$.

c) *Coagulation et floculation* : les coagulants sont ajoutés pour que les particules colloïdales puissent s'agglomérer. Pour améliorer la procédure de floculation, des floculants comme les polymères cationiques ou anioniques sont également rajoutés. Les coagulants les plus utilisés sont le chlorure ferrique ($FeCl_3$), le sulfate ferrique ($Fe_2(SO_4)_3$), le sulfate d'aluminium ($Al_2(SO_4)_3$).

d) Filtration sur sable mono- ou bicouche : la filtration sur sable est nécessaire pour éliminer les agglomérats produits lors de la coagulation.

e) *Déchloration et antitartre* : la Déchloration doit être effectuée avant l'osmose inverse car le chlore résiduel peut détériorer les membranes d'osmose inverse. Des fournisseurs de membranes donnent une dégradation de la membrane après des temps de contact de 200 à 1 000 heures avec une concentration en chlore résiduel libre de 1 $mg.l^{-1}$ pour des membranes composites. La dégradation sera plus rapide dans le cas de solutions alcalines et de températures élevées. Normalement, le méta bisulfite de sodium ($Na_2S_2O_5$) est utilisé pour la déchloration, pour son efficacité et son faible prix. Dans l'eau, il produit du bisulfite de sodium :

$$Na_2S_2O_5 + H_2O \rightarrow 2NaHSO_3$$

Le bisulfite de sodium réduit l'acide hypochloreux :

$$2NaHSO_3 + 2HOCl \rightarrow H_2SO_4 + 2HCl + Na_2SO_4$$

Le méta bisulfite de sodium est nécessaire théoriquement à 1,34 mg pour 1,0 mg de chlore résiduel. En pratique pour enlever 1 mg de chlore résiduel libre, il faut typiquement 3,0 mg de méta bisulfite de sodium. L'élimination du tartre (formé Na_2SO_4).

f) *Cartouches filtrantes à charbon actif* : la dernière étape du prétraitement conventionnel est la filtration sur cartouche avec une taille de maille de 5 à 10 µm pour protéger les membranes d'osmose inverse. Une filtration sur sable bicouche est suffisante pour

atteindre un SDI inférieur à 4 et effectivement éliminer des pigments algaux si le système est alimenté par une eau brute de bonne qualité (Leparc 2010).

Par contre, le prétraitement conventionnel complet peut être insuffisant en cas de mauvaise qualité de l'eau pendant des orages ou lors de blooms algaux.

Le choix du prétraitement conventionnel doit donc être adapté selon la qualité de l'eau de mer brute pour assurer la meilleure qualité de l'eau possible en amont des membranes d'osmose inverse (Gaid et Treal 2007). Les inconvénients du procédé de prétraitement conventionnel sont :

- Variation de qualité de l'eau d'alimentation vers les membranes d'osmose inverse ;
- Difficultés de fournir un SDI constant inférieur à 4 ;
- Difficultés d'enlever des particules plus petites que 10-15 µm ;
- Grande taille de l'installation due à la vitesse de filtration faible ;
- Addition de coagulant qui influe sur les performances des membranes d'osmose inverse ;
- Consommation de réactifs chimiques ;
- Consommation considérable d'espace et de main d'œuvre.

Wolf et al. (2005) ont mis en évidence la défaillance de fonctionnement d'usines de dessalement dont le prétraitement conventionnel utilisait la filtration sur sable bicouche et n'arrivait pas à atteindre un SDI inférieur à 4. En conséquence, la membrane d'osmose inverse colmate rapidement et l'usine de dessalement ne permet pas de produire l'eau potable nécessaire. Ceci conduit à la consommation de produits chimiques pour le nettoyage des membranes, à une dépense d'énergie due à la pression opératoire élevée, et donc à un coût opératoire élevé.

1.7.2. Prétraitement par les procédés membranaires

En raison des limitations du prétraitement conventionnel qui viennent d'être évoquées, un intérêt croissant s'est porté sur l'utilisation de procédés membranaires basse pression tels que la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF) et la nanofiltration (NF). Les avantages majeurs des procédés membranaires sont les suivants (Pearce 2007) :

- Flux de l'osmose inverse significativement élevé ;
- Plus faible consommation de produit chimique ;
- Meilleur compacité (-33 %) ;
- Augmentation de la durée de vie des membranes d'osmose inverse ;
- Capacité de fonctionnement à une qualité de l'eau d'alimentation variée ;

- Désinfection et nettoyage de l'osmose inverse moins nécessaire.

I.8. Consommation énergétique de procédé de dessalement

Le dessalement est un procédé énergivore, qui consomme plus d'énergie par litre que les autres options d'approvisionnement et de traitement de l'eau. L'énergie nécessaire dépend de plusieurs facteurs tels que la technologie utilisée, la conception de l'installation, la qualité et la température de l'eau d'alimentation, l'application de dispositifs de récupération d'énergie ou la qualité souhaitée de l'eau produite. De plus, le besoin en énergie des processus de dessalement est un problème crucial, car il s'agit d'une des principales variables affectant le coût de l'eau produite. Les besoins en énergie pour le dessalement ont considérablement diminué au cours des 40 dernières années en raison des améliorations technologiques et devraient continuer à diminuer. De nombreux facteurs peuvent réduire l'énergie nécessaire au dessalement : conception améliorée du système, pompage à haute efficacité, récupération d'énergie, matériaux membranaires avancés et technologies innovantes.

Le dessalement thermique nécessite à la fois de l'électricité et de l'énergie thermique, à l'exception de la compression mécanique de la vapeur. Dans les processus de dessalement thermique, la chaleur à basse température représente le principal pourcentage de l'apport énergétique, tandis que l'électricité est nécessaire pour les pompes.

Dans le cas de MED, la consommation électrique totale équivalente, en considérant un rendement énergétique de 30%, varie entre 14,45 et 21,35 kWh / m^3.

Dans le cas des procédés membranaire, la consommation d'énergie dépend principalement de la salinité de l'eau d'alimentation et du taux de conversion. En procédés d'osmose inverse, le principal besoin en énergie est la pression exercée sur l'eau d'alimentation. La consommation énergétique moyenne de l'OI varie de 3,7 à 8 kWh / m^3 pour l'eau de mer, en fonction de la taille de l'installation. Pour une unité SWRO de 24 000 m^3/j, la consommation varie entre 4 et 6 kWh / m^3avec installation de système de récupération d'énergie. Pour les eaux saumâtres, la consommation d'une unité BWRO est comprise entre 1,5 et 2,5 kWh/m^3 (Al- Karaghouli et al. 2013).

Tableau I.5. Consommation d'énergie des principales technologies de dessalement (Al-Karaghouli et al. 2013 ; Ghaffour et al. 2013)

	MSF	MED	SWRO	BWRO	ED
La consommation Energétique électrique (kWh/m^3)	2,5-5	2-2,5	3-6	1,5-2,5	0,8-5,5
La consommation Energétique Thermique (kWh/m^3)	190-282	145-230	-	-	-
Equivalent en énergie thermique /électrique (kWh/m^3)	15,83-23,5	12,2-19,1	-	-	-
La consommation énergétique Total (kwh/m^3)	19,58-27,25	14,45-21,35	3-6	1,5-2,5	0,8-5,5

I.8.1. Système de récupération d'énergie

Avant, Les procédés de dessalement par Osmose inverse n'incorporaient pas de système de récupération d'énergie. Ils consistaient en une pompe d'alimentation haute pression et module de membrane étaient en acétate de cellulose à couche épaisse. La consommation d'énergie spécifique pour cette opération était de l'ordre de 10 kWh / m^3 (Buros et al. 1980, Farooque et al. 2004). Des modifications apportées aux matériaux de la membrane ont abouti à des membranes composites à couche mince composées de polyéther-urée et de polyamide, avec des taux de perméabilité augmentés de l'ordre de 1 (Song et al. 2003). Les besoins énergétiques spécifiques pour ces membranes est de l'ordre 6,6 kWh / m^{3}Surtout, l'invention des systèmes de récupération d'énergie a permis au procédé d'osmose inverse de dessaler l'eau de mer de consommation d'énergie aussi basses moins de 3 kWh/m^3. En principe, ces systèmes permettant de récupérer une partie de l'énergie de l'écoulement de saumure (Stover 2005).

Les systèmes de récupérations d'énergie peuvent être classés en deux types : premier Type est à turbine (centrifuge) et un deuxième type est à déplacement positif (Wang et al. 2005). Les systèmes de récupérations d'énergie à base de turbine sont notamment les turbines Francis, Pelton et les turbocompresseurs hydrauliques. Les dispositifs à déplacement positif sont des échangeurs de pression et des échangeurs de travail. Ce type contribue à un rendement de récupération d'énergie plus élevé (90–98%) que le type à turbine (50–85%) et constitue une technologie plus prometteuse et compétitive (Stover et al, 2009 ; Wang et al, 2005). Le principe de ces systèmes

de récupération d'énergie permettant de récupérer une partie de l'énergie de l'écoulement de saumure.

Tableau I.6. Comparaison de la consommation énergétique spécifique de station de dessalement avec/sans système de récupération d'énergie (Gude 2011).

Station de dessalement		**Consommation énergétique spécifique (CES)** (kwh /m^3)
Installation sans système de récupération d'énergie		6,26
Installation avec système de récupération d'énergie	Echangeur de pression	4,66
	Turbine Pelton	3,71

I.8.1.1. Installation échangeur de pression

Les systèmes plus élaborés et plus efficaces permettent de récupérer plus de 95% de l'énergie du rejet de saumure, c'est le système d'échangeur de pression PX (Pressure Exchanger) de la compagnie américaine ERI.(Dundorf 2007). Le principe de base est de transmettre la pression de la saumure à la même quantité d'eau de mer nouvelle entrant dans le circuit et ainsi de réduire la taille de la pompe haute pression à un débit correspondant non plus au débit d'eau de mer nécessaire au bon fonctionnement des membranes, mais seulement au débit de perméat entraînant ainsi un gain important de puissance, ils ont déjà été mis en œuvre dans plusieurs installations commerciales atteignant une consommation spécifique d'énergie de 2 kWh/m^3 d'eau douce produite (Dundorf 2007, Penate 2011).

Il existe plusieurs fabricants d'échangeur de pression ERI (PX), Calder (DWEER), RO KINETIC et KSB (SALTEC DT), Danfoss (I SAVE) (Scheider 2005 ; Penate et al. 2010 ; Bross 2007 ; Farooque et al. 2004) sont les principaux fabricants de ce type d'équipements et sont maintenant en compétition pour avoir le meilleur concept (Erik et Juan 2011).

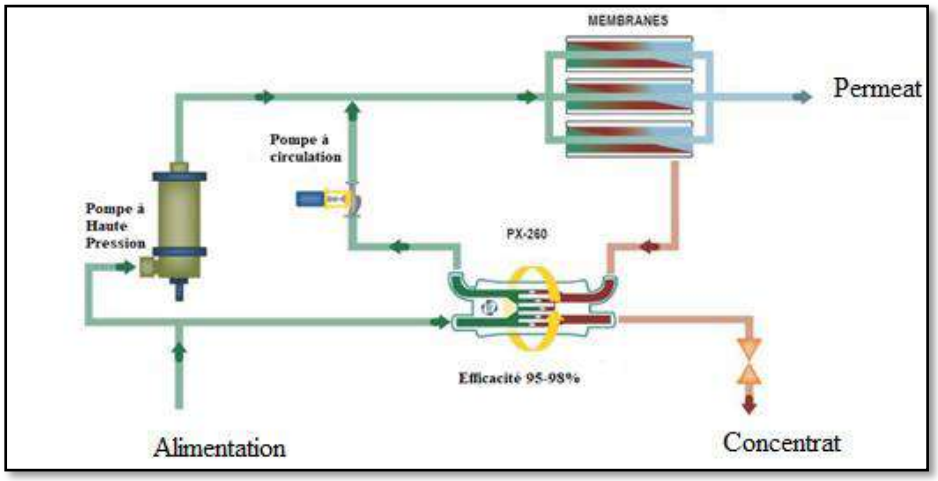


Figure I.17.Récupération d'énergie par système à piston (échangeurs de pression) (Zhu et al. 2009).

I.8.1.2.Installation de turbine

En 1980 les premiers systèmes de récupération de l'énergie du concentrât ont été installés avec une efficacité de 80 à 90%, Ils étaient basés sur le principe de la récupération indirecte de l'énergie par des turbines hydrauliques venant « soulager » les moteurs électriques entraînant les pompes haute-pression (Rahman 2011).

Les turbines hydrauliques ont montées sur le même arbre que la pompe haute pression et leur rôle est de récupérer l'énergie de la saumure le schéma ci-dessous présente un procédé d'osmose inverse avec récupération d'énergie par turbine.

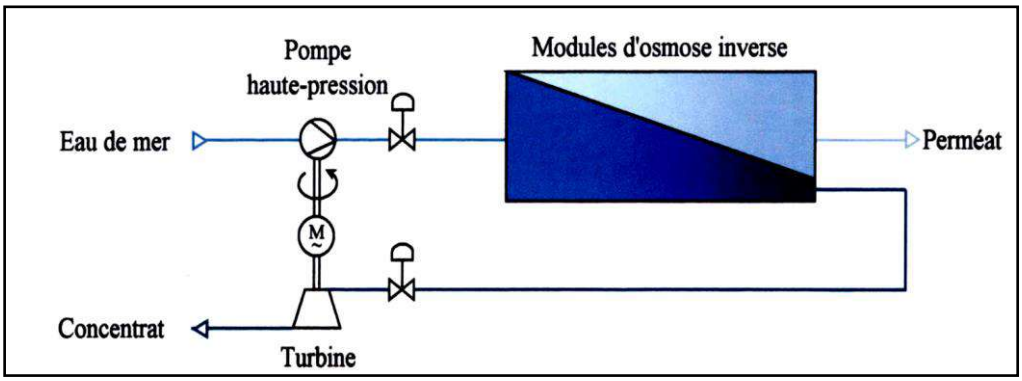


Figure I.18. Récupération d'énergie par turbine Pelton (Corsin 2003).

Il fut mis ensuite sur le marché des turbopompes à placer en série avec les pompes haute-pression, ce qui tendait à diminuer leurs caractéristiques hydrauliques, Ce système est plutôt adapté aux petites et moyennes capacités (Dundorf et al.2007).

I.9. Le dessalement en Algérie

L'Algérie est parmi les plus grands pays au monde ayant investi dans le dessalement de l'eau de mer, (figure I.19) .Un ambitieux programme est lancé par le gouvernement Algérien depuis plusieurs années et qui vise à pallier le manque de ressources conventionnelles en eau potable et à répondre aux besoins domestiques de plus de 40 millions d'Algériens (MRE 2018). Actuellement onze grandes stations de dessalement d'eau de mer sont fonctionnelles, englobant une capacité de production de 2.110.000 m^3/j (soit 770 million de mètre cube par an) et ce pour satisfaire l'alimentation en eau potable de près de 7.481.420 habitants.

À ces onze stations serait venu s'ajouter des quatre nouvelles stations. Notamment, station d'El Chatt qui sera implantée à la wilaya d'El Tarf d'une capacité de 300 000 m^3/j et station d'Ouest Alger sera implantée à la wilaya de Tipaza ayant la même capacité, avec 200 000m^3/j pour la wilaya d'Alger et 100 000 m^3/j pour la wilaya de Blida, une nouvelle station à Skikda d'une capacité de 70 000m^3/j et une station à Bejaia d'une capacité de 50 000m^3/j extensible à 100 000m^3/j. Le tableau I.7 ci-dessous représente les différentes stations de dessalement et leurs caractéristiques. (MRE 2018 ; AEC 2018).

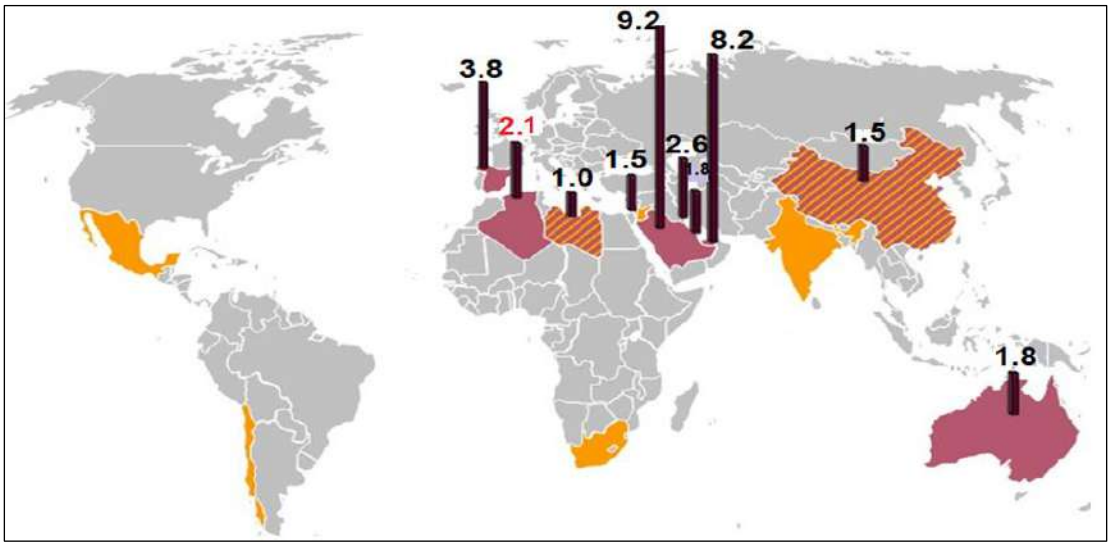


Figure I.19. Capacité de dessalement de l'eau de mer dans le monde (Sia Partners 2017).

Les avantages de l'utilisation de dessalement en Algérie peuvent être résumés comme suit :

- L'Algérie dispose d'un littoral de 1200 km ;
- La mer est une source quasi non polluante et inépuisable ;
- La majorité de la population (80%) ainsi que l'industrie qui consomme de grandes quantités d'eau (zones industrielles et les grands hôtels) sont situés près de la mer, ce qui réduit encore le coût de l'eau en évitant son transfert ;
- Les technologies de dessalement ont énormément progressé et leurs coûts ont diminué de façon significative durant ces dernières années (Reddy et Ghaffour 2009).

La mise en service de 13 stations à l'horizon 2020 (El Chatt et Alger Ouest), dont la production d'eau dessalée à partir des 11 stations en exploitation durant l'année 2018 est estimée à 583 millions m^3, et 04 en cours de développement avec des moyens nationaux, totalisant ainsi plus de 2,1 millions m^3de production journalière d'eau potable.

Tableau I.7. Différentes stations de dessalement et leurs caractéristiques en Algérie (MRE 2018).

Nom Station	Wilaya	Date de mise en service	Capacité (m^3/j)	Population (Hab)	Cout de l'eau produite ($/$m^3$)
Kahrama	Oran	2005	90 000	250 000	0,87
El Hamma	Alger	2008	200 000	986 152	0,82
Skikda	Skikda	2009	100 000	413 262	0,74
Beni Saf	Ain Temouchent	2009	200 000	412805	0,69
Souk Tleta	Tlemcen	2011	200 000	300 000	0,76
Honaine	Tlemcen	2012	200 000	50 0000	0,76
Mostaganem	Mostaganem	2011	200 000	812437	0,72
Cap Djinet	Boumerdes	2012	100 000	134799	0,72
Fouka	Tipaza	2011	120 000	588 328	0,75
Magtaa	Oran	2016	500 000	2 000000	0,56
Ténès	Chlef	2015	200 000	1121125	0,59
Total	**11**	-	**2 110 000**	**7 518 908**	-

I.10. Impact environnemental

Le dessalement implique des impacts environnementaux qui doivent être compris et atténués. Pour commencer, les usines de dessalement produisent des saumures très salées dont elles doivent se débarrasser. Ces rejets sont classés par l'Agence de protection de l'environnement américaine comme déchets industriels. Ces saumures très salées ont la capacité d'appauvrir les écosystèmes, particulièrement certaines régions de milieux marins où la turbidité faible et une évaporation importante donnent une salinité déjà élevée à l'eau de mer. D'une autre part, les procédés de dessalement utilisent aussi des additifs antisalissure ou anticorrosion pour l'entretien des installations (Shemer et al.2017).

Les émissions de gaz à effet de serre associées à l'utilisation de sources d'énergie à base de combustibles fossiles pour le dessalement doivent être atténuées. Dans la seule région MENA, les besoins en eau dessalée requis pour 2050 produiraient, dans un scénario technologique similaire à celui d'aujourd'hui, des émissions de CO_2 équivalant à 270 à 360 millions de tonnes par an (Liu et al. 2013). Cet effet peut être fortement atténué en utilisant des sources d'énergie renouvelables telles que les sources d'énergie solaire photovoltaïque, solaire thermique, éolienne ou géothermique, ainsi qu'en réduisant les besoins en énergie totale du processus (El-Ghonemy 2012).

I.11. Conclusion

Le dessalement est un enjeu particulièrement important pour l'avenir des régions sujettes aux pénuries d'eau. C'est une méthode d'avenir pour pallier aux problèmes d'eau douce. Beaucoup de pays des régions touchées par la pénurie d'eau ont recouru au dessalement de l'eau de mer pour répondre aux besoins des populations, de l'industrie, de l'agriculture et du tourisme.

L'Algérie a opté, dans la grande majorité des stations, la technique d'Osmose Inverse avec des taux de conversion environ 50%. Le procédé de dessalement de l'eau de mer par osmose inverse a connu un grand développement et présente beaucoup d'avantages par rapport au procédé de distillation

Le recours au dessalement est également renforcé par la diminution des coûts de production par m^3, en raison, principalement, de l'amélioration de la technologie et de la concurrence.

Les performances membranaires sont limitées par le facteur de colmatage et phénomène de polarisation. En effet, au cours des dernières décennies, plusieurs travaux montrent que la technologie Nanofiltration est alternative de l'osmose inverse grâce à sa basse pression d'opération, la haute rétention des ions monovalents et matière organique. L'intégration de NF avec OI engendre les avantages des deux technologies, le couplage entre les procédés donnera une efficacité sur l'aspect économique, augmente la production et diminue la consommation énergétique.

Chapitre II

Etat de l’art des procèdes de dessalement associés aux énergies renouvelables

II.1. Introduction

Aujourd'hui, le dessalement basé sur les sources d'énergie renouvelables est une technologie émergente de production d'eau potable afin. En particulièrement, une technologie prometteuse pour les régions éloignées, où la connexion au réseau électrique public n'est pas indisponible ou couteuse, et où la pénurie d'eau est grave.

L'adaptation appropriée d'un système de dessalement à une source d'énergie est en fonction de sa capacité de fournir un approvisionnement satisfaisant en eau à un cout raisonnable. Aussi, la sélection de la combinaison appropriée dépend d'un certain nombre de facteurs : quantité d'eau à dessaler (capacité de l'installation), la salinité d'eau d'alimentation, l'éloignement et la disponibilité de l'électricité du réseau, l'infrastructure de la technique, le type et le potentiel de la ressource locale d'énergie renouvelable (Karagiannis et Soldatos 2008).

La part de marché du dessalement par énergie renouvelable représente moins de 1% de la capacité mondiale de dessalement, 62% des installations par procédé osmose inverse alimenté par l'énergie conventionnelle, 43% de ces installations fonctionnent à l'énergie photovoltaïque. (Abdelkreem et al. 2018).

II.2. Revue des travaux sur le procédé de Nanofiltration au prétraitement du dessalement par osmose inverse

Bien que la littérature sur le prétraitement membranaire par Nanofiltration de dessalement d'eau de mer par procédé d'osmose inverse soit insuffisante, certains chercheurs ont confirmé que l'intégration du procédé NF permet de réduire le coût de la consommation d'énergie du procédé osmose inverse. La figure ci-dessous présente un recensement des publications sur le prétraitement par membrane Nanofiltration au dessalement de l'eau de mer par procédé osmose inverse, d'après le site de ScienceDirect pour la période de 1986-2020.

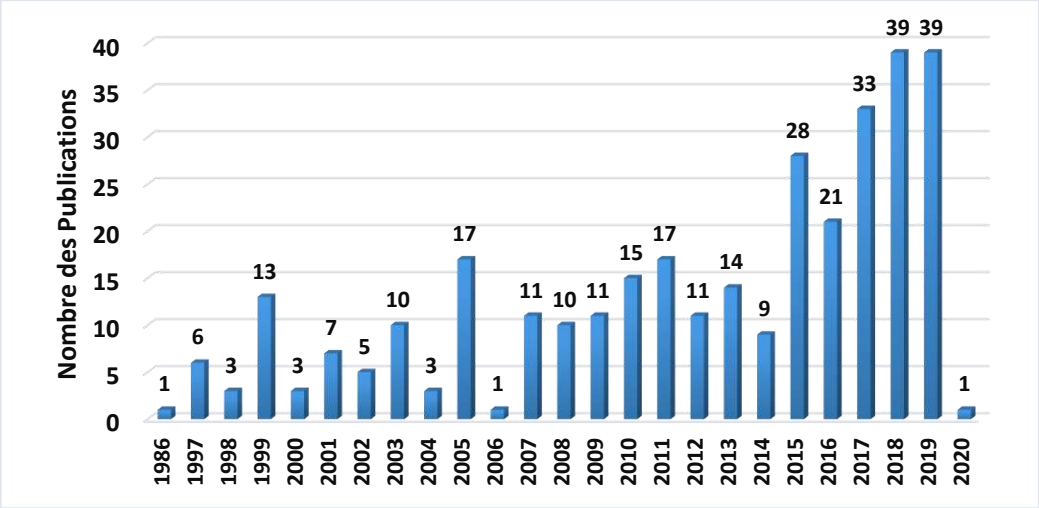


Figure II.1. Nombre des publications traitant le prétraitement par Nanofiltration pour le dessalement de l'eau mer par procédé d'osmose inverse (ScienceDirect le 01/10/2019).

Hassan et al.1998, les premiers ont proposé l'utilisation de membranes NF au prétraitement de dessalement de l'eau de mer. Ils ont démontré que le prétraitement par NF permet la réduction de la turbidité, la formation d'oxydes, la dureté, le TDS et l'élimination des microorganismes.

Hilal et al. 2005, ont étudié le traitement des solutions salines à haute concentration en NaCl avec un niveau de salinité similaire à celui de l'eau de mer. Trois membranes NF commerciaux (NF90, NF270, N30F) de concentration 25 000 ppm, de salinité similaire à celui de l'eau de mer ont été utilisées. Les principaux paramètres étudiés étaient la pression d'alimentation et la concentration en sel. Selon leurs résultats, pour une salinité de 5000 ppm et une pression de 9 bars, les résultats expérimentaux ont montré que le NF90 pouvait atteindre une rétention en sel de l'ordre de 95%, bien qu'une réduction de rétention de 41% à une salinité de 25 000 ppm et à la même pression. Les niveaux de rétention atteints par NF270 ont été compris entre 11 et 29%, tandis que N30F a présenté une rétention plus faible entre 3 et 6%. D'un autre part, Al Zoubi 2006, a examiné l'utilisation de la membrane NF de type NF90 dans l'étape de prétraitement au processus de dessalement et dans la déminéralisation partielle. Cette membrane montre sa capacité de rétention les ions monovalents et divalents de l'eau de mer côtière de l'océan Indien, avec des concentrations comprises entre 38 et 25 g /L en une seul étape. D'autre part, la membrane NF270 peut retenu les ions monovalents à des valeurs

relativement faibles et les ions divalents à des valeurs raisonnables, et réduire la salinité de l'eau à 33 g / L avec un flux de perméat très élevé.

L'intégration de différentes techniques membranaires atteint l'objectif d'avoir une meilleure qualité de l'eau produite. Macedonio et al. 2007, ont configuré sept systèmes membranaires différents d'intégration pour le dessalement de l'eau de mer, à savoir: (1) uniquement l'unité OI; (2) NF-OI; (3) MF-NF-OI; (4) MF-NF-OI et module de membrane distillation (MD) sur saumure de NF; (5) MF-NF-OI et module de MD au saumure de OI; (6) MF-NF-OI et module de MD au saumure de NF et OI; (7) MF-NF-OI, module MD au saumure de NF et membrane distillation au saumure de l'OI. Grâce à l'introduction de la NF en tant que prétraitement, le perméat d'OI a augmenté et la pression osmotique inférieure de l'eau d'alimentation de l'unité d'OI ; plus important encore, l'augmentation de taux de conversion d'eau atteint 52%. En outre, le coût de l'eau dessalée pour le procédé avec seulement de l'OI est de 0,61 \$/m ^{3}. Tandis que, avec le couplage de OI avec le NF au prétraitement le coût est réduit à 0,47 \$/m^3.

Llenas et al. 2011, ont étudié les performances des différentes membranes NF disponibles sur le marché afin de trouver celles qui conviennent au meilleure configuration. Les membranes NF270 (Dow Chemical), NF99HF (Alfa Laval) et K-SR2 (Koch Membrane Systems), a montré de bonnes performances pour la prévention contre l'entartrage en procédés d'osmose inverse. Galanakis et al. 2012, ont étudié le prétraitement des eaux souterraines saumâtres à l'aide d'une membrane nanofiltration de poly pipérazine. Ils ont prélevé des échantillons de dureté et de salinité différentes allant jusqu'à 762 mg de $CaCO_3$ et 1803 mg/ L de NaCl respectivement et les ont traités sous des pressions transmembranaires basses varient de 6 à 10 bars. Selon leurs résultats, la membrane NF pouvait fournir des taux de rétention élevés (70–76%).

Un article récent de Nicolini et al. 2016, donne les caractéristiques et les performances de trois membranes NF commerciaux chargées négativement (NF90, NF030 et NP010) et explique les phénomènes de perméation des ions à l'aide des solutions aqueuses synthétiques contenant des sels simples et mélangés. Ils ont évalué la retention des sels typiquement présents dans l'eau de mer (NaCl, Na_2SO_4, $MgSO_4$, K_2SO_4 et $CaSO_4$) à différentes pressions transmembranaires. Ils ont découvert que les mécanismes de tamisage ionique, l'exclusion électrique, les effets diélectriques et le couplage des ions dans le flux de perméat pour maintenir l'électro- neutralité contribuent simultanément à la rétention sélective des ions. En outre, les

résultats ont révélé que la perméation d'un mélange d'ions mono et divalents à travers une membrane avec des pores de taille plus élevée NP010 et NP030, a montré qu'une forte exclusion de sulfate conduit à une augmentation du retention de tous les cations présents dans la solution. Inversement, pour la membrane NF90, les effets stériques sont prédominants et un rejet élevé des sulfates entraîne une réduction du retention des ions monovalents.

II.2.1. Optimisation de la performance du système hybride NF/OI

La conception des usines de dessalement se concentre généralement sur une technique particulière et l'optimise par synthèse et simulations. L'optimisation structurelle offre une alternative à ce processus de conception unique et offre un grand potentiel pour introduire une combinaison de plusieurs processus de dessalement. Il permet d'optimiser les conditions de fonctionnement et les paramètres operationnelles ainsi que la structure du processus consistant en unités et interconnexions. Un certain nombre d'articles ont été publiés au cours de la dernière décennie, axés sur l'optimisation de l'osmose inverse en tant que réseau autonome et dont la plupart utilisaient une version simplifiée de la superstructure générale (Skiborowski et al. 2012). En outre, la littérature sur l'optimisation de performances des installations hybride NF-OI soit insuffisante.

Kaya et al. 2015, ont étudié l'utilisation de la NF comme étape de prétraitement pour l'osmose inverse dans le dessalement de l'eau de mer. Ils ont examiné les performances d'une seule NF (NF90 et NF270) en SWRO et d'un système intégré (NF-OI). Les membranes NF ont été utilisées individuellement dans les réacteurs fermées à 30 bars. Pour l'étude du système intégré, le perméat NF a servi d'alimentation pour la membrane SWRO. Le taux de conversion du perméat de la membrane NF90 était inférieur à celui de la membrane NF270. La retention de sel de la membrane NF90 était supérieur à celle de la membrane NF270. Al-Hajouri et al.2013, ont étudié la performance des membranes NF dans les processus de prétraitement pour SWRO en ce qui concerne la conductivité et la pression d'alimentation sur une période de huit ans. La pression d'alimentation variait de 18 à 38 bars**.** Song et al. 2013, ont étudié les performances des membranes NF pour évaluer le potentiel de l'entartrage en système NF-SWRO. Les membranes NF rejetaient les ions sulfate à 10-15 bars et produisaient du perméat avec un potentiel d'entartrage inférieur lors du dessalement thermique. Altaee et al. 2011, ont simulé des processus membranaires en deux étages NF-NF, NF-OI et en un seul étage d'OI à l'aide du logiciel ROSA afin de comparer leurs performances, les besoins énergétiques, la consommation électrique spécifique et les coûts globaux. Les résultats ont montré que le

procédé NF-NF présentait le coût le plus bas et la consommation d'énergie spécifique la plus faible, tandis que le processus d'OI avait la consommation d'énergie spécifique la plus élevée.

En résumé, le prétraitement NF de l'eau de mer dans les usines de dessalement :

- Empêche le colmatage de la membrane SWRO afin d'éliminer la turbidité et les bactéries ;
- Empêche l'entartrage à la fois en SWRO et en MSF en éliminant les ions formant le tartre ;
- Réduit la pression requise pour l'exploitation des installations SWRO en réduisant les TDS d'alimentation en eau de mer de 30 à 60%, en fonction du type de membrane NF et des conditions opérationnelles.

II.3. Etat de l'art sur la modélisation du procédé NF/OI par Réseau de Neurone Artificiel

Au cours des dernières années, l'utilisation de la technologie d'algorithme d'apprentissages pour la modélisation a connu un succès considérablement accru dans divers domaines des sciences de l'ingénierie. Parmi les méthodes, la régression linéaire et de à linéaire multiple (RLM) sont largement étudiées à la 70e, l'approche de réseau de neurone artificiel (RNA) a permis l'établissement d'un modèle à partir de relations non linéaires entre les entrées et les sorties du processus (Vilain 1998).

RNA fournit une stratégie de contrôle appropriée du procédé contrôlé. Par conséquent, les résultats importants d'utilisation de réseau de neurone dans la modélisation et la simulation sont les suivants : augmentation de l'impact élevé de recherche, résultats de simulation utiles permettant à l'industrie des avantages d'une prise de décision efficace pour l'optimisation et le contrôle des procédés, réduire la main-d'œuvre et la maintenance, optimisation les performances membranaires. Par conséquent, une augmentation du temps d'exploitation des usines de dessalement et leur productivité, réduction des coûts opérationnels de l'usine de dessalement.

II.3.1. Réseaux de neurones artificiels (RNA)

II.3.1.1. Neurone biologique

Les réseaux de neurones sont composés d'éléments simples fonctionnant en parallèle. Ces réseaux sont inspirés par les systèmes nerveux biologiques. Le cerveau humain composé

de 10 à 100 milliard d'unité formant un ensemble appelées neurones interconnectées. Chaque neurone reçoit des influx nerveux à travers ses dendrites (récepteurs), les intègre pour en former un nouvel influx nerveux qu'il transmet à un neurone voisin par le biais de son axone (émetteur) (Mcculloch et Pitts 1943) comme le montre la Figure II.1.

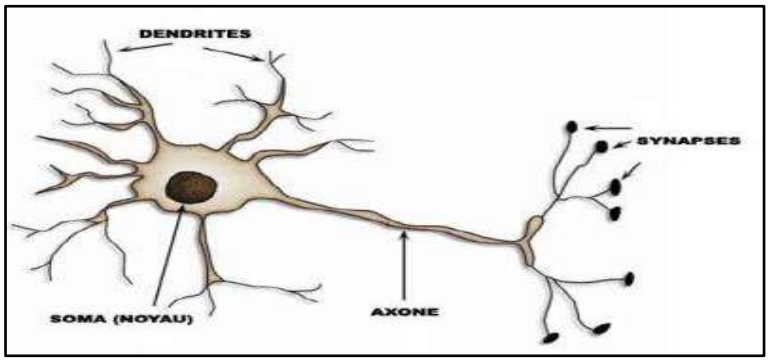


Figure II.2. Neurone biologique (Intelligence artificielle 2019)

II.3.1.2. Neurone formel

Le neurone formel introduit par Mcculloch et Pitts dans les années 40 (Mcculloch et Pitts 1943) (figure II.3) est l'élément de base d'un Réseau de Neurone est une fonction algébrique non linéaire, effectuant la somme pondérée de ces entrées externes puis modulée par l'application d'une fonction d'activation.

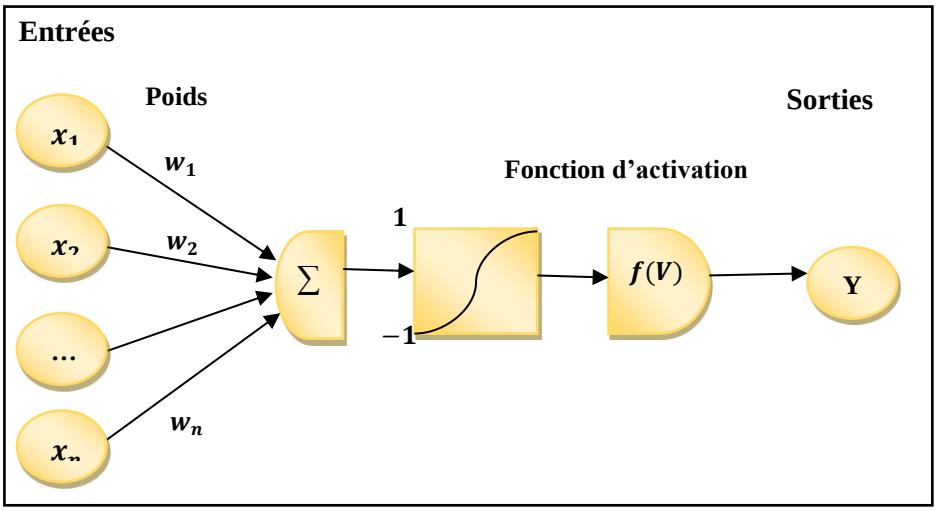


Figure II.3. Neurone formel

II.3.1.3. Description d'un réseau de neurone

Les neurones artificiels sont disposés en couches dans lesquelles la couche d'entrée reçoit les entrées (x_i) du monde réel et chaque couche suivante reçoit les sorties pondérées **(**w_{ij}

,x_i) de la couche précédente, son entrée résultant en un réseau de neurones artificiels à réaction, dans lequel chaque entrée est alimentée transmettre à la couche suivante où il est traité. Les sorties de la dernière couche constituent les sorties vers le monde réel. Les entrées et les poids de connexions (w_i) sont relié par une combinaison linéaire φ. La sortie du neurone dépend d'une fonction d'activation non linéaire f (Hamadache 2014).

$$\varphi = b_0 + \sum_{i=1}^{n} w_i x_i \qquad \text{(II.1)}$$

"b_0" est affecté à une entrée constante appelée "biais". Une fonction *f*, appelée fonction d'activation. Les fonctions d'activation mathématiques les plus souvent utilisées sont regroupées dans le tableau II.1.

Dans les approches RNA, la normalisation des données est nécessaire avant de commencer le processus de formation afin de garantir que l'influence de la variable d'entrée au cours de la construction du modèle ne soit pas basée sur l'ampleur de leurs valeurs natives, ni sur leur gamme de variation (El-Hawary 1993). La technique de normalisation utilisée consiste à transformer linéairement les variables d'entrée / sortie dans l'intervalle [0,1] ou [-1,+1].

$$y = f(\varphi) = f\left(b_0 + \sum_{i=1}^{n}(w_i x_i)\right) \qquad \text{(II.1)}$$

Tableau II.1. Fonctions d'activation les plus utilisables (Niemi et al. 1995)

	Fonction de transfert			
	Linéaire	**Logistique (Sigmoïde logarithmique)**	**Tangente hyperbolique sigmoïde**	**Exponentielle**
Notation	Purelin	Logsig	Tansig	Exponential
Équation de fonction de transfert	$f(x) = x$	$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$	$f(x) = \frac{e^{x} - e^{-x}}{e^{x} + e^{-x}}$	$f(x) = e^{-x}$

L'un des paradigmes de réseau de neurones les plus populaires appliqués à la modélisation d'un large éventail de systèmes non linéaires, en particulier des procédés de génie chimique et biologique, est le réseau de neurones à propagation rétroactive (feed forward neural nertwork) (FFNN) (Lee et Park, 1999 ; Silva et al. 2000), en particulier le réseau multicouche de perceptron (MLP), sont les plus importants et les plus cités dans la littérature. (Hagan et al. 1996), adapté au traitement du problème complexe.

II.3.1.4. Architectures de réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont classés en deux grandes catégories d'architecture : les réseaux non bouclés statiques (feed forward), et les réseaux bouclés dynamiques (feedback)

- Un réseau est non bouclé, est une relation algébrique non linéaire entre ses entrées et ses sorties. (Rivals et al. 1995).C'est à dire qu'il est obligatoire de représenter un réseau graphiquement par un ensemble de neurones connectés entre eux et que l'information circule des entrées vers les sorties sans retour (un seul sens), c'est à dire que la sortie courante n'a aucune influence sur les entrées futures. (Dreyfus 1998).Cette catégorie de réseaux est connue par Perception Multicouche (MLP). Il existe au moins une couche cachée dans les réseaux ;
- Les réseaux dynamiques, Par contre la sortie dépend à la fois de l'entrée actuelle du réseau et des entrées, des sorties ou des états actuels ou antérieurs du réseau.

II.3.1.4.1. Réseaux multicouches (MLP)

Les réseaux multicouches qui sont des systèmes non linéaires ont été inventés, comme il est montré sur la Figure II.4 sont des neurones organisés en couches successives non interconnectés et sont liés entre eux par des connexions pondérées ce sont les poids. Les informations circulent dans un seul sens (allez sans retour) de la couche d'entrée vers la couche de sortie. Les réseaux de ce type possèdent trois sortes de couches (Benrabeh et al.2015) :

- Des couches d'entrée avec unités d'entrée ;
- Des couches cachées, ces couches cachées démultiplient la puissance de calcul et permettre d'aborder des problèmes plus difficiles ;
- Des couches de sortie avec unités de sortie.

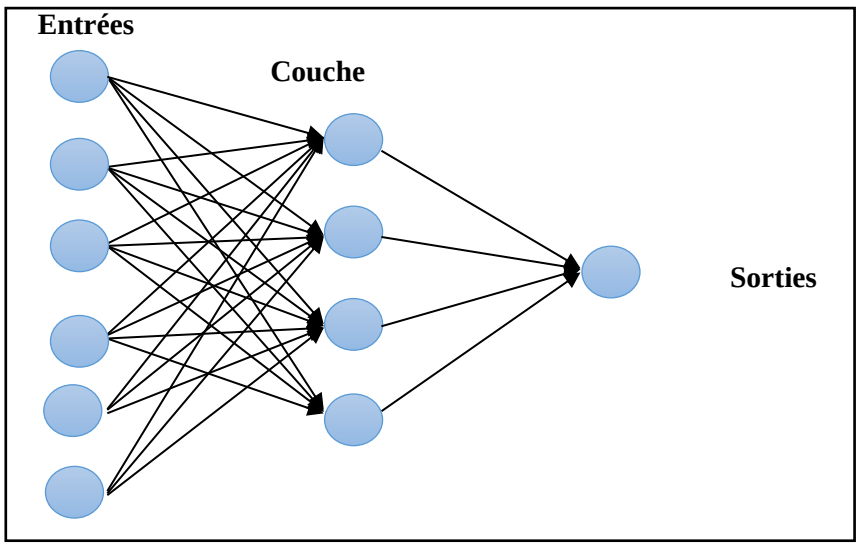


Figure II.4. Réseau de neurone Multicouche.

II.3. 2. Revue des travaux

Ces dernières années, il y a divers travaux de tentatives d'utilisation des réseaux de neurones artificiels (RNA) comme approche viable pour développer des modèles basés sur les données pour prédire les performances des procédés membranaires en dessalement de l'eau de mer par Osmose inverse. Citant, Lee et al.2009, ont appliqué l'RNA pour prédire le flux et le TDS de permeat afin d'étudier les performances de la station de Fujaïrah SWRO implanté à l'Emirates. Le modèle consiste de cinq paramètres d'entrée (la température de l'eau d'alimentation, le flux d'entrée, la pression transmembranaire et le TDS d'entrée et le temps) et deux sorties (le flux et le TDS de permeat). Libotean et al. 2009 ont développé un modèle avec BP et des algorithmes de régression de support vectorielle (Support vector regression) (SVR) pour prévoir les performances de RO et une utilisation possible pour les diagnostics opérationnels situés à Port Hueneme, Californie. Khayet et al. 2011 ont proposé un modèle analytique pour la simulation et l'optimisation du procédés d'IO en utilisant la méthodologie de surface de réponse (RSM) et RNA. Le modèle RSM était valide pour une plage spécifique de concentration de sel d'alimentation tandis que ce dernier était valable sur toute la plage. Le modèle RSM a été réalisé pour de faibles concentrations de sels en eau saumâtre et en eau de mer. Les modèles RSM et RNA ont la capacité de résoudre des problèmes multi-variables linéaires et non linéaires. Moradi et al. 2013 ont présenté un modèle RNA utilisant un réseau à feed-forward Back Propagation et un modèle d'écoulement de pores à force de surface modifiée afin d'optimiser les performances de la membrane OI. Les paramètres de prédiction sont : le flux total, le facteur de séparation et le flux de solvant pur qui sont bien prédits que les autres. Les valeurs prédites ont été comparées aux données expérimentales et ont obtenu une erreur quadratique moyenne <0,0007 et un coefficient de corrélation de 0,99. Garg et al. 2014 ont développé une usine BWRO à petite échelle utilisant la méthodologie RSM (avec une conception composite centrale) et RNA (utilisant BP). Les résultats ont été comparés et jugés optimaux dans la plage acceptable avec une récupération d'eau de 19,18%, une rétention de TDS 89,21% et une consommation d'énergie spécifique de 17,60 kWh / m^3. Barello et al. 2014 ont exprimé à travers un modèle que la constante de perméabilité à l'eau (K_w) a une grande signification dans n'importe quelle usine de dessalement. Les auteurs ont développé un modèle ANN dépendant du temps basé sur la corrélation de prédire le K_w dans le processus de dessalement sous des conditions de colmatage et ont observé que le modèle était compétent pour prédire les valeurs de K_w pour toute pression de fonctionnement, tout type de membrane et toute salinité d'alimentation dans une large plage.

Aish et al. 2015 ; Salgado-reyna et al.2015 ; Madaeni et al. 2015, Salami et al. 2016 ; Iranmanesh et al.2016 ; Cabrera et al. 2017,2018 ont travaillés sur la modélisation des performances du dessalement par osmose inverse (eau de mer/eau saumâtres) par réseaux de neurones. Zhao et al. 2005 ont prédit le TDS de permeat à travers une membrane hybride NF/OI d'après l'utilisation du modèle solution –diffusion modifié et deux RNA développés qui donnent plus de précision par apport les modèles existant Cependant, jusqu'à maintenant il n'y a pas assez des travaux reportés sur la modélisation des performances de dessalement de l'eau de mer par Membrane Hybride (NF/OI), la plupart des travaux ont étudiés les procédés séparément.

II.4. Intégration de l'énergie solaire dans le système du dessalement

Le dessalement par voie de l'énergie solaire en utilisant les méthodes conventionnelles peut être une alternative appropriée pour fournir de l'eau douce, en particulier pour les régions rurales et éloignées où de petites quantités d'eau, pour la consommation humaine, sont nécessaires (Al-Hallaj et al. 1998). En effet, d'immenses potentialités existent dans le fait d'associer les énergies renouvelables avec les systèmes de dessalement destinés à l'amélioration de l'approvisionnement en eau potable des régions arides (Mahmoudi et al. 2008 ; 2009 ; 2009a ; 2010).

Pour ce faire, l'attention doit être portée vers l'amélioration :

- de l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire ;
- des technologies de dessalement elles-mêmes ;
- de l'optimisation de leur couplage.

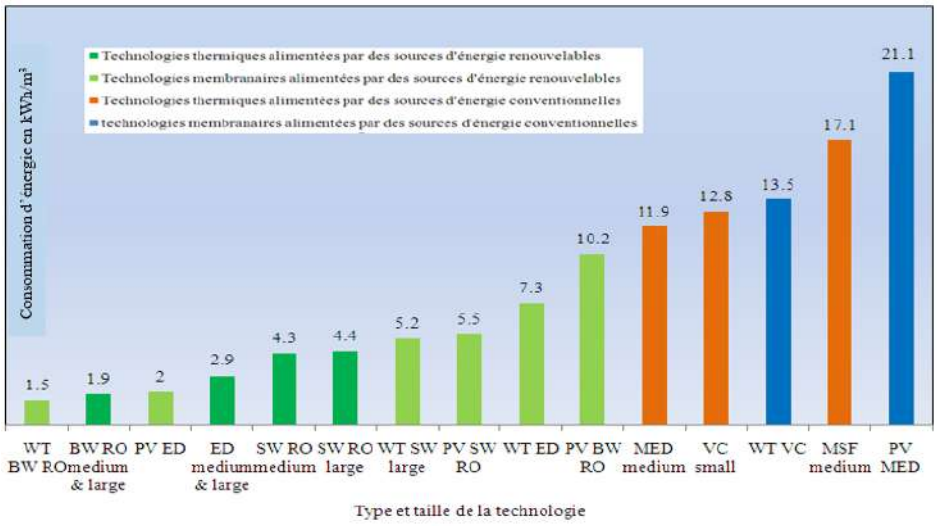


Figure II. 5. Consommation d'énergie de différents types de technologie de dessalement (Antonyan 2018).

II. 4.1. Energie solaire associée au procédé OI

La conception mise en œuvre dans les systèmes de dessalement PV-OI est une combinaison de membranes d'osmose inverse et des modules photovoltaïque (PV). La large utilisation de cette association est probablement due au fait que l'énergie photovoltaïque est la première à avoir conquis le marché, ils constituent le marché le plus dynamique. Dans les installations de dessalement PV/OI, les PV servent à alimenter avec ou sans régulation les pompes qui génèrent la pression requise pour alimenter en eau salée les membranes d'osmose inverse. La figure II.6 schématise le principe de cette association.

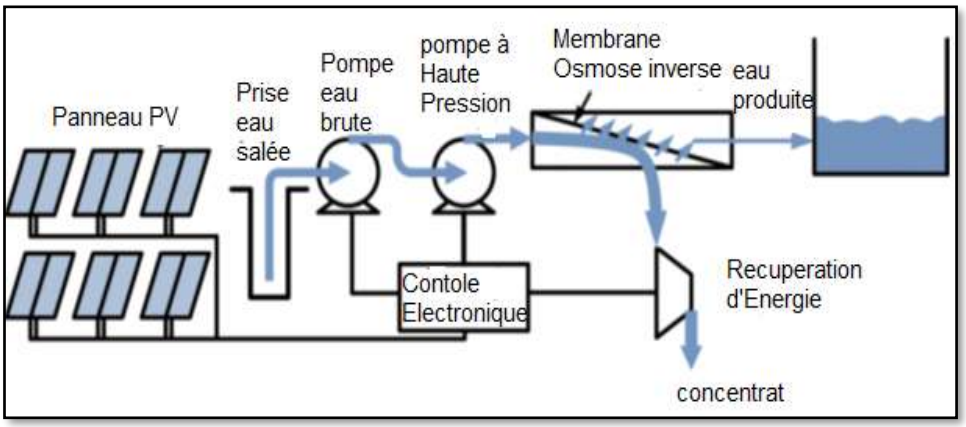


Figure II.6. Schéma de principe d'une unité PV-OI (Bilton et al.2011).

La combinaison potentielle de l'énergie solaire photovoltaïque (PV) à l'osmose inverse a généré un intérêt croissant en raison de la simplicité inhérente de ces deux technologies. De nombreuses installations ont été démontrées à travers le monde, en particulier dans les zones rurales pour les petites capacités de dessalement Herold et al.2001.

Les systèmes d'osmose inverse alimentés par les panneaux photovoltaïques (PV) ont été mis en œuvre par exemple dans les régions éloignées du désert égyptien Fahmy et al.2012, les zones rurales de la Jordanie Qiblawey et al.2011, et les communautés éloignées en Australie. La mise en œuvre des systèmes d'osmose inverse alimentés par PV a également été évaluée en Agrigente et en Sicile. La figure II.7 permet de voir des exemples d'unité d'osmose inverse alimentés par des panneaux solaires dans la région de la méditerranée Ghermandi et al.2009

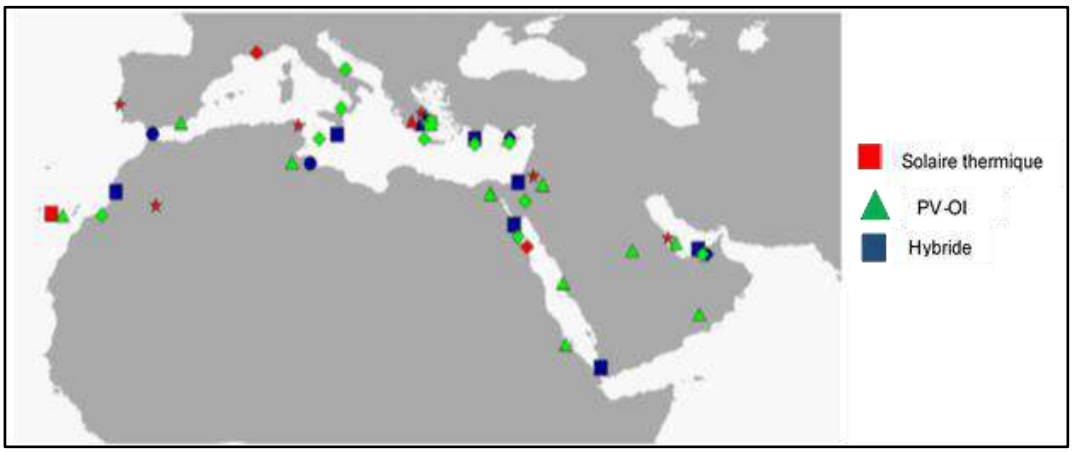


Figure II.7. Répartition géographique des systèmes solaires - OI

(Ghermandi et Messalem 2009).

La technologie PV peut être connectée directement à un système OI. De nombreux prototypes ont été mis en œuvre et testés dans différentes régions souffrant de pénurie d'eau douce. La figure II.8 représente le nombre des travaux publiés sur le couplage du procédé de dessalement Osmose Inverse et photovoltaïque de 1996 à 2020.

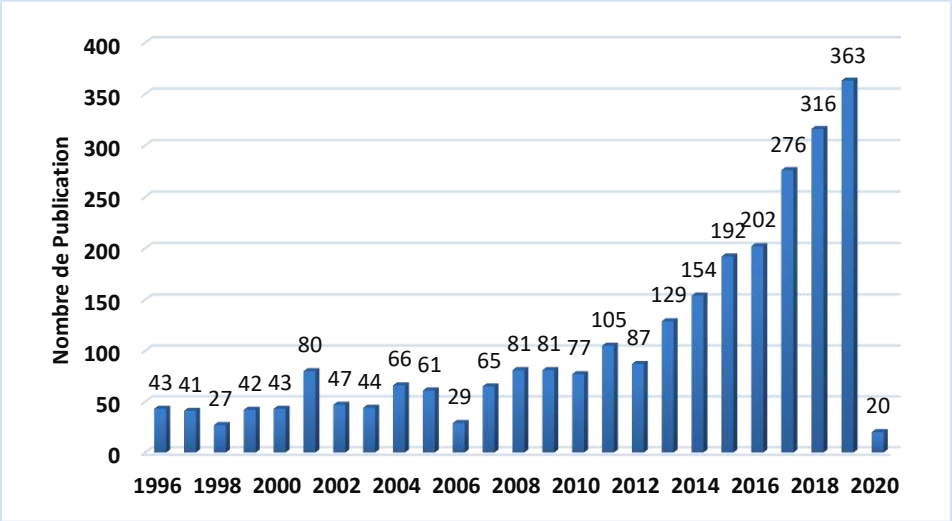


Figure II.8. Nombre des publications traitant le dessalement de l'OI/Energie solaire

(ScienceDirect le 01/10/2019).

Ahmad et Schmid 2002, ont étudié la faisabilité du dessalement d'eau saumâtre dans le désert égyptien à l'aide de systèmes photovoltaïques. Dans le même contexte, Gocht et al.1998, ont rapporté l'expérience jordanienne sur un système PV/OI d'eau saumâtre, tandis que Richards et Schäfer 2002, ont présenté un système de dessalement alimenté par l'énergie solaire pour les

communautés isolées d'Australie. Calise et al. 2014, ont étudié un nouveau système de tri-génération solaire intégrant des capteurs thermiques PV et le dessalement de l'eau de mer. Kalogirou 2013 et Tzen et al. 2003, ont évalué les systèmes de dessalement PV – OI. Al Suleimani et Nair 2000, ont relaté l'expérience omanaise et présenté une analyse détaillée des coûts d'une installation pilote installée dans le camp de Heelat ar Rakah. Thomson et al.2003,2005, ont rapporté une étude intéressante basée sur la simulation et la mise en œuvre d'un système d'Osmose inverse piloté par PV. Le système fonctionnait à débit variable et sans batteries de stockage. Hasnain et Alajlan1998 ont procédé une analyse économique d'une usine de dessalement d'eau saumâtre PV – OI située à Riyad en Arabie saoudite. Dont ils ont estimé le coût de l'eau produite à 0.5 $ US/ m^3. Herold et al.2001, ont étudié la faisabilité technique et la viabilité économique des systèmes PV-OI. Une petite station de dessalement pilote a été installé sur le terrain d'essai du Centre de recherche de l'énergie et l'eau de l'Institut technologique des îles Canaries (CIEA-ITC) à Pozo Izquierdo, sur l'île de Gran Canaria. Des tests expérimentaux pour un fonctionnement autonome en énergie de l'unité d'OI. Différentes stratégies de contrôle et de régulation pour augmenter la production quotidienne d'eau et réduire les coûts d'investissement sont étudiés.

Tableau II.2. Calcul de l'évolution des capacités de dessalement de l'eau en 2019-2030 (Antonyan 2019).

		Consommation d'énergie (kWh/m^3)		Capacité globale de dessalement (m^3/jour)	Production d'eau dessalée (m^3/h)	Pourcentage (%)	
2019	SWRO large	4,4		107892000	7193731	160	**Augmenté de 60%**
	Moyenne globale		7		4495500	100	
2030	PV SWRO	5,5		200000000	10673266	128	**Augmenté de 28%**
	Moyenne globale		7		8333333	100	

Le tableau II.2. Présente la production d'eau dessalée en 2019 et en 2030 par le dessalement en procédé osmose inverse et le dessalement par OI/ Photovoltaïque. En 2019, pour une capacité totale d'environ 107,9 millions m3 d'eau le dessalement par procédé Osmose inverse nécessite 4.4 kwh/m3 d'énergie, alors on peut produire 60% plus. Par conséquent, en 2030 si on prend en

compte la capacité mondiale prévue de dessalement et utiliser uniquement l'énergie photovoltaïque on peut produire 28 % de plus qu'en 2019.

II.4.2. Système de dessalement par NF-OI couplé avec énergie solaire

De nombreux travaux réalisés au niveau international mettent en évidence le couplage de dessalement hybride NF/OI avec la source d'énergie solaire photovoltaïque. La base de données consultée est Science Direct. La figure II.9, reporte le nombre de publications de 1997 à 2020.

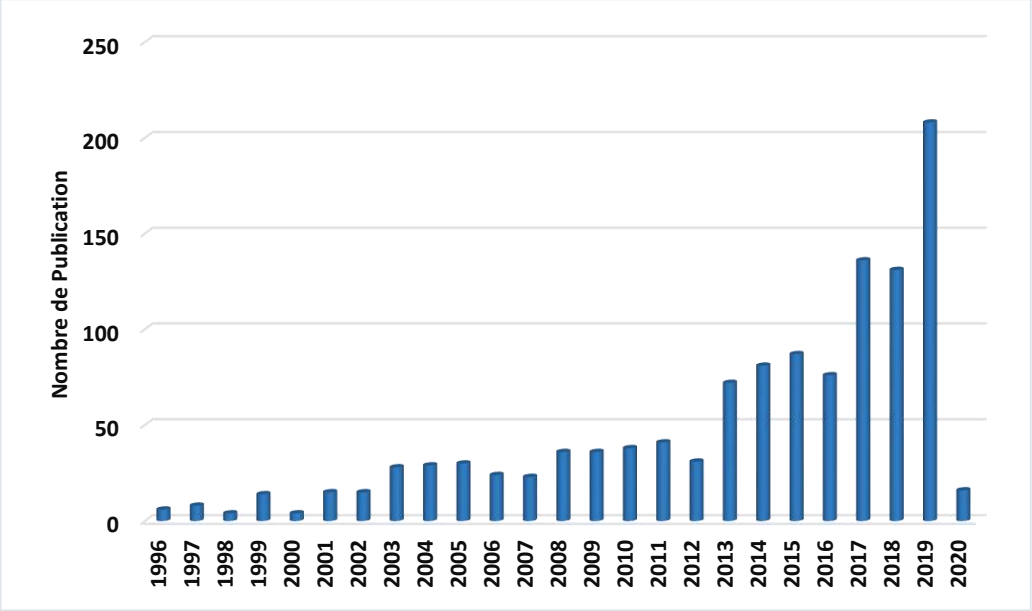


Figure II.9. Nombre de publication traitant l'hybride NF/OI/Energie Solaire (ScienceDirect le 01/10/2019).

Ghermandi et al.2009, ont discuté des avantages de l'utilisation de membranes NF pour la production d'eau d'irrigation, sur la base de la performance simulée d'une installation d'OI assistée par énergie solaire dans la vallée d'Arava. Ils ont fait valoir que le système réduirait la Consommation Spécifique d'Energie de 40% par rapport à l'usine OI, réduirait l'alimentation en eaux souterraines de 34% et augmenterait la production de biomasse totale des cultures irriguées de 18%.

Ben Meriem et al.2013, ont étudié les possibilités d'intégrer à la configuration de dessalement d'eau saumâtre par procédé d'OI alimentée par des panneaux photovoltaïques pour la production d'eau potable une membrane NF. Le système intégré (OI / NF / PV) remplace le système conventionnel OI / PV. Il s'agit d'une installation expérimentale pour une usine de

dessalement à l'échelle pilote composant des modules OI et NF fonctionnant avec des panneaux photovoltaïques. Les résultats obtenus sont discutés et comparés aux performances de chacun des OI et des modules NF séparément.

Shen et al. 2015, évaluer les performances d'un système NF / OI alimenté par énergie solaire pour le traitement des eaux saumâtres à haute teneur en fluorure dans une région rurale du nord de la Tanzanie. L'impact de la fluctuation de l'énergie sur les performances du système est examiné afin d'évaluer la robustesse à court terme de système en termes de quantité d'eau, de qualité et de consommation d'énergie spécifique.

II.4.3. Considération sur l'échelle économique

Une évaluation approfondie des incidences économiques, réglementaires et techniques du déploiement à grande échelle de l'énergie solaire a été faite par Merrick Merrick (2010). Il a indiqué, qu'en dépit de son coût actuel relativement élevé par rapport aux autres options technologiques, une combinaison de réduction des coûts et une politique de mesures de soutien pourraient conduire à une utilisation et à une application croissante des technologies d'énergie solaire. Par exemple, technologiquement parlant, les caractéristiques techniques et économiques de l'énergie photovoltaïque (PV) et de l'énergie solaire à concentration (CSP) auront des implications plus larges sur le système d'alimentation électrique. Il a noté également, que les préoccupations grandissantes concernant le changement climatique, vont favoriser le déploiement à grande échelle de l'énergie solaire. De plus, le développement du secteur des énergies renouvelables a un réel potentiel de créer de nouvelles industries et les emplois qui leurs sont associés. Si une transformation à grande échelle des systèmes de production d'électricité dans le monde doit arriver, et c'est là notre grand souhait, il faudra sans doute, qu'elle se produise avec une combinaison des sources d'énergies renouvelables comme, l'énergie solaire, le vent, la houle, et la géothermie. Lors d'un déploiement à grande échelle de l'énergie solaire, d'autres facteurs entre en jeu, tels que :

- La nécessité d'avoir un réseau performant de transport électrique ;
- L'exigence de la fourniture de l'énergie électrique à la demande, même pendant les moments difficiles.
- Le maintien de la qualité de service et enfin ;
- Le choix des politiques et des réglementations qui doivent aider une mutation efficace.

Ghermandi et Messalem (2009) répondent également aux préoccupations du marché en fournissant une évaluation approfondie de l'expérience acquise dans le domaine du dessalement par OI à partir du solaire. Les perspectives de pénétrations commerciales et de développement des principales solutions technologiques ont été identifiées et discutées. Ils ont conclu que, vu l'importance du potentiel, la concentration solaire est la technique la mieux appropriée et la plus prometteuse pour le dessalement par osmose inverse dans des installations de moyenne et grande échelle. Ils ont noté qu'il y a nécessité de tester et de démontrer qu'un tel potentiel prometteur peut piloter des installations à grande échelle.

(Ghermandi et Messalem 2009) ont poursuivi en signalant que le dessalement solaire par OI ne peut être compétitif, avec d'autres sources d'approvisionnement, que pour les régions éloignées où l'électricité du réseau n'est pas disponible et, où la demande en eau douce n'est satisfaite que par l'importation ou par des usines de dessalement de petites tailles pilotées par des moteurs diesels. Dans ce marché, la part du photovoltaïque (PV) et des usines de dessalement hybrides PV-OI vat probablement augmenter dans un proche avenir. Selon ces auteurs, les progrès rapides des deux technologies solaire, le CSP et le PV, qui sont potentiellement durables, offrent les meilleures perspectives pour l'ensemble de la mise en œuvre des techniques d'approvisionnement en eau.

II.4.4. Rapport coût-efficacité par rapport aux sources d'énergie conventionnelles

Le dessalement en utilisant des sources d'énergie renouvelables comme le solaire, la géothermie, l'éolien, et la houle ne peut se faire que par combinaison de deux technologies distinctes : la production d'énergie et le dessalement lui-même. Le défi consiste à trouver une conception optimale pour combiner les deux technologies dans un système adéquat (Mathioulakis et al. 2007). Bien que l'énergie solaire, par exemple, soit abondante et gratuite, le matériel pour sa capture, sa conversion sous formes d'énergie utile et son utilisation doivent se faire d'une manière efficace et, économiquement viable, de plus, le stockage (quand il est nécessaire) n'est pas gratuit (Gude et Nirmalakhandan, 2010). Nous pouvons dire qu'il n'est pas possible de ramener le coût du dessalement utilisant l'énergie thermique solaire direct, à gamme comparable, au niveau du coût du dessalement conventionnel, du moins pas dans un avenir proche. Par contre, ce qu'on peut dire actuellement, c'est que le dessalement à l'énergie solaire trouvera des applications, dans un premier temps, dans des sites isolés où il n'y a pas de raccordement au réseau électrique. Les distillateurs solaires et l'utilisation directe de l'énergie géothermique, par exemple, sont inclus dans ce scénario. Dans les distillateurs solaires l'énergie

nécessaire pour produire de l'eau dessalée est élevée car, la chaleur latente de condensation n'est pas récupérée. D'où la nécessite d'une grande surface, ce qui contribue à l'augmentation du capital investi dans l'unité. Il est à noter qu'une centrale géothermique a un coût d'installation beaucoup plus élevé par rapport à une centrale à combustible fossile (coût par MW installé), mais son coût de production d'électricité est beaucoup moindre.

Pour les applications indirectes, du matériel supplémentaire est nécessaire pour convertir l'énergie renouvelable en travail mécanique, thermique ou en énergie électrique. Il est à noter que les rendements de conversion de cette énergie renouvelable demeurent faibles, c'est ce qui augmente le capital investi et inhibe, quelque peu, l'investissement dans les Energie Renouvelable :

- Dans de nombreux pays où il y a manque d'eau douce, la puissance électrique est subventionnée : c'est le cas de l'Algérie ;
- Les énergies solaire et éolienne ne sont pas des sources continues or, le fonctionnement des procédés de dessalement, pour des raisons techniques et économiques, nécessitent un fonctionnement en continu. Cela nécessite donc des équipements supplémentaires pour stocker les énergies thermique et électrique produites. C'est ce qui contribue à une augmentation du coût d'investissement des usines de dessalement de l'eau.

À l'heure actuelle, les systèmes de capteurs solaires à haute température offrent l'électricité la moins chère dans des stations de production d'électricité solaire à grande échelle (> 10 MW). Les coûts d'installation sont de l'ordre de 2 à 3 US $ par watt, ce qui entraîne un coût de production de l'énergie électrique solaire variant de 0.1 à 0,20 US $ le kWh. De plus, dans les grandes centrales hybrides à concentration solaire, le cycle est combiné au gaz naturel ou au charbon. Une telle combinaison peut réduire les coûts d'installation à 1,5 US $ par watt et donc réduire le coût de production de l'énergie solaire en dessous de 0,08 $ par kWh. En se basant sur la conception et l'exploitation de 79 unités expérimentales à travers le monde, (Ghermandi et Messalem2009) ont enquêté sur l'état de développement du dessalement solaire par OI. Ils ont soutenu que le dessalement par Osmose inverse alimenté par le photovoltaïque est mûr pour sa mise en œuvre commerciale. Cependant, (DeCanio et Fremstad 2011) ont noté que le coût de l'électricité produite par la technologie PV reste élevé par rapport aux sources d'énergies conventionnelles. Bien que des études de développement soient en cours dans de nombreux pays, aucune approche de conception standard de panneaux PV n'a été développée.

La faisabilité technique de différents concepts a été démontrée dans un nombre relativement important d'études de cas.

Les systèmes PV qui sont couplés directement à des groupes motopompes, à vitesse variable et à courant continu, semblent être les plus efficaces énergétiquement et les plus rentables pour des stations à petite échelle de dessalement par OI. N'ayant pas suffisamment de recul, certaines préoccupations ont, tout de même, été exprimées au sujet de leur performance à long terme. Malgré ces bons résultats, (Ghermandi et Messalem2009) ils ont noté que la combinaison d'énergie solaire avec d'autres sources d'énergie supplémentaires, peut être bénéfique dans le dessalement à petite et à grande échelle. Par exemple, dans les petits systèmes, les panneaux photovoltaïques peuvent se combiner avantageusement avec des éoliennes. Cet aspect de complémentarité des deux sources d'énergies renouvelables peut être exploité pour réduire les coûts globaux. Dans le même ordre d'idée, pour les grands systèmes de dessalement, l'énergie solaire à concentration et le carburant de chauffage peuvent aider à donner de la stabilité au fonctionnement de l'unité pendant la nuit ou pendant les périodes de faible ensoleillement. Quel que soit le système, de petite ou de grande taille, sa connexion à un réseau électrique pour une puissance combinée, œuvrera pour un fonctionnement stable. (Ghermandi et Messalem 2009) ont conclu que, vu l'état de l'art actuel, l'utilisation du solaire pour le dessalement par OI n'est compétitif, par rapport à d'autres sources d'approvisionnement, que dans des régions éloignées.

Enfin, le choix de la méthode de dessalement affecte de manière significative le coût du dessalement de l'eau. C'est pour cela que les méthodes thermiques sont utilisées principalement dans les systèmes de moyenne et grande taille, tandis que les méthodes membranaires, principalement OI, sont utilisées dans des systèmes de moyenne et basse capacité.

Néanmoins, au cours des dernières années, l'osmose inverse est devenue le choix optimal pour des unités encore plus grandes. Dans des conditions particulières, les systèmes hybrides, associant le solaire et le vent, peuvent offrir une production accrue et plus stable de l'eau douce.

II.5. Conclusion

Cette partie de revue présente les tendances et développements récents axés principalement sur la faisabilité de remplacement les combustibles fossiles utilisant en dessalement de l'eau de mer par les énergies renouvelables réduiront considérablement le coût de production d'eau. La revue met également en évidence l'application d'un réseau de neurones artificiels (RNA) en modélisation ont été développés pour optimiser les performances du système de dessalement par membrane hybride NF/OI en analysant les données complexes expérimentales et en temps réel.

En littérature, peu de travaux ont appliqué les RNA en modélisation des performances du système de dessalement de l'eau de mer par procédé hybride NF/OI

Chapitre III
Matériels et méthodes

III.1. Introduction

La modélisation mathématique est le procédé descriptif des problèmes du monde réel en tant des équations mathématiques et l'utilisation de certaines approches pour résoudre les équations mathématiques est le guide pour déconstruire et résoudre le problème initial (Ersoy et Moscardini 2013).

D'une manière générale, le modèle mathématique d'un système quelconque est un outil qui permet d'avoir la réponse du même système sans avoir recours à l'expérience qui peut être coûteuse, lente et parfois dangereuse.

Un modèle mathématique est un ensemble d'équations (algébriques, différentielles, aux dérivées partielles, …etc.) permettant de décrire les performances d'un procédé quelconque.

Le choix d'un modèle repose sur plusieurs paramètres tels que la fiabilité et le domaine de validité (Ljung et Glad 1994).

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents modèles de simulation du système de dessalement, suivi d'une étude détaillée de modélisation des panneaux solaire (cellules solaires).

Dans la première partie, nous allons développer deux modèles mathématiques. Le premier est un modèle multi-variable non linéaire basé sur des hypothèses réelles de filtration membranaire, il nous permet de développer un nouveau modèle de pseudo n^{ieme} ordre d'adsorption sans tenir compte du type d'espèces retenues. Il est exprimé par un ensemble d'équations non linéaires. D'une autre part, le deuxième modèle mathématique est beaucoup plus développé consiste à appliquer l'apprentissage supervisé et les algorithmes de rétro propagation des réseaux de neurones artificiels (RNA) afin d'obtenir un modèle valide du système à commander les performances du système de dessalement hybride NF/IO au cours du temps. Les réseaux de neurones artificiels ont été utilisés en raison de leur flexibilité pour se conformer à tout type des données expérimentales et de leur succès face à divers problèmes.

La complexité de la résolution exige l'utilisation de l'outil informatique qui permis de résoudre des problèmes mathématiques complexes dans des délais très réduits, la validation du modèle est tester par une simulation avec des données expérimentales extraits de littérature.

Dans la deuxième partie une description de l'énergie solaire par photovoltaïque, une compréhension de la cellule de photovoltaïque et ces caractéristiques, ainsi que une modélisation photovoltaïque et les différents modèles de simulation des panneaux solaire à l'échelle de la cellule.

III.2. Modélisation de performance du système de dessalement

III.2.1. Premier modèle mathématique

Un certain nombre d'études basées sur les lois pseudo et physiques de la filtration (Langmuir, Freundlich, pseudo premier et second ordre) existent dans la littérature donnant des résultats incorrects basés sur une hypothèse, bien que cette hypothèse utilisée dans la formulation des lois de filtration soit incorrecte. Pour rectifier ces erreurs, un nouveau modèle a été proposé de pseudo n^{ième} ordre (PNO), en utilisant des hypothèses basées sur des conditions réelles :

- La surface solide n'est pas uniforme ;
- La chaleur d'adsorption dépend du taux de récupération de la surface solide ;
- L'adsorption se fait en utilisant deux couches ;
- Aucun équilibre n'existe entre les molécules des deux phases ;
- La filtration peut être adressée par adsorption ;
- Les mailles morphologiques de la structure membranaire sont équivalentes aux sites ;
- Le colmatage commence après le remplissage des mailles ;
- Les paramètres physico-chimiques sont indépendants de la température et de la concentration initiale.

Une comparaison a été effectuée entre PPO, PSO et le nouveau modèle PNO pour mettre en évidence leurs performances et l'optimisation de l'équation de pseudo-ordres, à l'aide du logiciel MATLAB.

Pour tenir compte de la variation de taux de filtration au cours du temps on suppose que :

- Les espèces chimiques présentés dans l'alimentation et qui sont retenu par la membrane peuvent être assimilées à une adsorption c'est à dire à une fixation des espèces chimiques dans les pores et/ou à la surface de la membrane ;
- La vitesse d'adsorption à un instant "t" est déterminée par l'écart entre l'état du système (espèces chimiques/membrane) et son état à l'équilibre, donc on peut écrire pour une réaction de pseudo n^{ième} ordre :

$$\frac{dq}{dt} = k_n(q_{max} - q_t)^n \qquad \text{(III.1)}$$

Où

n nombre réel ($n \in R^+$).

q (t) Quantité adsorbée par unité de masse de la membrane (mg/g).

q_{max} Quantité adsorbée maximum par unité de masse de la membrane (mg/g).

k_n Constant de la réaction [$(mg/g)^{1-n}s^{-1}$].

On suppose que l'élimination des substances adsorbées est incomplète par un équilibre global de la masse adsorbée en tenant compte du fait que la masse retenue par la membrane est différente de celle initialement présente dans l'alimentation avec le résultat suivant (Tien et Ramaro,2011) :

$$q(t).M = \delta.V.C_{in} \quad \text{(III.2)}$$

Où, *M* est la masse de la membrane, *V* est le volume cumulatif de filtrat, C_{in} est la concentration en masse des substances chimiques dans le flux d'alimentation et δ est le taux de rétention de la membrane. ($0 < \delta < 1$) alors :

si $\delta = 0$: pas d'adsorption,

si $\delta = 1$: absorption total

En remplaçant Eq (III.2) dans Eq (III.1) on trouve Eq (III.3) :

$$\frac{d(\delta.V.C_{in}/M)}{dt} = k_n[(\frac{\delta.V.C_{in}}{M})_{max} - \left(\frac{\delta.V.C_{in}}{M}\right)_t]^n \quad \text{(III.3)}$$

$$\frac{dV_t}{dt} = k_n(\frac{\delta.V.C_{in}}{M})^{n-1}.(V_m - V_t)^n \quad \text{(III.4)}$$

Avec :

$$\begin{cases} \frac{dV(t)}{dt} = K_n(V_m - V_t)^n \\ V_{t=0} = V(0) = 0 \end{cases} \quad \text{(III.5)}$$

$$K_n = k_n(\frac{\delta.C_{in}}{M})^{n-1}$$

III.2.1.1. Equation de Premier pseudo ordre

Le premier pseudo-ordre pour n égale 1 de (Eq. III.5) est une simple analyse cinétique de l'adsorption, il est donné par l'équation suivante (Ho et Mckay 1998 ; Ho et Mckay 1999) :

$$V = V_m[1 + e^{-k_1 t}] \quad \text{(III.6)}$$

Où :

k_1 Constante de la réaction d'adsorption (min^{-1}) et $V_m$le volume de filtrat.

La constante k_1 est déterminé par la courbe de variation de V en fonction de t.

III.2.1.2. Equation de pseudo second ordre

L'ordre de l'équation (III.5) n'égale à 2, elle est basée sur l'adsorption à l'équilibre comme expression suivante de la forme (Ho et Mckay 2000):

$$\frac{1}{V} = \frac{1}{V_m} + \frac{1}{k_2 V^2 m} \cdot \frac{1}{t} \quad \text{(III.7)}$$

Ou k_2 est la constante de vitesse de l'équation pseudo seconde (kg/g min). Le volume de filtrat V et le constant k_2 peuvent être déterminés expérimentalement à partir de la pente de la courbe V en fonction de temps.

III.2.1.3. Modélisations du phénomène d'Adsorption

Pour le n^{eme} ordre de l'équation pseudo ordre, l'intégration de l'équation (III.4) entre l'état initiale ($t = 0, V = 0$) et l'état instantanée($t = t, V = V$) est donné par l'équation suivante :

$$\int_{V_m}^{V_m - V} (V_m - V)^{-n} d(V_m - V) = -\int_0^t k_n dt \quad \text{(III.8)}$$

L'intégrale de l'équation (III.8) sera de la forme suivante :

$$V = V_m - \left[\frac{V_m^{n-1}}{1 + t(n-1)K_n V_m^{n-1}}\right]^{\frac{1}{n-1}} \quad \text{(III.9)}$$

Eq. (III.9) est la formule du modèle proposé pour le procédé de l'adsorption.

Le modèle proposé a vérifié les conditions aux limites suivantes :

$$\lim_{t=0} V = 0 \ \ et \ \lim_{t \to \infty} V = V_m$$

Utilisation du logiciel Origin 8 Pro pour indiquer les paramètres respectivement constants $K_n\ et\ C$. La relation nous permet d'écrire l'équation finale du modèle.

Le modèle sera écrit comme suit :

$$V(t) = (1.68276 - 0.58581.n) - \left[\frac{(1.68276-0.58581.n)^{n-1}}{1+t(n-1)(\ 3.67.10^{-8}e^{\left(\frac{n}{0.17911}\right)}+8.6468.10^{-4})(1.68276-0.58581.n)^{n-1}}\right]^{\frac{1}{n-1}} \quad \text{(III.10)}$$

Selon les données expérimentales, il existe une variation importante du volume de filtrat en fonction de la concentration en substance adsorbée. Afin d'établir une relation entre le pseudo-ordre de l'équation et la concentration, On obtient l'équation suivante :

$$V(t) = V_m - \left[\frac{{V_m}^{(b0+b1*c+b2*C^2)-1}}{1+t*(d0+d1*C)*((b0+b1*c+b2*C^2)-1)*{V_m}^{(b0+b1*C+b2*C^2)-1}}\right]^{\frac{1}{\left((b0+b1*C+b2*C^2)-1\right)}} \quad \text{(III.11)}$$

Avec :

$$n = b_0 + b_1 * C + b_2 * C^2$$

$$k = d_0 + d_1 * C$$

$${b_0}^* = b_0 - 1$$

Après la reformulation du nouveau modèle, nous avons obtenu la Eq (12):

$$V\ (t)\ = V_m - \left[\frac{{V_m}^{({b_0}^*+b1*C+b2*C^2)}}{1+t*(d0+d1*C)*({b_0}^*+b1*C+b2*C^2)*{V_m}^{({b_0}^*+b1*C+b2*C^2)}}\right]^{\frac{1}{({b_0}^*+b1*C+b2*C^2)}} \quad \text{(III.12)}$$

III.2.1.4. Méthode Mathématique

Afin de résoudre l'équation (III.12) et optimiser des paramètres nous avons établi un programme sur l'environnement du logiciel MATLAB et faire une comparaison entre les modèles. Le modèle est une équation non linéaire à plusieurs variables. L'instruction lsqcurvefit est appropriée pour résoudre des problèmes non linéaires à plusieurs variables en présence d'une base de données et estimer le coefficient de corrélation entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites. Lsqcurvefit a utilisé un modèle mathématique basé sur les algorithmes génétiques et les algorithmes de Lavenberg-Marquard (LM) pour déterminer les paramètres de l'équation V_m, K_n et le pseudo-ordre de l'équation n respectivement par régression non linéaire. On obtient de très bons ajustements aux données expérimentales car la plupart de leurs

coefficients de corrélation de régression respectifs (R^2) sont proches de l'unité (Ho et Mckay 2000).

III.2.1.5. Mesure de précision

La régression non linéaire a été développée en tant que facteur important dans la conception des systèmes d'adsorption. Cependant, des travaux récents ont montré l'erreur en développement (entre les prévisions et les données expérimentales) et tester la capacité du modèle (Dastkhoon et al. 2017).

Il existe de nombreuses façons de mesure la précision d'un modèle. Toutefois, l'erreur absolue moyenne (MAE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) sont l'une des nombreuses mesures permettant d'évaluer la qualité et l'efficacité d'un modèle. Le modèle le mieux adapté est celui avec la valeur la plus basse de MAE et de RMSE, les deux peuvent aller de zéro à l'infini (Ho et Mckay 2000 ; Foo et Hammed 2010).

III.2.1.5.1. L'erreur absolue moyenne *MAE*

L'erreur absolue moyenne (mean absolute error) *MAE* est la moyenne de toutes les erreurs absolues ; c'est la différence entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites ou calculées pour chaque instance (Mall et al. 2006) comme indique (Eq. III.13).

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\left(Y_{i,exp} - Y_{i,cal}\right)\right| \qquad \text{(III.13)}$$

avec:

n : Nombre des points.

$Y_{i,exp}$ et $Y_{i,cal}$: Sont respectivement l'expérimentale et calculé des valeurs obtenu d'après le model proposé.

III.2.1.5.2. Erreur quadratique moyenne *RMSE*

L'erreur quadratique moyenne (root mean square error) *RMSE* est une mesure du modèle de performance. Pour ce faire, il mesure la différence entre les valeurs calculées et les valeurs expérimentales, ce qui offrirait un meilleur ajustement à mesure que l'ampleur de l'erreur diminue (Dastkhoon et al.2017 ; Vishnuvardhan et al. 2017).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_{i,exp}-Y_{i,cal}\right)^2}{n}} \quad \text{(III.14)}$$

Où :

n : Nombre des points

$Y_{i,exp}$ et $Y_{i,cal}$: Sont respectivement l'expérimentale et calculé des valeurs obtenues lors du model proposé.

III.2.1.6. Cas étudie

"Filtration dans une Membrane Track-etched en Polycarbonate : Albumin Sérum Bovin (ASB)"

III.2.1.6.1. Collecte des données expérimentales

Afin d'étudier et de démontrer l'absorption de la solution d'albumine de sérum bovin (BSA) en utilisant un milieu membranaire en polycarbonate track-etched (PCTE), des données expérimentales rapportées par Ho et Zydney existent dans la littérature. Ho et Zydney (Ho et Zydney 2000), mené une expérience de mesure et d'essai d'échantillons de suspensions à différentes concentrations allant de 0,5 à 5 g/L, sous différentes pressions. Les données expérimentales ont été résumées dans le tableau III.1.

Tableau III.1. Conditions expérimentales rapportées par Ho et Zydney (Ho et Zydney2000).

Media de Membrane	Membrane track etched en polycarbonate. Diamètre de pore 0,2µm Epaisseur Normal 10µm Porosité 0,14
Suspensions	Solutions d'albumine sérum bovine de Concentration : 0,5 ; 1,0 ; 1,4 ; 2,0 ; 5,0 g/L
Pression opérationnelle	0,055 ; 0,138 ; 0,276 ; 0,552 bar

Par conséquence, la capacité du modèle proposé à décrire les données cinétiques expérimentales a été évaluée en ajustant cette loi de vitesse aux données expérimentales. De plus, les valeurs ont été obtenues en numérisant les valeurs de l'expérience à l'aide de Getdata. Graphique. Logiciel Digitizer 2.24. Les résultats sont résumés dans le tableau 2 et sur la figure III.1.

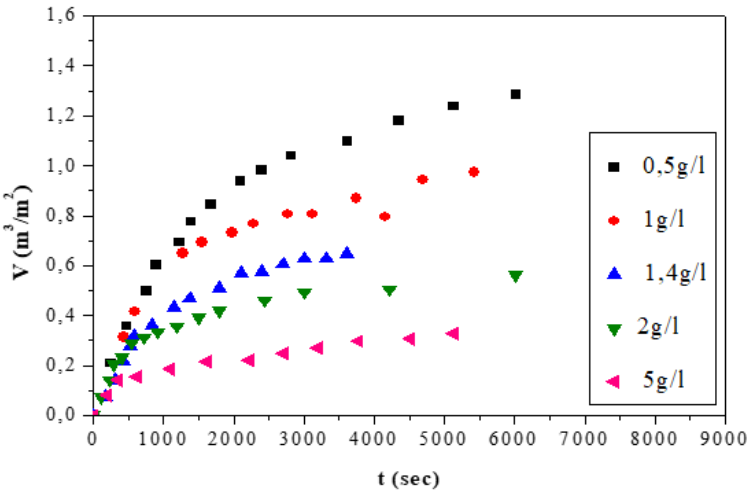


Figure III.1. Volume de filtrat en fonction du temps pour différentes concentrations.

Tableau III.2. Données expérimentales extraient par logiciel Getdata. Graph. Digitizer (Tien et Ramarao, 2011).

C=0,5 gL^{-1}		**C=1,0 gL^{-1}**		**C=1,4 gL^{-1}**		**C=2,0 gL^{-1}**		**C=5,0 gL^{-1}**	
t (sec)	**v (m^3m^{-2})**	**t (sec)**	**v (m^3m^{-2})**	**t (sec)**	**v (m^3m^{-2})**	**t (sec)**	**v (m^3m^{-2})**	**t (sec)**	**v (m^3m^{-2})**
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
250,87	0,208	433,90	0,315	176,99	0,077	103,56	0,0737	193,55	0,080
473,87	0,358	596,61	0,417	309,73	0,142	233,01	0,142	354,84	0,142
752,61	0,497	1274,58	0,648	420,35	0,22	284,79	0,204	612,90	0,154
891,98	0,601	1545,76	0,694	530,97	0,279	414,24	0,233	1096,77	0,185
1226,48	0,694	1979,66	0,731	575,22	0,320	543,69	0,289	1612,90	0,216
1393,73	0,775	2277,97	0,768	840,71	0,362	724,92	0,312	2225,81	0,222
1672,47	0,844	2766,10	0,805	1150,44	0,433	906,15	0,335	2709,68	0,25
2090,59	0,936	3118,64	0,805	1371,68	0,469	1190,94	0,357	3193,55	0,272
2397,21	0,983	3742,37	0,87	1792,04	0,510	1501,62	0,392	3774,19	0,296
2815,33	1,041	4149,15	0,796	2101,77	0,569	1786,41	0,42	4516,13	0,306
3623,69	1,098	4691,52	0,944	2389,38	0,575	2433,66	0,459	5129,03	0,327
4348,43	1,179	5423,73	0,9722	2699,12	0,605	3003,24	0,494	5709,68	0,333
5128,92	1,237			3008,85	0,629	4220,06	0,505		
6020,91	1,283			3318,58	0,629	6006,47	0,562		
				3606,19	0,647				

III.2.2. Deuxième modèle mathématique

Au cours des dernières décennies, les réseaux de neurones artificiels ont passé avec succès les étapes de la recherche et trouvé des applications en temps réel dans divers domaines de l'aérospatiale, la défense, l'automobile, des mathématiques, l'ingénierie, la météorologie, la médecine et bien d'autres (Sabokpa et al. 2012, Kalogirou et al .2013, Ammi et al.2015, Luciano et al. 2018).

De plus, la performance du modèle NN a été validée pour les prédictions extrapolées et le modèle utilisé dans la recherche a fourni les prédictions les plus précises par rapport aux autres méthodes.

III.2.2.1. Modélisation

Un réseau de neurone comme déjà décrit dans le deuxième chapitre est un outil de calcul inspiré par les systèmes neuraux biologique. L'un des réseaux de neurones les plus populaires appliqués à la modélisation d'un large éventail de systèmes non linéaires, en particulier de procédés de génie chimique, est le réseau de neurones de type feed- forward (RNFF) (Lee et Park 1999 ; Silva et al. 2000) à algorithme de rétro-propagation du Levenburg-Marquardt (Hagan et al.1996), est adapté dans cette étude au traitement de notre problème.

Trois modèle seront déterminés à partir de même réseau établi, pour la prédiction de débit de permeat (Q_p), la conductivité de permeat (δ_p) et le taux de conversion d'unité de dessalement (y). L'organigramme du procédé de modélisation est présenté dans la figure III.3.

La méthodologie de l'identification a été adaptée aux réseaux de neurone. Elle passe par quatre étapes :

- Choix de la structure du réseau ;
- Choix de l'entrée ;
- Algorithme d'apprentissage ;
- Validation.

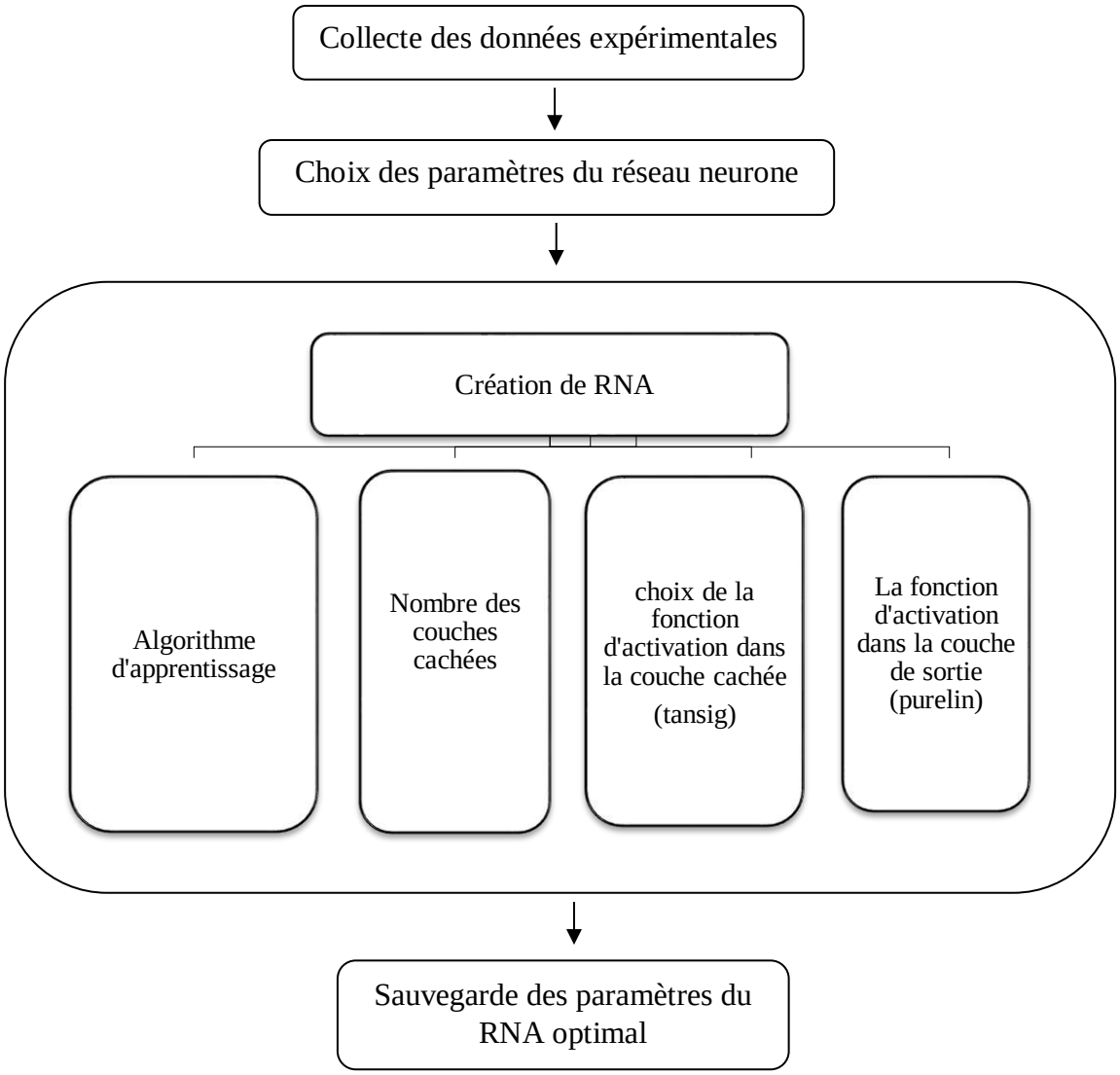


Figure III.2 Organigramme du procédé de modélisation RNA.

III.2.2.2. Collecte des données et prétraitement des données

Dans cette étude, pour la construction du modèle RNA nous avons utilisés les données expérimentales d'une unité de dessalement par procédé hybride NF/OI de l'eau de mer, disponible dans la littérature (Hamed et al.2009), ont été présentés dans le tableau III.4 tandis que la taille de la base est 60 valeurs pour chaque paramètres (60×8).

III.2.2.3. Description de l'installation pilote

Une installation pilote de dessalement de l'eau de mer est testé dans laquelle le produit de membrane de nanofiltration NF est envoyé à l'unité OI et son rejet de saumure est utilisé comme complément d'appoint pour l'unité MSF, l'unité de NF reçu de l'eau de mer prétraitée avec une température d'alimentation varie entre 24 °C et 34 °C et fonctionne avec une pression d'opération d'environ 23,54 Bar un taux de conversion de 53-57 %. L'unité d'osmose inverse ayant reçu le produit de NF en tant qu'alimentation, la pression de fonctionnement a été maintenue à 58,86 Bar et à température varie de 23 jusqu'au 34 °C, où le taux de conversion de perméat des premier et deuxième tube de pression était de 30 et 21 % respectivement, alors que la conversion globale du système é tait d'environ 45%. La figure III.3 montre le schéma du système pilote de dessalement tri-hybride NF / RO/MSF. Dans ce contexte, la variation des paramètres de fonctionnement de la membrane de nanofiltration dont la pression, la température, la conductivité, le débit en fonction du temps seront considérés comme des entrées du modèle RNA. D'autre part, la conductivité du perméat ; le débit de perméat et le taux de conversion globale de l'unité seront les sorties

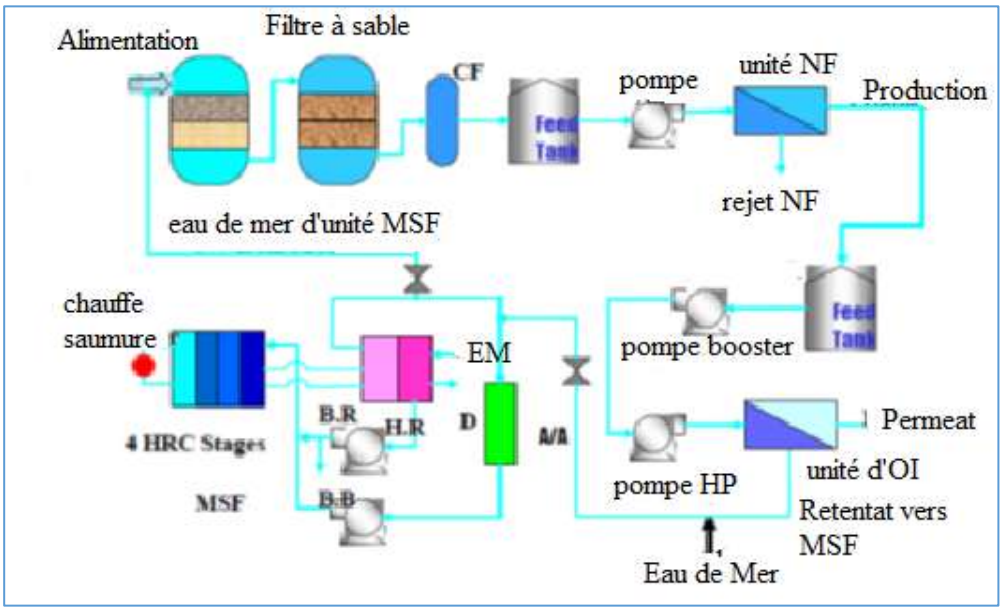


Figure III.3. Système pilote d'usine de dessalement d'eau de mer tri-hybride NF/OI /MSF (Hamed et al. 2009).

L'analyse statistique des données expérimentales est effectuée par logiciel STATISTICA. Les valeurs des écarts types (STD), moyenne (moy), minimum (Min) et maximum (Max) de la base de données utilisée sont présentées dans le tableau III.3.

Tableau III.3. Analyse statistique des entrées et des sorties de l'installation pilote de dessalement.

Catégorie de variable	Paramètres	Symbol	Unité	STD	Moy	Min	Max
Entrées	Temps	t	h	385,92	680,317	25,197	1343,830
	préssion	p	Bar	2,821	27,079	23,315	31,233
	temperature	T	℃	2,7422	29,063	23,968	33,789
	Debit d'alimentation	Q_a	m^3/h	0,088	7,748	7,586	8,014
	Conductivité d'alimentation	δ_f	$\mu S/cm$	535,01	60519,50	59851,06	61872,34
Sorties	Conductivité de perméat	δ_p	$\mu S/cm$	49,023	1141,962	1039,823	1250,000
	Debit de perméat	Q_p	m^3/h	0,042	1,406	1,288	1,483
	Taux de conversion	y	%	1,018	44,308	41,093	45,951

Tableau III.4. Données expérimentales d'entrée et de sortie extraits avec logiciel Getdata. Graph. Digitizer (Hamed et al.2009).

N° D'ordres	Temps (h)	Pression (Bar)	Température (℃)	Débit d'alimentation (m^3/h)	Conductivité d'alimentation ($\mu S/cm$)	Taux de conversion du perméat (%)	Débit de perméat (m^3/h)	Conductivité de perméat ($\mu S/cm$)
1	25,197	23,579	25,852	7,817	60170,213	41,579	1,317	1117,257
2	48,294	24,041	25,987	8,014	61021,277	41,255	1,288	1128,319
3	71,391	23,579	25,785	7,971	61234,043	41,093	1,288	1117,257
4	94,588	23,447	26,323	7,929	60382,979	41,255	1,298	1139,381
5	121,785	23,447	25,785	7,886	60382,979	44,494	1,385	1084,071
6	144,882	23,447	23,969	7,628	61553,191	43,360	1,346	1073,009
7	167,979	23,315	24,103	7,671	61765,957	43,360	1,366	1106,195
8	180,577	23,381	25,718	7,757	61766,000	43,522	1,376	1117,260
9	191,076	23,447	27,063	7,800	61659,574	43,684	1,376	1139,381
10	216,273	24,041	27,534	7,800	61234,043	44,008	1,385	1139,381
11	241,470	23,976	27,466	7,843	61127,660	44,818	1,424	1139,381
12	264,567	23,976	27,265	7,800	60702,128	44,980	1,463	1095,133
13	287,664	23,976	26,928	7,671	60808,511	45,951	1,424	1106,195

14	310,761	24,036	23,579	7,800	61765,957	44,170	1,385	1172,566
15	335,958	24,507	24,041	7,586	61872,340	43,036	1,356	1095,133
16	361,155	23,969	23,514	7,757	61021,277	44,818	1,405	1084,071
17	384,252	24,507	24,041	7,757	60808,511	44,818	1,395	1061,947
18	407,349	24,036	23,579	7,628	60702,128	44,980	1,424	1039,823
19	432,546	24,440	23,976	7,714	60489,362	44,656	1,415	1050,885
20	455,643	23,901	23,447	7,671	60489,362	44,656	1,385	1061,947
21	478,740	24,036	23,579	7,714	60382,979	45,304	1,434	1084,071
22	503,937	23,969	23,514	7,757	60382,979	44,818	1,415	1128,319
23	527,034	23,969	23,514	7,757	60276,596	44,170	1,366	1150,442
24	539,633	26,659	26,152	7,757	60276,600	44,332	1,376	1139,380
25	552,231	29,484	28,924	7,757	60382,979	44,494	1,376	1150,442
26	575,328	30,493	29,914	7,800	61127,660	44,494	1,385	1205,752
27	600,525	29,955	29,386	7,714	60382,979	44,008	1,366	1139,381
28	623,622	30,493	29,914	7,800	60276,596	45,304	1,444	1250,000
29	648,819	30,022	29,452	7,800	59957,447	44,818	1,424	1238,938
30	671,916	29,484	28,924	7,671	60063,830	45,304	1,424	1216,814
31	697.113	30,022	29,452	7,586	60063,830	44,980	1,395	1172,566

32	720,210	30,493	29,914	7,671	60063,830	44,494	1,376	1205,752
33	745,407	30,426	29,848	7,714	59851,064	45,466	1,424	1194,690
34	768,504	30,426	29,848	7,757	59851,064	45,628	1,434	1095,133
35	791,601	30,493	29,914	7,714	60063,830	45,142	1,405	1194,690
36	814,698	31,502	30,903	7,628	60063,830	45,951	1,483	1216,814
37	839,895	26,996	26,483	7,800	60276,596	44,656	1,444	1227,876
38	854,593	28,341	27,803	7,714	60276,600	44,700	1,415	1183,630
39	865,092	29,283	28,727	7,671	60276,596	44,332	1,405	1161,504
40	886,089	29,417	28,858	7,800	60276,596	45,142	1,405	1106,195
41	911,286	29,484	28,924	7,800	60276,596	45,142	1,454	1073,009
42	936,483	30,022	29,452	7,757	60063,830	44,818	1,454	1161,504
43	946,982	31,839	31,234	7,800	60063,800	44,817	1,446	1139,380
44	959,580	30,022	29,452	7,843	60063,830	44,818	1,434	1128,319
45	984,777	30,022	29,452	7,586	60170,213	44,494	1,434	1117,257
46	1007,870	29,484	28,924	7,757	60170,213	44,656	1,444	1161,504
47	1030,970	29,955	29,386	7,714	60170,213	43,360	1,395	1128,319
48	1056,170	29,753	29,188	7,800	61234,043	43,522	1,395	1161,504
49	1081,360	29,955	29,386	7,714	60808,511	44,494	1,454	1073,009

50	1102,360	29,955	29,386	7,714	60382,979	44,008	1,434	1150,442
51	1127,560	29,552	28,991	7,757	60170,213	44,008	1,415	1172,566
52	1150,660	29,014	28,463	7,757	60170,213	44,008	1,415	1150,442
53	1173,750	29,014	28,463	7,628	60063,830	44,656	1,463	1150,442
54	1201,050	30,022	29,452	7,800	60170,213	44,170	1,444	1150,442
55	1224,150	29,955	29,386	7,628	60170,213	43,846	1,405	1161,504
56	1247,240	30,695	30,112	7,757	60170,213	44,494	1,444	1172,566
57	1270,340	31,031	30,441	7,757	60382,979	44,494	1,424	1161,504
58	1295,540	28,812	28,265	7,586	60276,596	44,170	1,424	1172,566
59	1318,640	29,821	29,254	7,800	60276,596	44,332	1,434	1161,504
60	1343,830	28,812	28,265	7,843	60382,979	44,170	1,434	1238,938

III.2.2.4. Architecture de réseau de neurone

Les réseaux de neurones artificiels sont des techniques numériques capables d'établir des relations complexes entre des entrées –sorties. Ils ont la capacité d'apprendre et de modéliser une base de données à partir des modèles linéaire et non linéaire entre les entrées et les valeurs prédites correspondantes. La sélection des entrées appropriées est une étape préliminaire de la modélisation. D'autre part, la détermination du nombre optimal de couches cachées et de nœuds au sein de chaque couche est un réel problème et aucune procédure n'est disponible pour le savoir. Pour cela, une approche par essais et erreurs (plusieurs exécutions) a été suivi pour obtenir la meilleure architecture de réseau (Malinov et Shan 2003).

Dans cette étude, 60 expériences ont été effectuées, il y avait cinq paramètres d'entrées qui étaient : le temps(h), température (°C), pression (Bar) conductivité d'alimentation ($\mu S/cm$) et le débit d'alimentation (m^3/h) , leurs valeurs sont présentées respectivement dans le tableau III.1. Par conséquent, la figure III.4 présente le diagramme schématique d'un réseau de neurones artificiels (RNA) dans lequel 5 neurones d'entrée ont été sélectionnés à la couche d'entrée, 3 de sorties et 8 couches cachées a été sélectionné expérimentalement pour donner des résultats satisfaisants permettant de résoudre le problème actuel. Des bases de données de très petite taille peuvent empêcher l'apprentissage. Chaque nœud d'une couche donnée est connecté à tous les nœuds de la couche précédente. Le nœud récapitule les entrées pondérées et un biais sont répertoriés dans le tableau III.5, et transmet le résultat à travers une fonction linéaire ou non linéaire (Abbas et Bastaki 2005). Le tableau III.5 montre le poids et le biais du modèle NN optimisé. Notre réseau est caractérisé par les équations (III.15) et (III.16) :

$$x_i = f(Z_j) \qquad \text{(III.15)}$$

$$Z_j = f_h(\sum_{i=1}^{n} w^L{}_{ji} x_i + b_{hj}) \;;\; j = 1,2,\ldots..,m \qquad \text{(III.16)}$$

Il génère la valeur résultante par le biais de connexions sortantes aux neurones de la couche suivante, où il subit le même processus que celui donné par l'équation III.17 (pour tout instant des sorties Z_i de la couche cachée alimenté au neurone *k* de la couche de sortie donne la sortie (S_k) :

$$S_k = f_0(\sum_{i=1}^{m} w^h{}_{jk} z_i + b_{0k}); \;\; k = 1,2,\ldots..,l \qquad \text{(III.17)}$$

l est le nombre de neurones dans la couche de sortie.

La combinaison de l'Eq III.16 et Eq III.17, la relation entre la sortie S_k et les entréesxi de l'RNA est obtenue :

$$S_k = f_0\left(\sum_{i=1}^{m} w^h{}_{jk} f_h\left(\sum_{i=1}^{n} w^l{}_{ji} x_i + b_{hj}\right) + b_{0k}\right) \quad k = 1,2,\ldots,l \qquad \text{(III.18)}$$

Dans cette étude, le sigmoïde tangent (Tansig) en tant que fonctions de transfert a été utilisé dans la couche cachée (équation (III.19)) et la fonction de transfert purement linéaire (Purelin) dans la couche de sortie (équation (III.20)). Cependant, la fonction Tansig produit des sorties comprises entre –1 et +1, tandis que la fonction de transfert linéaire génère des sorties comprises entre –∞ et + ∞ (Si-moussa et al. 2008 ; Tambe et al. 1996) :

$$Z(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \qquad \text{(III.19)}$$

$$Z(x) = x \qquad \text{(III.20)}$$

Considérant que la normalisation est nécessaire quand il y a une différence dans les plages des données d'entrée. Dans ce travail, toutes les données d'apprentissage ont été normalisées entre -1 et 1, en utilisant Eq. III.21 est exprimé dans ce qui suit :

$$x_{norm} = \frac{2(x_i - \min(x_i))}{max\ (x_i) - \min(x_i)} - 1 \qquad \text{(III.21)}$$

Avec x_i est la variable d'entrée ou de sortie, x_{max} et x_{min} sont égal aux valeurs maximales et minimales notés pour chaque variable de x. Afin de déterminer le modèle du système RNA, un programme du réseau de neurones est exécuté dans l'environnement de Logiciel MATLAB (version R2016b).

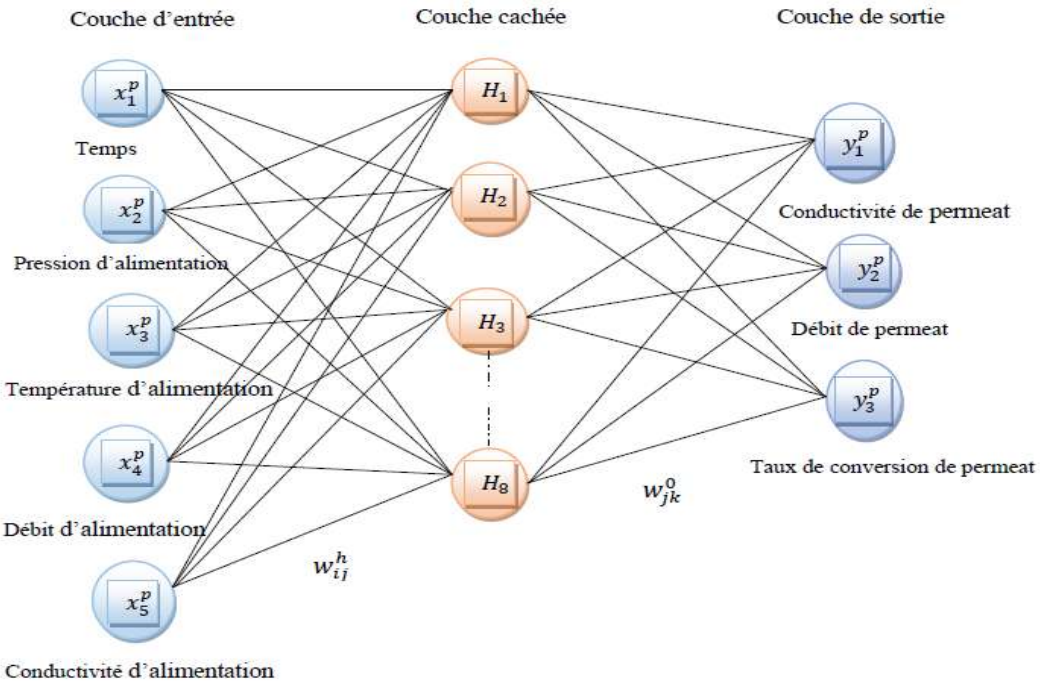


Figure III.4. Schéma de principe d'un modèle de réseau de neurones artificiel

III.2.2.5. Paramètres statistiques

Les paramètres statistiques du modèle NA calculée afin de prédire la conductivité de permeat, le débit de perméat, et le taux de conversion sont le coefficient de corrélation R, l'erreur quadratique moyenne $RMSE$ (racine carrée de la somme moyenne des carrés) Eq. (III.14) et l'erreur absolue moyenne (MAE), ainsi que l'erreur relative absolue moyenne (Average Absolute Relative Déviation) $AARD$ (Si-moussa et al. 2008). Les équations sont exprimées ci-dessous

$$R = \frac{\sum_i (y_{exp} - \overline{y_{exp}})(y_{cal} - \overline{y_{cal}})}{\sqrt{\sum_i (y_{exp} - \overline{y_{exp}})^2}\sqrt{\sum_i (y_{cal} - \overline{y_{cal}})^2}} \quad \text{(III.22)}$$

$$AARD\% = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{y^{exp} - y^{cal}}{y^{exp}}\right| \quad \text{(III.23)}$$

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\left(Y_{exp} - Y_{cal}\right)\right| \quad \text{(III.24)}$$

Ici, N est le nombre d'expériences, est la valeur expérimentale pour chaque paramètre, y_{cal}est respectivement la valeur prédite de la ième expérience calculée par le modèle pour chaque paramètre,$\overline{y_{exp}}$ et $\overline{y_{cal}}$ sont respectivement les moyennes arithmétiques des y_{exp} et y_{cal}.

III.2.2.6. Régression linéaire multiple

La régression linéaire multiple est un outil statistique dont l'objectif est d'établir une relation linéaire entre une propriété d'intérêt (les sorties) et un ensemble de variables (les entrées) (Ge et al.2019) et ce suivant l'équation III.25 :

$$sortie = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i d_i \qquad \text{(III. 25)}$$

Où d_i représente les entrées, a_i leur coefficient et a_0 est une constante (appelée intercepté). La même base de données utilisée pour le développement de RNA a été utilisée pour développer RLM par utilisation de la fonction MATLAB ***"regress".***

III.2.2.7. Etude de sensibilité

Afin d'étudier la sensibilité des performances de l'usine pilote de dessalement hybride NF / OI aux entrées et de trouver les paramètres les plus dominants. La méthode des poids a été utilisée dans cette étude. La méthode des poids a été proposée initialement par Garson 1991 et répétée par Goh 1995, comme procédure de partitionnement des poids de connexion pour déterminer l'importance relative des différentes entrées. Le procédé consiste essentiellement a partitionné les poids de connexion à la sortie de chaque neurone caché en composants associés à chaque neurone d'entrée. Les méthodes de poids comportent deux étapes :

Étape 1 : Pour chaque neurone caché h, divisez la valeur absolue du poids de connexion de la couche cachée d'entrée par la somme de la valeur absolue du poids de connexion de la couche cachée d'entrée de tous les neurones d'entrée.

$$Q_{hi} = \frac{|w_{hi}|}{|\sum_{i=1}^{n} w_{hi}|} \qquad \text{(III.26)}$$

Étape 2 : Pour chaque neurone d'entrée i, divisez la somme de Q_{ih} pour de chaque neurone caché par la somme de chaque neurone caché de la somme pour chaque neurone d'entrée de la somme multipliée par 100.

$$R_I(\%) = \frac{\sum_{h=1}^{nh} Q_{hi}}{\sum_{i=1}^{ni}\sum_{h=1}^{nh} Q_{hi}} \times 100 \qquad \text{(III.27)}$$

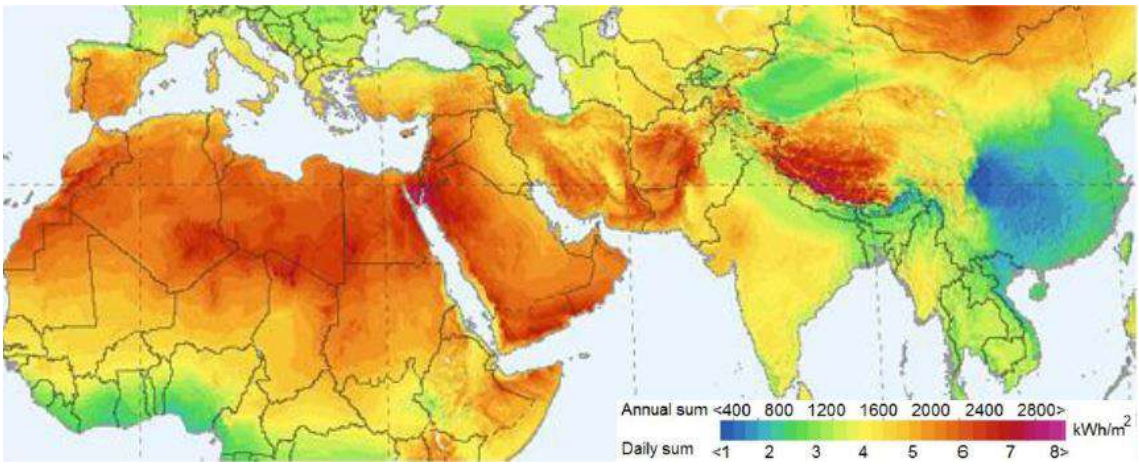
III.3. Description et modélisation du système d'énergie solaire

III.3.1. Introduction

On prévoit que d'ici 2050, les émissions mondiales des unités de dessalement utilisant des combustibles fossiles atteindront un taux annuel de 400 millions de tonnes d'équivalents carbone. Par conséquent, l'énergie renouvelable est relativement peu coûteuse, une alternative à l'énergie fournie de combustible fossile, elle ne présente aucun impact environnemental négatif (Ellabban et al.2014).

L'énergie solaire est la forme la plus abondante d'énergie renouvelable à travers le monde, de nombreuses régions du Moyen-Orient et d'Afrique du nord reçoivent 5-7 kWh d'insolation solaire chaque jour solaire, par exemple, l'Arabie Saoudite reçoit une insolation de 5,5 kWh / m² / jour (230w / m²) (Negewo 2012). La plupart de ces régions sont riches en eau saumâtre ou en eau de mer, mais souffrent d'un manque d'eau douce suffisante, ce qui les rend idéales pour le dessalement par énergie solaire. L'énergie solaire peut être utilisée directement pour chauffer le dessalement d'eau saline indirectement en convertissant en électricité fonctionnant des pompes à haute pression. Pour convertir l'énergie solaire en électricité, généralement utilisée, les cellules photovoltaïques (PV), le rapport coût-efficacité de la durée de vie et le problème de stockage de l'énergie. Néanmoins, restreignez l'application pratique des cellules PV (Tran et Smith. 2017).

A cet effet, La modélisation mathématique de photovoltaïque est primordiale, permet de caractériser le comportement du système photovoltaïque, afin d'établir une relation directe entre les différents composants du système et d'introniser un rapport entre l'énergie produite par le système photovoltaïque et la demande énergétique de la station de dessalement.



FigureIII.5. Irradiation solaire distribué sur le moyen orient, golf et Arabie région (Sabry et al. 2015).

D'après la figure III.5 la région de Moyen Orient reçoit un moyen d'irradiation journalière de 5-7 kwh/m^2 et la région d'Arabi Saoudite reçoit aussi d'un moyen d'irradiation journalière 5.5 kwh/m^2. La plupart de ces régions sont riche de l'eau de mer et saumâtres mais souffrent d'une pénurie en eau potable. Pour ces raisons, le dessalement par énergie solaire est devenu la solution idéale pour satisfaite les besoins en eau potable.

III.3.2 Modélisations de la consommation énergétique du procédé de dessalement

L'association du dessalement aux énergies renouvelables un moyen de réduire la consommation d'énergie dans les processus de dessalement de l'eau de mer (Hassan et al.2002).

Les dépenses en énergie peuvent dépasser 50% du coût de fonctionnement de chaque procédés (Goosen et al. 2010 ; Ghaffour 2009).Le coût global incluant la production d'eau et la consommation d'énergie de ces systèmes dépend fortement des paramètres spécifiques de chaque technologie.

Les besoins en énergie du procédé membranaire hybride NF-SWRO sont nettement inférieurs à ceux du procédé SWRO classique.

III.3.2.1. Modélisation de la consommation énergétique du procédé Osmose inverse

Les besoins en énergie d'une unité d'OI tenu comptent le type du système de récupération d'énergie installé au niveau de la station.

Installation de l'échangeur de pression

$$P_{dess,ep}(y,p,\eta_p,\eta_E) = \frac{P_A(1-\eta_E(1-y))}{36.6\times y\times \eta_{pump}} \quad \text{(III.28)}$$

Installation de la turbine

$$P_{\ dess,turb} = \frac{P_A}{36{,}6.\eta_p.y} - \frac{1}{36{,}6}.(P_A - \Delta P).\eta_{turb}(\frac{1}{y} - 1) \quad \text{(III.29)}$$

Avec :

P_A : La pression d'entrée

ΔP : La perte de charge dans les modules

η_{turb} : L'efficacité de la turbine

η_E : L'efficacité de la pompe d'échangeur de pression

η_{pump} : L'efficacité de la pompe haute à pression

Y : Le taux de conversion de la membrane

III.3.2.2. Modélisation de la consommation énergétique du procédé hybride NF/OI

Les besoins en énergie lors du dessalement de l'eau de mer par les procédés à membrane ont été calculés pour la partie dessalement uniquement à partir de l'équation générale (Hassan et al.2000):

$$P = \frac{Q_f * H_f * g}{366 * Q_P * e} \quad \text{(III.30)}$$

L'équation de l'énergie du procédé NF-OI sera de la forme suivante :

$$P_{dess,(NF-SWRO)} = \frac{\left(Q_{f_{(NF)}} * H_{f_{(NF)}} * g\right) + \left(Q_{f_{(SWRO)}} * H_{f_{(SWRO)}} * g\right)}{\left(366 * Q_{P_{(Final)}} * e\right)} \quad (III.31)$$

Où :

P: Est l'énergie exprimée en KWh / m^3,

$Q_f et Q_P$: Sont les débits d'alimentation et de produit final en m^3/h respectivement.

H_f: Est la hauteur de pression en mètres m

g: Gravité spécifique de l'eau de mer égale 1,03

e: Est le rendement de la pompe (≈0.85)

III.3.3. Description du système photovoltaïque associé au dessalement

La conception, l'optimisation et la réalisation des systèmes photovoltaïques sont des problèmes d'actualité puisqu'ils conduiraient sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire (Kassmi 2007). A ce jour, le photovoltaïque a trouvé son utilité dans des applications à petites échelles et pour des systèmes de transmission isolés.

L'énergie photovoltaïque "PV" est une source d'énergie intéressante. Elle est renouvelable, inépuisable et non polluante. Afin d'élargir son domaine d'application et lever les contraintes de coût, le système devrait présenter une bonne exploitation des cellules photovoltaïques (Zerhouni et al. 2008).Une cellule photovoltaïque transforme l'énergie solaire en énergie électrique. Cette technique de production d'électricité présente de nombreux avantages :

- L'énergie solaire est inépuisable à l'échelle humaine ;
- La production d'électricité au moyen de panneaux solaires n'est pas polluante ;
- Le silicium, matériau principal d'une cellule PV, est très abondant ;
- Les panneaux solaires ont une durée de vie de 20 à 30 ans ;
- Il est possible d'utiliser une batterie pour stocker l'énergie convertie par le panneau solaire.

Pour atteindre une puissance importante, il faut associer plusieurs cellules en série et en parallèle. Cette interconnexion des modules forme un champ photovoltaïque, et le même cas pour les panneaux pour atteindre la puissance souhaite, courant et la tension.

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque (Mohanty et al.2016).

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, et chaque type possède un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. Il existe trois principaux types de cellules sont :

- Cellules monocristallines : Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi le coût le plus élevé ;

- Cellules poly-cristallines : Leurs coût de fabrication est moins important, vu leur conception facile. Cependant leur rendement est plus faible ;
- Cellules amorphes : Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

III.3.4. Modélisation du système photovoltaïque / dessalement

Lorsque la lumière est absorbée par une cellule solaire, des électrons sont libérés et se déplacent en fonction du potentiel électrique interne, de sorte que lorsqu'une charge est connectée entre les contacts un courant électrique circule. La tension à travers une cellule solaire est dépendant principalement de la conception et des matériaux de la cellule, alors que le courant électrique dépend principalement du rayonnement solaire incident et la zone cellulaire. La sortie d'une cellule solaire typique, exposée au soleil, augmente de zéro au lever du soleil à un maximum à midi solaire puis retombe à zéro au crépuscule. Le rapport entre l'énergie électrique produite par une cellule solaire et l'énergie solaire incidente l'irradiante est connue sous le nom d'efficacité de la cellule PV. Des groupes de cellules sont montés ensemble sur une plaque de verre et câblé en série pour former un module PV typiquement autour de 1 m² de taille. Des groupes de modules peuvent être connectés électriquement pour former un générateur photovoltaïque.

La capacité de production d'énergie d'un générateur photovoltaïque est exprimée en watts-crête (Wc). Une cellule PV de 1 Wc produit 1 W d'énergie électrique lorsqu'il est exposé au soleil éclairement énergétique de 1000 W/m² à une température de cellule 25 °C. La plupart des systèmes PV utilisent des cellules en silicium monocristallin ou poly cristallin.

En plus avancé, les modules en silicium cristallin ont des rendements supérieurs à 15% bien que les rendements varient généralement entre 13 et 15%. Autres composants du système PV, tels que le câblage, batteries, contrôleurs de charge de batterie, onduleurs etc. (Labouret et Villoz 2006) sont appelés "composants de la balance du système" (CBS). Ces composants fournissent l'interface nécessaire avec la grille ou une application spécifique telle que charge domestique, équipement de télécommunication, etc. L'énergie produite par les cellules solaires dépend du rayonnement solaire de la région géographique spécifiée, des cellules PV et leur efficacité.

L'énergie produite de module photovoltaïque est calculée par l'équation :

$$P_{PVm} = \eta_{PV} A_{PV} G = \eta_{mp} \eta_T G A_{PV} \quad \text{(III.32)}$$

Avec

η_{PV}: L'efficacité globale,

A_{PV}: La surface PV (m²),

η_T : L'efficacité totale (de la poussière ; pertes de l'onduleur et pertes dues aux connexions :

$$\eta_T = \eta_{pouss} \eta_{ond} \eta_{con} \eta_{mod} \quad \text{(III.33)}$$

η_{mod} est l'efficacité du module PV au point maximal de la puissance, sa valeur diminue lorsque la température de la cellule augmente Eq. (III.34) :

$$\eta_{mod} = \eta_{mod,SOC} + \mu_{P,MP}(T_C - T_{SOC}) \quad \text{(III.34)}$$

Ou :

$\eta_{mod,soc}$: est l'efficacité du module sous les conditions opérationnelles standard.

$\mu_{p,mp}$: est le coefficient d'efficacité de température au point maximale de puissance.

T_C : est la température réelle de la cellule.

T_{SOC} : est la température sous les conditions opérationnelles standard (25 °C).

L'efficacité du module sous les conditions opérationnelles standard est donnée comme suit :

$$\eta_{mpSOC} = \frac{I_{mpSOC} V_{mpSOC}}{A_{PVM} G_{SOC}} \quad \text{(III.35)}$$

I_{mpSOC} : Le courant du module sous les conditions opérationnelles standard (A),

V_{mpSOC} : La tension à la puissance maximale

A_{PVM} : La surface de module m²

G_{SOC} = 1000 W/m² est le rayonnement solaire sous les conditions opérationnelles standard.

Les grandeurs I_{mpSOC}, V_{mpSOC}, A_{PVC}de l'Eq. (III.33) sont spécifiques au module et sont fournis par le fabricant.

Le coefficient d'efficacité de température $\mu_{p,mp}$ au point maximale de puissance est donné par l'équation suivante :

$$\mu_{p,mp} = \eta_{mpSOC} \frac{\mu_{VOC}}{V_{VOC}} \quad \text{(III.36)}$$

μ_{VOC} est le coefficient de température de tension fourni par le fabricant.

Alors la production d'énergie des cellules PV est donnée par l'équation suivante :

$$P_{PV,Mod} = \eta_{mp}\eta_{T.coef}A_{PVM}t_{hd}G = P_{pv,tot}0.001t_{hd} \quad \text{(III.37)}$$

G: Rayonnement solaire incident moyen (W/m²).

P_{PVM} : Production d'énergie journalière moyenne des modules PV (kWh/jour).

t_{hd}: Les heures de lumière Moyenne par jour dans une région (h/jour).

Dans l'équation précédente, les modules PV sont considérés inclinés à l'angle optimal pour des performances maximales.

La production d'énergie requise P_{PV}(kWh / jour) est donné par l'équation :

$$P_{PV,tot} = \frac{P_{DES}}{t_{hd}/24+(1-t_{hd}/24)\alpha_{BCH}\alpha_{BDCH}} \quad \text{(III.38)}$$

P_{DES} : L'énergie requise par le dessalement (kWh/jour),

α_{BCH}: L'efficacité de charge de la batterie,

α_{BDCH}: L'efficacité de décharge de la batterie.

Et la surfaces occupée par les panneaux :

$$A_{PV} = P_{PVM}A_{PVC} \quad \text{(III.39)}$$

A_{PVC}: Surface totale de panneaux solaire

N_{PVM} : Nombre total des modules nécessaires

$$N_{PVM} = \frac{1}{t_{hd}/24+(1-t_{hd}/24)\alpha_{BCH}\alpha_{BDCH}}\frac{P_{DES}}{P_{PVM}} = \frac{P_{pv,tot}}{P_{pv,mod}} \quad \text{(III.40)}$$

Calcul de la capacité de stockage des batteries

L'avantage d'utiliser un stockage de batteries dans le système PV/OI est de fournir un flux d'énergie constant pendant la nuit et d'amortir les variations de la production d'électricité dues aux nuages qui passent et aux jours de pluie (Gude et Nirmalakhandan 2010). Le calcul de la capacité nominale de la batterie prend en compte les besoins et les jours d'autonomie d'une part, et de la profondeur de décharge d'autre part, la capacité est donnée par l'équation :

$$C = \frac{N_a E_C}{U P_d} \quad \text{(III.41)}$$

P_d : Profondeur de décharge (0,7 à 0,8).

E_c: Énergie consommée (besoins énergétiques).

U: Tension continue du système (volt).

N_a: Nombre des jours d'autonomie de la batterie (5 jours)

Le nombre (N_B) de batteries données par équation suivante :

$$N_B = {}^{C}/_{C_U} \quad \text{(III.42)}$$

C_U : Capacité d'une seule batterie

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les différentes méthodes utilisées afin de modéliser les performances membranaires dans une usine de dessalement fonctionnant en énergie solaire, ainsi les besoins énergétiques de la station. Dont, deux modèles ont été établi prédire les performances membranaires par modélisation empirique et Réseau de Neurone Artificielle, afin d'établir une relation entre le procédé du dessalement et les panneaux photovoltaïques, une modélisation de ce dernier est faite.

Le premier est un modèle non linéaire de volume absorbant au cours du temps basé sur les hypothèses réelles de rétention des particules à travers la membrane. Le deuxième est un modèle basé sur les réseaux de neurones et la simulation de processus peuvent être appliquée à la modélisation prédictive et à l'optimisation des performances d'usine de dessalement. Les objectifs sont de parvenir à une meilleure conception, à améliorer l'efficacité des procédés. La complexité de la résolution exige l'utilisation de l'outil informatique qui permit de résoudre les deux modèles et les résultats seront présentés dans le prochain chapitre.

Chapitre IV
Résultats et discussion

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats effectuées de chaque modèle établi, tout d'abord on commence par le premier modèle qui a été l'objet d'une publication dans journal "Environnemental Engineering Research" (Adda et al. 2019). Dans ce chapitre, les résultats obtenus sont discutés, il est organisé comme suit :

Dans la première partie, une résolution numérique du premier modèle obtenu d'après un programme développé sur l'environnement du logiciel MATLAB, ainsi une simulation est réalisée avec des données expérimentales proposées de littérature. Permettant d'indiquer les paramètres cinétiques mieux adaptés au processus d'adsorption afin d'optimiser les performances membranaires.

Deuxième modèle, on présentera le développement de modèle réseau de neurone artificiel pour prédire les performances du dessalement par procédé NF/OI. Par la suite l'établissement de formules mathématiques à partir de ces modèles, présentation et discussion les résultats de l'analyse de sensibilité par la méthode de "poids".

Dans la deuxième partie, un dimensionnement du système de dessalement NF/SWRO/PV, ainsi une estimation de besoin énergétique de la station de dessalement de capacité de 1,406m^3/h.

IV.2. Résultats de la simulation du premier modèle

La validation du modèle est l'étape critique du processus de modélisation nécessite une simulation. Les résultats obtenus par la simulation dépendent fortement de l'exactitude du modèle mathématique.

Le Pseudo Premier, Seconde Ordre (PPO, PSO) et le nouveau modèle (PNO) peuvent suivre une régression non linéaire. Les résultats d'exécution du programme développé ont été fourni à l'aide des données expérimentales de l'adsorption de l'Albumine Serum Bovine (ASB), ainsi les valeurs de la constante de vitesse de chaque modèleK_n, le pseudo-ordre n optimal d'équation PNO (Equ.III.12) et les paramètres statistiques, sont présentés respectivement dans le tableau IV.1 et la figure IV.2.

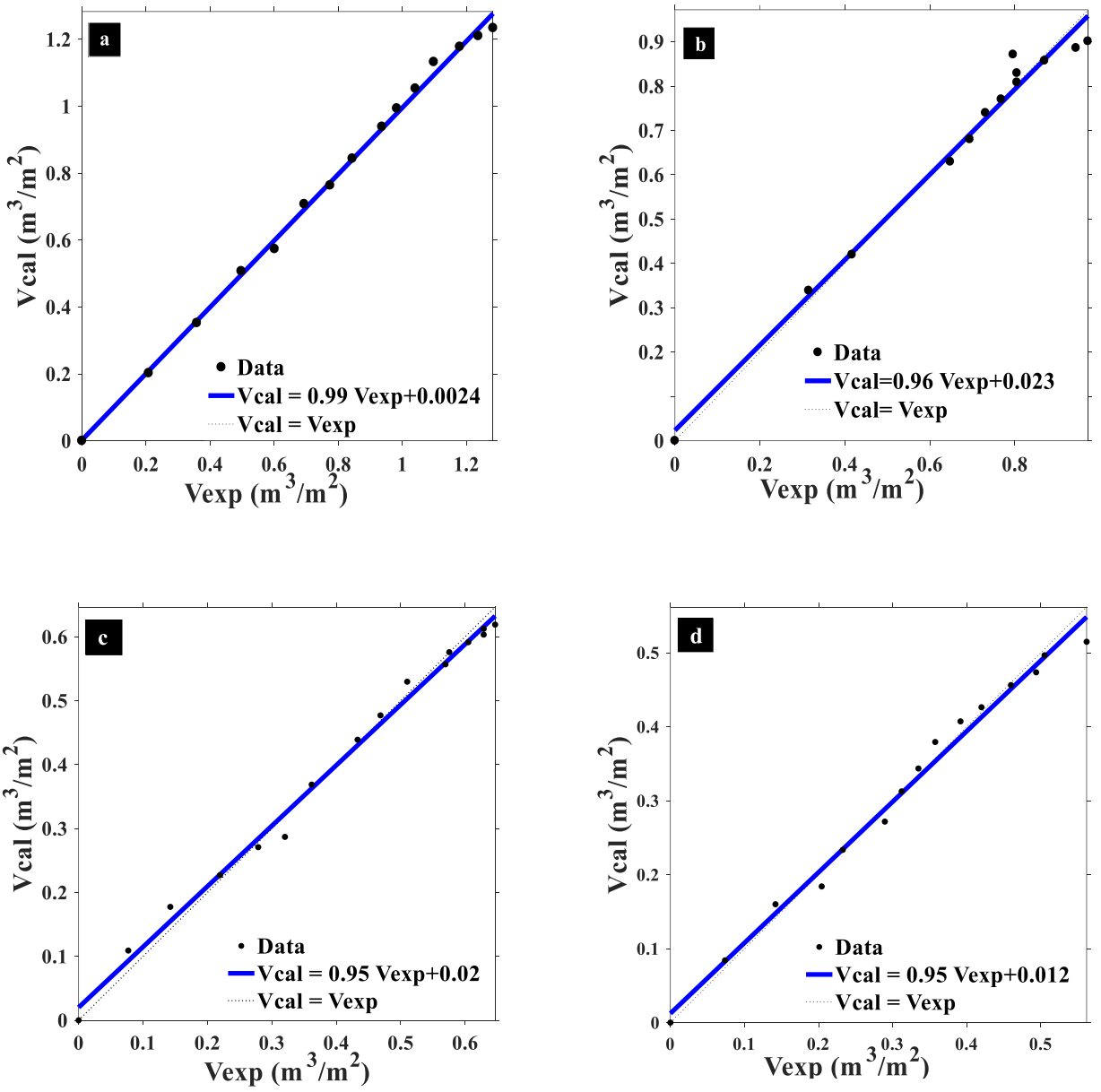
Tableau IV.1. Paramètres cinétiques et coefficients de corrélation de la régression non linéaire de l'équation du PPO, PSO et PNO pour l'adsorption de la BSA sur une membrane en polycarbonate track-etched (PCTE) sous différentes concentrations $(a) c = 0{,}5 g/L, (b) c = 1{,}0 g/L, (c) c = 1{,}4 g/L, (d) c = 2{,}0 g/L and\ (e)\ c = 5{,}0\ g/L.$

Concentration	**C=0.5gL^{-1}**	**C=1.0gL^{-1}**	**C=1.4gL^{-1}**	**C=2.0gL^{-1}**	**C=5.0gL^{-1}**
$n_1 (n = 1)$	1	1	1	1	1
$n_2 (n = 2)$	2	2	2	2	2
$n_{optimal}$	1,1450	1,5715	1,1150	1,9561	2,0834
R_1^2	0,313	0,540	0,255	0,289	0,413
R_2^2	0,978	0,975	0,972	0,989	0,952
$R_{optimal}^2$	0,997	0,983	0,993	0,989	0,953
$RMSE_1$	0,285	0,191	0,151	0,127	0,074
$RMSE_2$	0,0494	0,0413	0,0290	0,0171	0,0225
$RMSE_{optimal}$	0,0208	0.0364	0,0171	0,0171	0,0215
MAE_1	0,501	0,298	0.364	0.378	0.446
MAE_2	0,421	0,257	0.419	0.409	0.445
$MAE_{optimal}$	0,3870	0,2690	0.3930	0.3185	0.2141
$k_1 (min^{-1})$	5,359	8,422	5,380	3,792	3,374
$k_2 (mg(gmin^{-1}))$	$8{,}9110^{-4}$	$1{,}60\ 10^{-3}$	$2{,}60\ 10^{-3}$	$3{,}10\ 10^{-3}$	$4{,}40\ 10^{-3}$
$k_{optimal} (mgg^{-(1-n)}s^{-1})$	$6{,}69\ 10^{-4}$	$1{,}10\ 10^{-3}$	$1{,}10\ 10^{-3}$	$2{,}90\ 10^{-3}$	$5{,}00\ 10^{-3}$

Le nouveau modèle a une très bonne corrélation avec les données expérimentales. En plus, le coefficient de corrélation $R^2 = 0{,}993$ est obtenu pour la concentration $C = 1{,}4\ gL^{-1}$, un optimal pseudo ordre de l'équation $n = 1{,}115$ et constant de réaction $K_n = 1{,}11 \times 10^{-3} mgg^{-(1-n)}s^{-1}$.

Ainsi que, une faible valeur raisonnable de $RMSE$ et MAE permettre également d'avoir une bonne corrélation entre les valeurs de volume filtrat prédit et les valeurs expérimentales. Ces résultats confirment la performance et la précision du nouveau modèle proposé (PNO), il est capable de décrire la performance de la membrane polycarbonate track-etched (PCTE) de l'adsorption de (ASB).

Figure IV.1 présente la régression non linéaire du volume calculé par rapport au volume expérimental. Globalement, les valeurs de R^2 de l'équation PSO sont supérieures à celles de l'équation PPO, mais il s'agit du meilleur résultat du nouveau modèle (PNO) pour toutes les concentrations.



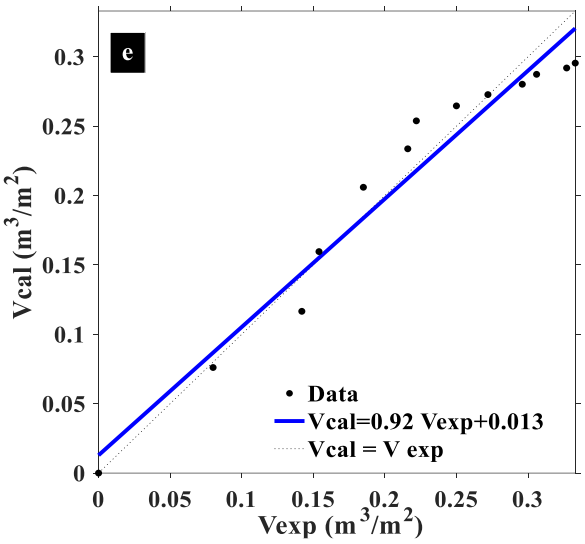
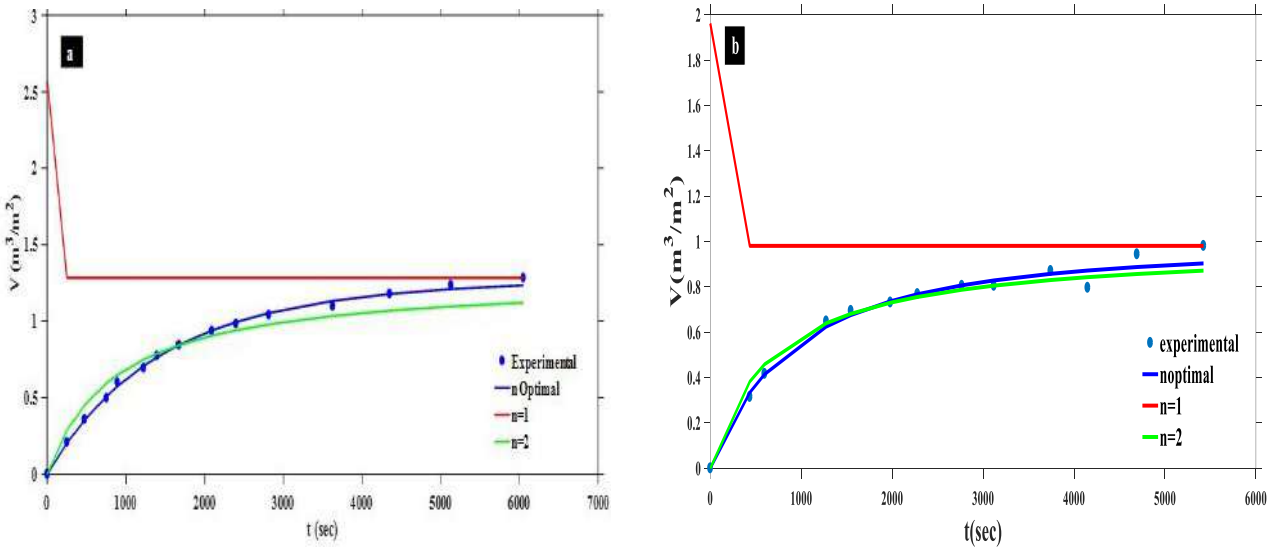


Figure. IV.1. Régression non linéaire entre les valeurs expérimentale et calculée pour différentes concentration.

$(a)\ c = 0{,}5 g/L, (b)\ c = 1{,}0 g/L, (c)\ c = 1{,}4 g/L, (d)\ c = 2{,}0 g/L\ et\ (e)\ c =\ 5{,}0\ g/L$

IV. 2.1. Comparaison des modèles

Plus de précision, une étude comparative a été menée entre le nouveau modèle PNO le pseudo-premier ordre PPO et le pseudo-second-ordre PSO. Cependant, sur logiciel MATLAB, les courbes de régression non linéaire du modèle et les équations PPO et PSO sont illustrées sur la figure IV.2.



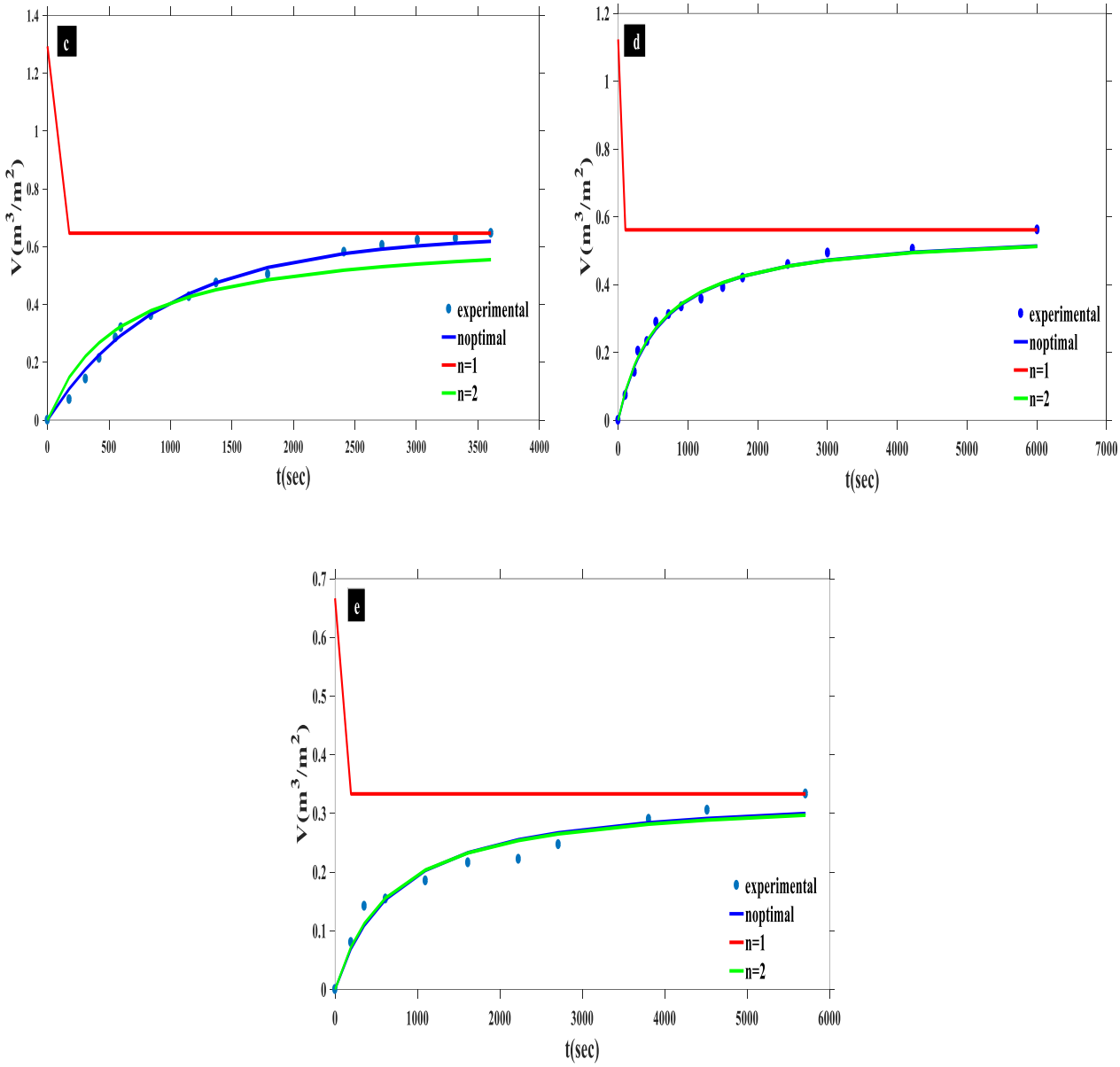


Figure IV.2. Profil d'adsorption de la BAS sur une membrane en polycarbonate track-etched (PCTE) tracée pour les modèles PFO et PSO pour différentes concentration.

$(a)\ c = 0{,}5 g/L, (b)\ \ c = \ 1{,}0 g/L, (c)\ c = 1{,}4\ g/L, (d)\ c = \ 2{,}0 g/L, (e)\ c = 5{,}0 g/L.$

Les résultats de régression entre les valeurs calculées et expérimentales du volume filtrat obtenues à partir du PPO ont donné de coefficient de corrélation non raisonnable tel que R^2 est varié de 0,255 à 0,54 pour différentes valeurs de concentration de BSA, les valeurs de $RMSE$ variant de 0,074–0,28 montrant relativement grande. Par conséquent, les résultats expérimentaux ne suivaient pas le modèle cinétique du premier ordre.

En outre, les valeurs de $V_{i,cal}$ calculées à partir du PSO et les valeurs expérimentales $V_{i,exp}$ sont pas en bon accord, ce qui donne également un écart relativement important de $RMSE$ (0,0494-0,0171).

Cependant, pour le modèle PNO, les valeurs calculées $V_{i,cal}$ étaient compatibles avec les valeurs expérimentales $V_{i,exp}$, résultant en un écart relativement faible de $RMSE$ (0,0171–0,0364), en plus un coefficient de régression linéaire de l'ordre de 0,997.

De plus, les valeurs n au plus grand R^2 et moins petit de RMSE sont presque identiques. Les valeurs de R^2 obtenus à partir de la régression non linéaire peut donc être utilisés pour juger parfaitement le meilleur ordre.

On conclut que la cinétique d'adsorption de la BSA sur la membrane en polycarbonate track-etched (PCTE) a suivi le modèle PNO et que pseudo-ordre optimale de l'équation en confinée entre 1 et 2.

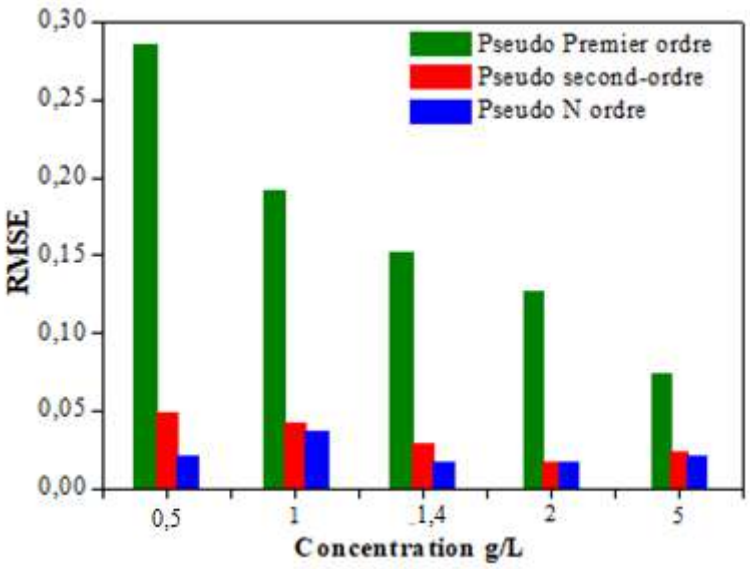


Figure IV.3. Comparaison d'équation pseudo 1er ordre, second ordre et le nouveau modèle pour différentes concentrations.

IV. 2.1. Validation du modèle

Afin de tester l'applicabilité et la validité du modèle proposé, il devrait être possible d'étudier les paramètres du modèle pour d'autres expériences d'adsorption, afin d'estimer les coefficients de corrélations. À cet effet, il conviendrait de collecter les données possibles pour mieux indiquer la capacité du modèle proposé et de caractériser le profil du procédé d'adsorption. À la fin, nous recueillons des données expérimentales différentes, sous différentes conditions opérationnelles, nature du mode de filtration et la substance adsorbée différents. Le tableau IV.2 résume les paramètres cinétiques du processus d'adsorption pour différents cas étudié.

Tableau IV.2. Paramètres cinétiques résultants du programme MATLAB et les coefficients de corrélation de la régression non linéaire obtenus par modèles PNO, PPO et PSO

Reference	Nature de filtrat	Mode de filtration	Condition Opératoire	Analyse statistique						
				Modèle			1er Pseudo-order (n=1)		Second Pseudo-order (n=2)	
				n optimal	R^2	RMSE	R^2	RMSE	R^2	RMSE
Kong et al.2010	ADN solution	membrane : PVDF et PES	$A_{filtration}$: 0.28cm^2 $P_{operatoire}$:30.50 or 65 kPa T: -20C^0 C: 30±1µg/ml	0,90	0,995	4,59	0,329	196	0,954	60,4
Fouladitajaret al. 2013	Matière organique dans l'Eau	PVDF membrane	TMP : 0.5 to 2 bar C:5000 ppm µ= 0.2 m/s.	0,39	0,998	$1,410^{-3}$	$3,610^{-2}$	0,16	0,995	$2,310^{-3}$
Iritani et al. 2015	PSL	PCTE membrane.	$D_{particule}$: 0.522 µm d : 1.05g/cm^3 $P_{filtration}$: 98- 294 kPa.	0,8	0,994	36,9	0,114	$3,1410^{-4}$	0,96	74,6
Winans et al. 2016	IgGet NPs	NPN membrane	C_{IgG} : 0.5–5 mg/mL Concentrations of 100nm NPs: 10^9 up to 10^{13} parts/mL. 20nm NPs: $10^{11}$to 10^{15}parts/mL	1,68	0,992	810^{-3}	0,572	0,065	0,990	0,009
Huo et al. 2018	AMPS, AM et SSS	d'eau de forage	T : 160 C^0 P : 0.69 MPa	0,86	0,996	0,389	4,44 10^{-16}	6,27 10^{-7}	0,981	0,0046

Le tableau IV.2 montre que le meilleure pseudo ordre pour l'adsorption de la solution d'ADN, la matière organique dans l'eau, le 2-acrylamido-2-méthyl, l'acide propane sulfonique, l'acrylamide, le p-styrènesulfonate de sodium étaient respectivement de 0,9 ; 0,39 ; 0,8 et 0 ,865 ne dépasse pas l'unité 1. En outre, pour le sérum humain et le polystyrène, le résultat était de l'ordre de 1,68 entre 1 et 2. De plus, les valeurs de R^2 pour le modèle PNO sont meilleures que pour le PPO et le PSO.

Les résultats de test montrent la capacité du modèle, il est conclu que le nouveau modèle proposé PNO peut être étendu pour d'autre application pratique.

IV.3. Résultats de la simulation de deuxième modèle

La deuxième simulation consiste à étudier les performances d'unité de dessalement d'eau de mer par procédé hybride NF/OI avec la prise en considération des données expérimentales proposées de la littérature. Suivant l'algorithme d'apprentissage de RNA trois modèles ont été créés pour permettre de prédire le débit de perméat, le taux de conversion global et la conductivité du perméat.

IV.3.1. Etude des performances du modèle RNA

Un programme est élaboré pour la conception et l'apprentissage du modèle neuronal .Le type de réseau neuronal utilisé est le Perceptron Multicouche MLP avec l'algorithme de rétro-propagation Levenberg-Marquardt (*Trainlm*) (Yu et Willamoski 2011). Le meilleur RNA trouvé à trois (3) couches d'entrée et à huit (08) couches caché et un minimum de MSE (mean squart error) est de l'ordre de 0,012956 à nombre d'itérations adéquat à notre Réseau est 1000. La figure IV.4 montre les performances du modèle RNA formé, où il est observé une diminution de l'erreur en quelques itérations (formation rapide), après une stabilité jusqu'à la convergence vers le nombre maximal d'itération. La variation de MSE en fonction du nombre d'itération indique que l'erreur lors de l'apprentissage est très petite.

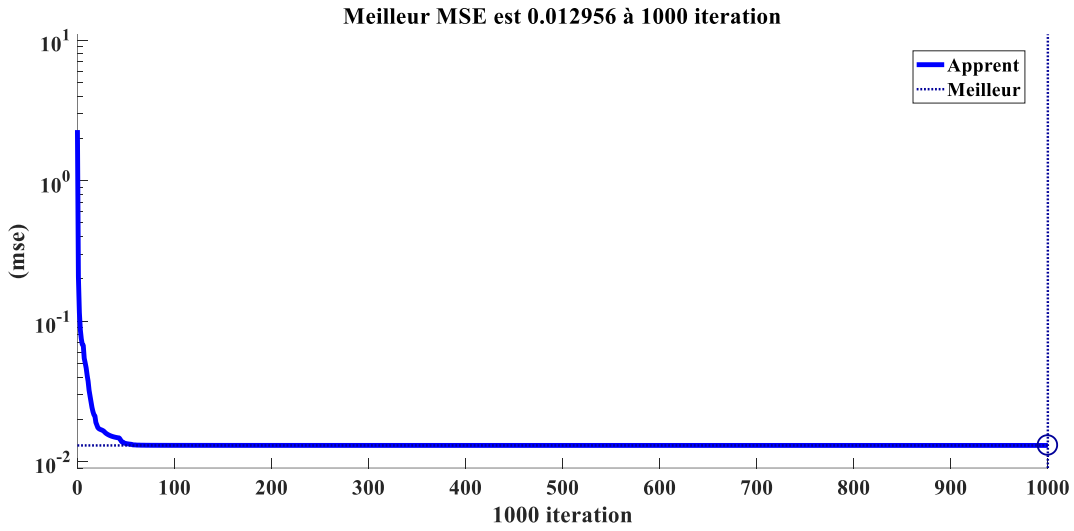
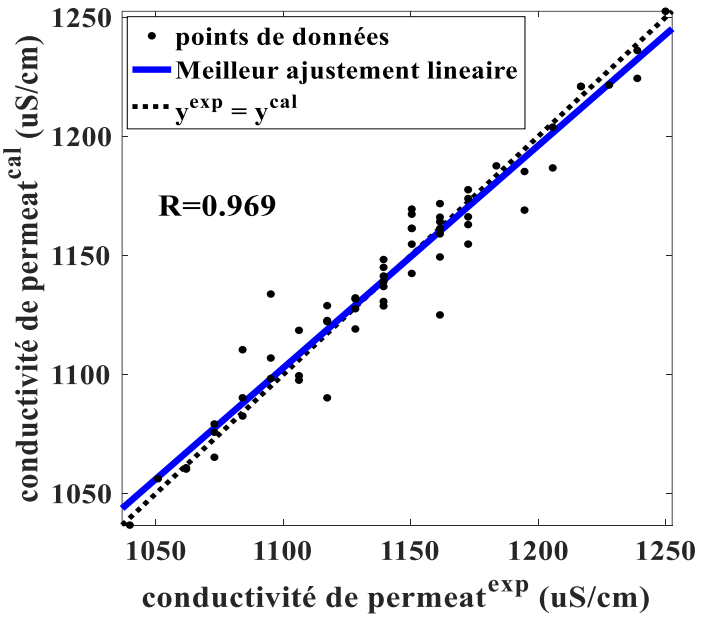
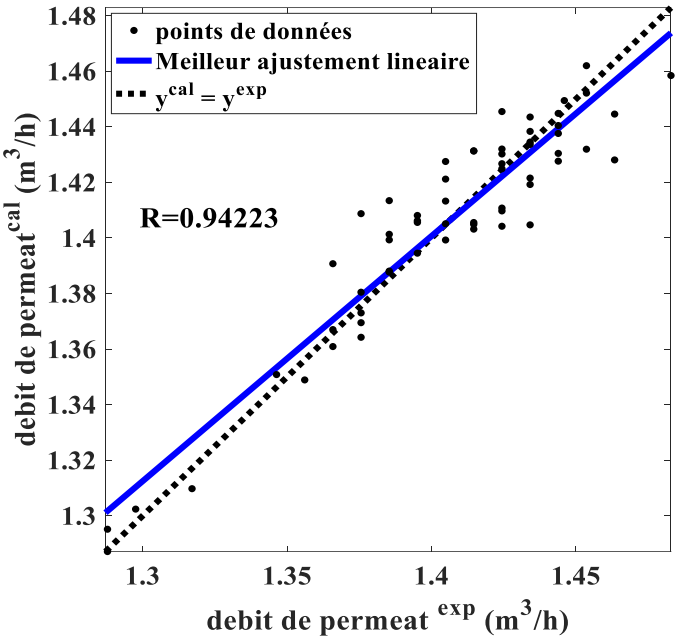


Figure IV.4. Diagramme de MSE en fonction de nombre d'itération (epochs)

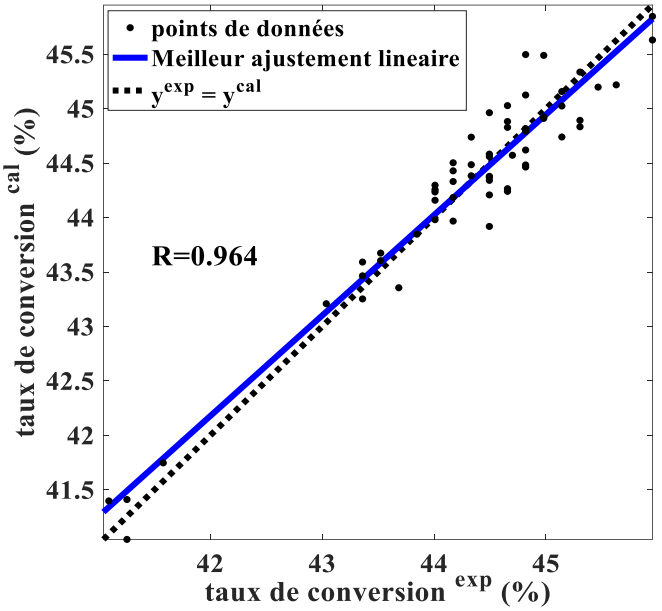
Le modèle a une très bonne performance en apprentissage. En plus, le coefficient de corrélation est supérieur à 94%, ce que montre un excellent accord entre les valeurs expérimentales et calculées pour la conductivité de perméat le débit de perméat et le taux de conversion global (Figure. IV.5). Le $RMSE$ et le MAE étaient également moins. Toutefois, l'écart relatif absolu maximal est égal à 0,4571, 0,4583 et 0,2977, respectivement (Tableau.IV.3).



(a)



(b)

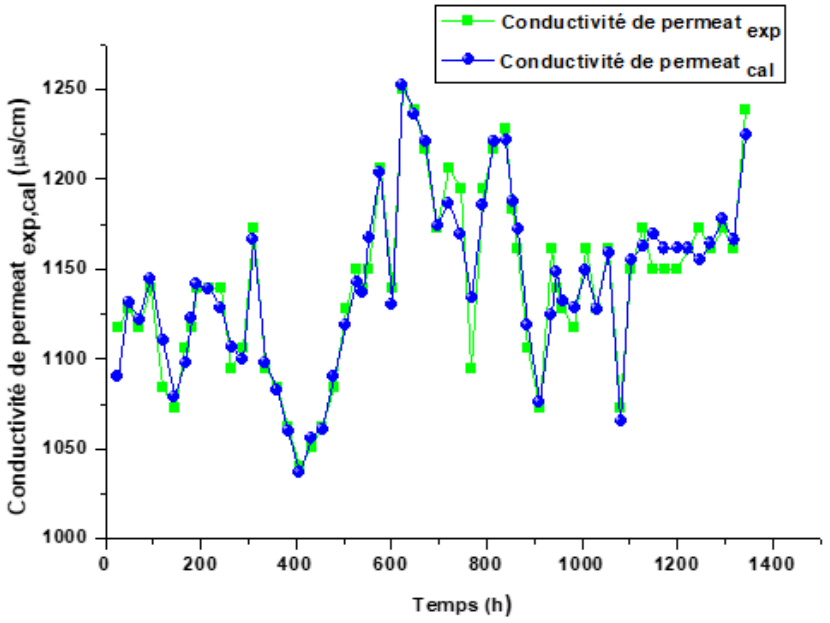


(c)

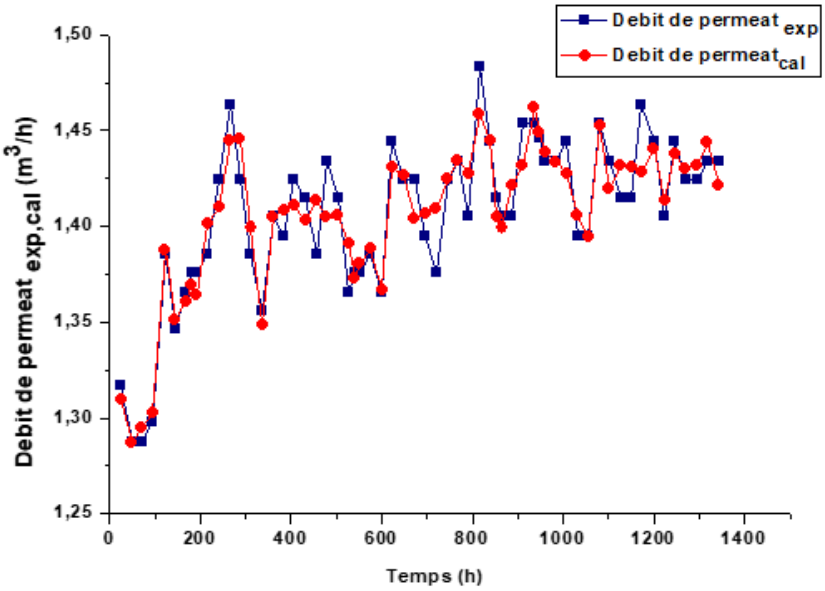
Figure IV.5. Valeurs expérimentales et prédites : (a) conductivité de permeat ; (b) débit de permeat ; (c) taux de conversion.

IV.3.2. Comparaison entre les valeurs expérimentale et calculée par le RNA

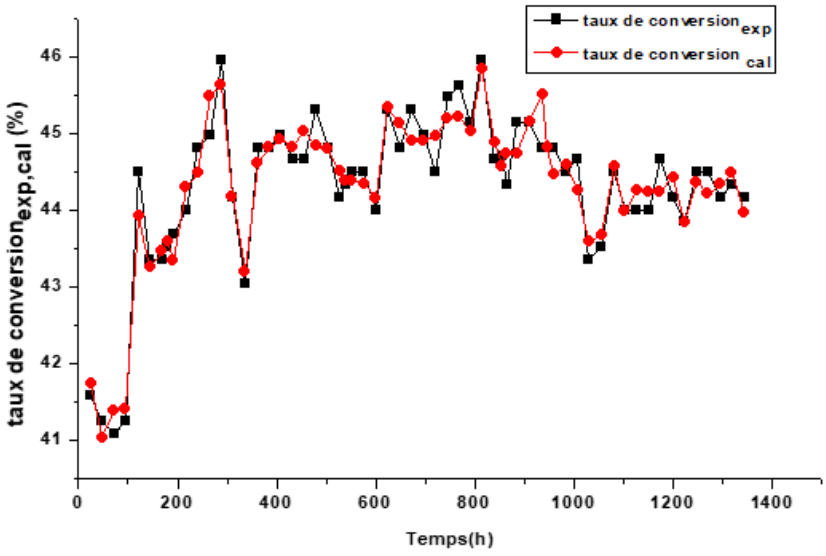
La figure IV.6 présente une comparaison entre les données expérimentales et les résultats de prédictions du modèle neuronal en fonction de temps. Elle montre une concordance acceptable entre les données expérimentales de la littérature de taux de conversion, le débit de permeat et la conductivité de permeat et les résultats de prédictions du modèle neuronal, ce qui suggère de bonnes capacités prédictives du modèle neuronal.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.6. Comparaison entre les données expérimentales et calculées par RNA : (a) conductivité de permeat ; (b) débit de permeat ; (c) taux de conversion.

A travers l'analyse, le tableau IV.3 récapitule les paramètres statistiques du modèle pour les ensembles de données, obtenus à l'aide de la fonction du MATLAB "*postreg*",

[α, β, R] = [1,0062, -0,2750, 0,9636] pour la conversion globale ;

[α, β, R] = [1,0065, -0,0092, 0,9422] pour le débit de perméat ;

[α, β, R] = [1,0061, -6,9152, 0,9691] pour la conductivité du perméat ;

Tableau.IV.3. Vecteur linéaire d'équation [équation linéaire: $y^{predict} = \alpha\, y^{exp} + \beta$, avec α=pente, β =ordonnée à l'origine.

	$\boldsymbol{\alpha}$	$\boldsymbol{\beta}$	$\boldsymbol{R}$	$\boldsymbol{RMSE}$	$\boldsymbol{MAE}$	$\boldsymbol{AARD\%}$
Conductivité du permeat ($\mu S/cm$)	1,0061	-6,9152	0,9691	11,7	0,6934	0,4571
Débit de permeat (m^3/h)	1,0065	-0,0092	0,9422	0,0132	0,0108	0,4583
Taux de conversion (%)	1,0062	-0,2750	0,9636	0,2630	0,2202	0,2977

Tableau. IV.4. Poids et bias de RNA optimal

Entrée -Connexions de couche cachée						Sortie - Connexions de couche cachée			
poids					bias	poids			bias
W_{j1}^{I}	W_{j2}^{I}	W_{j3}^{I}	W_{j4}^{I}	W_{j5}^{I}	b_1^b	W_{1j}^{I}	W_{2j}^{I}	W_{3j}^{I}	b_3^o
-4,82605	-0,25507	-2,85325	1,43171	-1,67677	1,19124	-0,01199	0,64772	2,24750	-0,30785
-0,00135	-4,58701	3,27240	1,22137	-0,38686	2,56561	-2,54455	1,90600	2,23285	0,15820
2,00028	3,03780	1,03996	0,36749	0,12895	-3,79743	0,78838	0,98013	0,05348	0,14987
-1,67935	0,84503	-0,73630	-1,53158	-3,19026	-1,68610	0,66939	2,41899	-2,23768	
3,42010	2,37130	-1,36953	0,18108	0,40273	-0,21443	2,09570	2,45821	0,87381	
-0,02039	0,63697	-0,85039	-1,49253	-2,56292	-0,46078	0,81114	-1,31449	0,29439	
0,43953	0,38663	0,93687	-7,36005	-1,72499	6,75685	3,77833	0,44694	1,20351	
1,08443	-6,10392	0,03176	-2,63421	0,42222	3,73305	-1,03603	1,71938	2,30820	

IV.3.3. Etude de sensibilité

Une analyse de sensibilité est réalisée afin d'identifier l'importance des variables d'entrée. Ceci indique quelles variables sont considérées comme les plus utiles pour être retenu par le modèle RNA**.** Nous allons analyser l'influence de différents paramètres qui entrent en jeu lors de l'élaboration du réseau de neurones par la méthode du " poids " (voir chapitre III pour plus de détail). La Figure IV.7. Présentation des % de l'importance relative (IR) (obtenus par la méthode de "poids") de chaque variable d'entrée du RNA sur le taux de conversion, débit de permeat et conductivité de permeat .d'après cette contribution on constate que :

- La pression a une importance remarquable sur le débit de permeat, plus elle est élevée plus le flux de perméat est important. Ainsi le taux de conversion sera important et la conductivité, suivie par le débit d'alimentation ;
- La température et la conductivité d'entrée sont moyennement faibles par rapport aux autres.

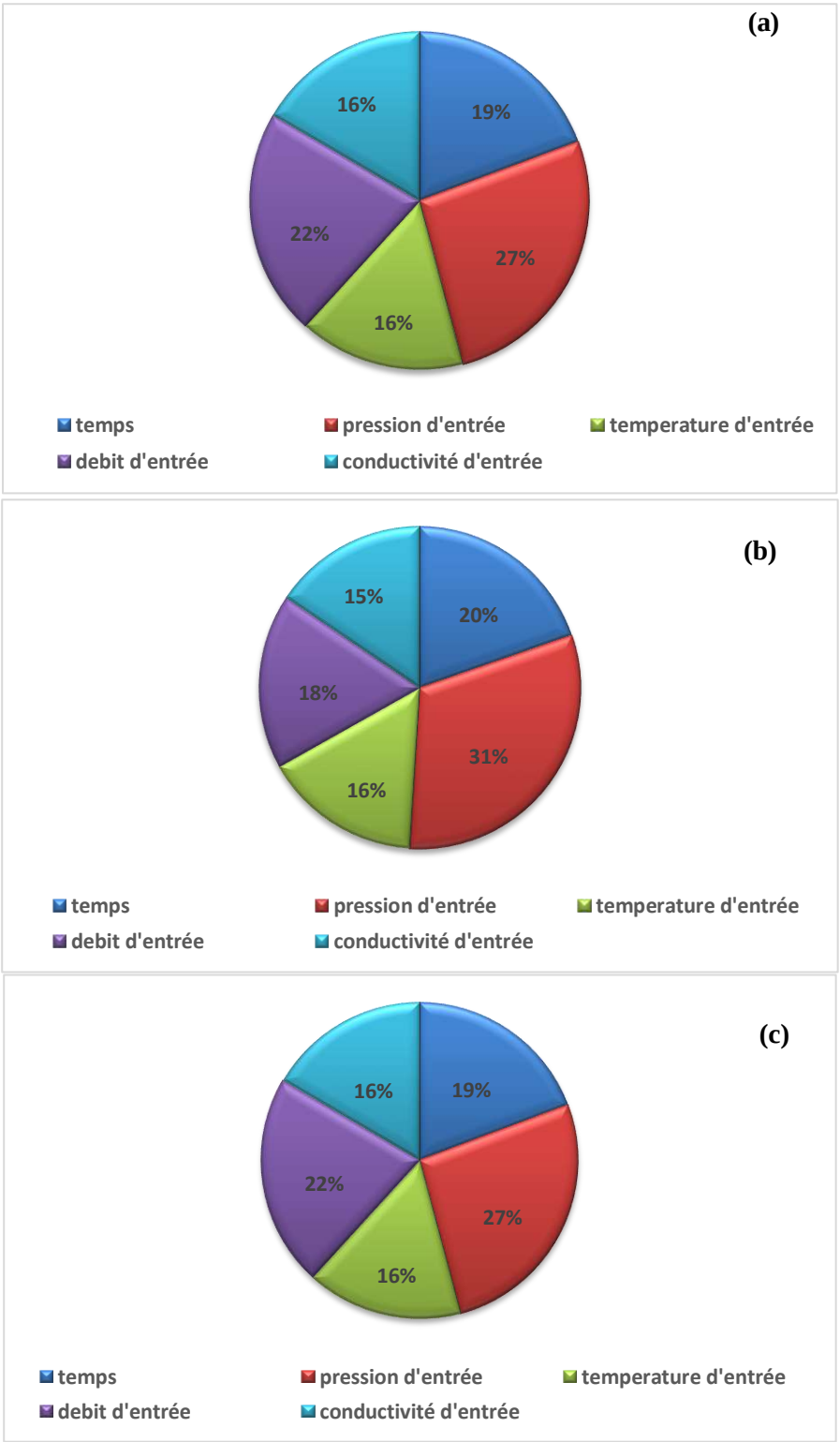


Figure .IV.7. Pourcentages d'importance des paramètres d'entrées sur :
(a) taux de conversion global ; (b) débit de permeat ; (c) conductivité de permeat

IV.3.4. Expressions mathématique du modèle neuronal optimisé

Selon l'RNA optimisé, nous pouvons exprimer le modèle en intégrant toutes les entrées $x_i$par la formule mathématique suivante

Sachant que f_h est la fonction de transfert sigmoïde Tangent utilisée dans la couche cachée :

$$Z_j = f_h\left[\sum_{i=1}^{5} w_{ji}x_i + b_j^h\right] = \frac{\exp(\sum_{i=1}^{5} w_{ji}x_i+b_j^h)-\exp(-\sum_{i=1}^{5} w_{ji}x_i+b_j^h)}{\exp(\sum_{i=1}^{5} w_{ji}x_i+b_j^h)+\exp(-\sum_{i=1}^{5} w_{ji}x_i+b_j^h)} \quad \text{(IV.1)}$$

$j = 1,2,\ldots\ldots 8$

La sortie H, avec$f_0$est la fonction de transfert linéaire simple utilisée dans la couche de sortie présentée comme suit Eq. (VI.2) :

$$H=f_0\left[\sum_{i=1}^{8} w_{ji}^H Z_i + b_3^0\right] \quad \text{(VI.2)}$$

La combinaison Eqs. (1) et (2) pour obtenir la relation des paramètres de sortie du modèle RNN est présenté comme suit :

$$\delta_p, Q_p, y = \sum_{i=1}^{8} w_{ji}^H \left(\frac{\exp(\sum_{i=1}^{5} w_{ji}x_i+b_j^h)-\exp(-\sum_{i=1}^{5} w_{ji}x_i+b_j^h)}{\exp(\sum_{i=1}^{5} w_{ji}x_i+b_j^h)+\exp(-\sum_{i=1}^{5} w_{ji}x_i+b_j^h)}\right) + b_3^0 \quad \text{(VI.3)}$$

L'équation mathématique de la conductivité du permeat (δ_p), débit de permeat (Q_p) et la conversion de permeat (y) est donné par l'Eq. (VI.3).

j est le nombre de neurones dans la couche cachée ($j = 8$), i est le nombre de neurones dans la couche d'entrée (i= 5), w^I ($w_{(j,i)}^H$) etb_1^Hsont les poids et les biais entre l'entrée et la couche cachée,w^H ($w_{(l,j)}^0$) et b_3^0 sont les poids et les biais entre la couche cachée et la couche de sortie, lest le nombre de neurones dans la couche de sortie ($l = 3$).

Le modèle établi à partir de RNA permet de prédire les performances d'unité de dessalement par procédé hybride NF /OI, y compris d'importantes caractéristiques pertinentes pouvant être facilement appliquées dans l'optimisation des systèmes de dessalement.

IV.3.5. Modèles du RLM

Les modèles obtenus pour la prédiction de la conversion global du système de dessalement, le débit de permeat la conductivité du permeat pour les membranes d'NF/OI sont des modèles linéaires (équations IV.4, IV.5 et IV.6) :

$$\boldsymbol{\delta_p} = -301.039 - 0.53t + 0.635P + 0.536T + 0.122Q_A + 0.070\delta_A \quad \text{(IV.4)}$$

$$\boldsymbol{Q_p} = 2.68 + 0.400t - 0.0666P + 0.1792T + 0.205Q_A + 0.129\delta_A \quad \text{(IV.5)}$$

$$\boldsymbol{y} = 111.49 + 0.177t + 0.195P - 0.28T - 0.36Q_A - 0.30\delta_A \quad \text{(IV.6)}$$

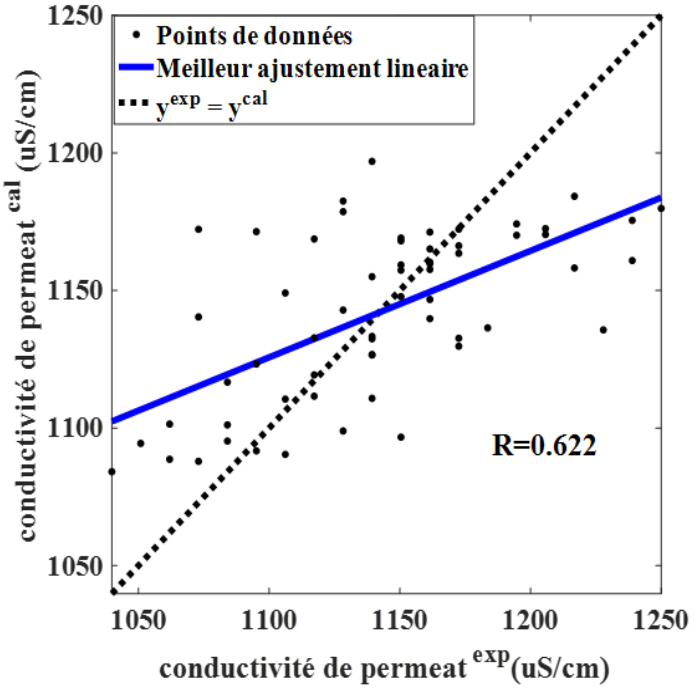
La figure IV.8 représente la comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées par le modèle RLM. Elle montre les courbes de régression linéaire de modèle RLM.

Le tableau IV.3 récapitule les paramètres statistiques du modèle pour les ensembles de données, obtenus à l'aide de la fonction du MATLAB "*postreg*", Les vecteurs de régression linéaire, ([α, β, R] = [1.000, 0.0021, 0.622] "Conductivité de Permeat" ; [α, β, R] = [1.000, 2.334, 0.679] "Débit de Permeat " et [α, β, R] = [1.000, -7.56 10^{-5}, 0.572] "Taux de Conversion", indiquent une capacité prédictive modérée de modèle RLM. Les coefficients des corrélations sont généralement considérés comme satisfaisants ($0.50 \leq R < 0.90$). Ce qui implique une robustesse acceptable de modèle RLM établi et la possibilité de la prédiction des différents paramètres qui caractérisent les performances du système membranaire hybride NF/OI.

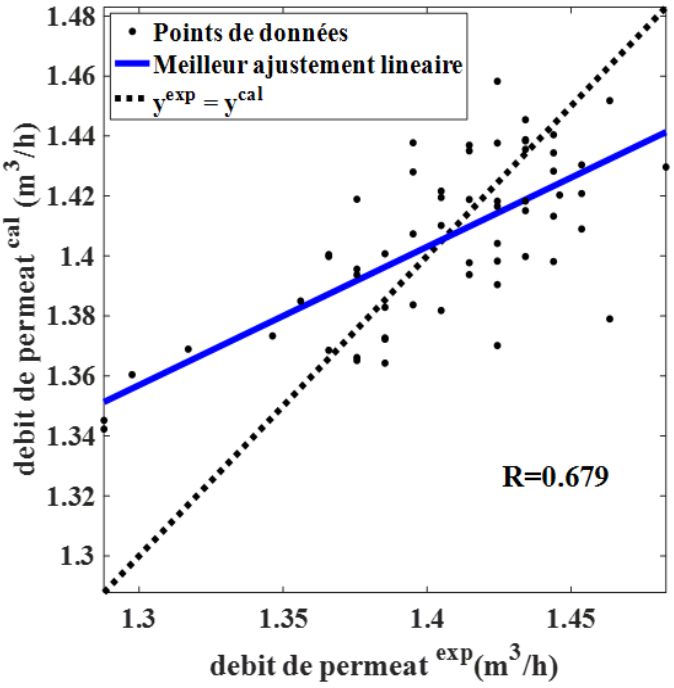
Tableau IV.5. Vecteurs de régression linéaire (RLM) issue de l'équation linéaire :

Equation linéaire : $y^{cal} = \alpha y^{exp} + \beta$

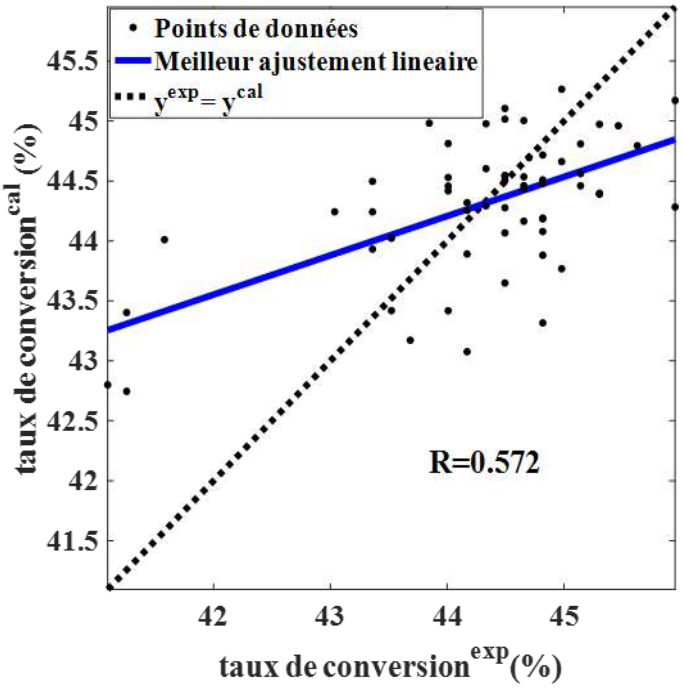
	$\boldsymbol{\alpha}$	$\boldsymbol{\beta}$	$\boldsymbol{R}$	$\boldsymbol{RMSE}$	$\boldsymbol{MAE}$	$\boldsymbol{AARD\%}$
Conductivité du permeat ($\mu S/cm$)	1,000	0,002	0,622	24,100	29,171	1,531
Débit de permeat (m^3/h)	1,000	2,33.10^{-6}	0,679	0,021	0,0246	1,0585
Taux de conversion (%)	1,000	-7,560.10^{-5}	0,572	0,316	0,646	0,8842


Points de données
Meilleur ajustement lineaire
$y^{exp} = y^{cal}$
R=0.622
conductivité de permeat ^{cal} (uS/cm)
conductivité de permeat ^{exp}(uS/cm)
1250
1200
1150
1100
1050
1050
1100
1150
1200
1250

(a)


Points de données
Meilleur ajustement lineaire
$y^{exp} = y^{cal}$
R=0.679
debit de permeat ^{cal} (m^3/h)
debit de permeat ^{exp}(m^3/h)
1.48
1.46
1.44
1.42
1.4
1.38
1.36
1.34
1.32
1.3
1.3
1.35
1.4
1.45

(b)



(c)

Figure IV.8. Valeurs expérimentales et calculées d'après la méthode de RLM pour les sorties : (a) Conductivité de Permeat ; (b) Débit de Permeat ; (c) Taux de Conversion.

L'estimation des divers paramètres inconnus des modèles (Tableau IV.6) révèle que seuls trois coefficients des modèles polynomiaux sont jugés significatifs (P-value < 0.05)

L'analyse de la régression peut être utilisée comme une technique d'analyse de sensibilité. Les techniques de régression permettent d'évaluer la sensibilité des entrées de modèles, en tenant compte de l'impact simultané des autres paramètres du modèle sur le résultat (Weisberg, S. 1985). L'importance des entrées a été indiquée par les erreurs standards dans les modèles de régressions linéaires multiples. L'importance (Std. Err) de chaque d'entrées sur la conductivité de permeat, débit de permeat et le taux de conversion en respectivement pour les trois modèles est montrée dans le tableau IV.6 ci-dessous.

Tableau IV.6. Coefficients des modèles (conductivité de permeat, débit de permeat et taux de conversion) estimés par analyse de régression linéaire multiple RLM.

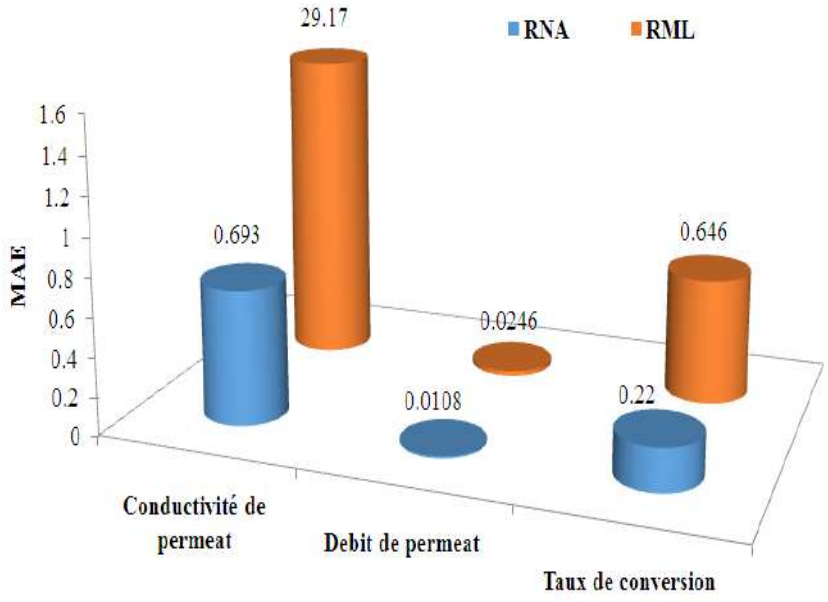
	(a) Conductivité de permeat		
	Coeff ai	**Std. Err**	**P-value**
Constante/Intercepté	-301,040	972,534	0,758
Temps	-0,537	0,0378	0,078
Pression	0,635	3,369	0,002
Température	0,536	5,122	0,0666
Débit d'alimentation	0,122	62,426	0,286
Conductivité d'alimentation	0,0704	0,013	0,621

	(b) Débit de permeat		
	Coeff. a_i	**Std. Err**	**P-value**
Constante/Intercepté	2,680	0,775	0,0011
Temps	0,401	0,000030	0,157
Pression	-0,066	0,0027	0,721
Température	0,179	0,004	0,507
Débit d'alimentation	-0,205	0,0497	0,058
Conductivité d'alimentation	-0,129	0,000010	0,333

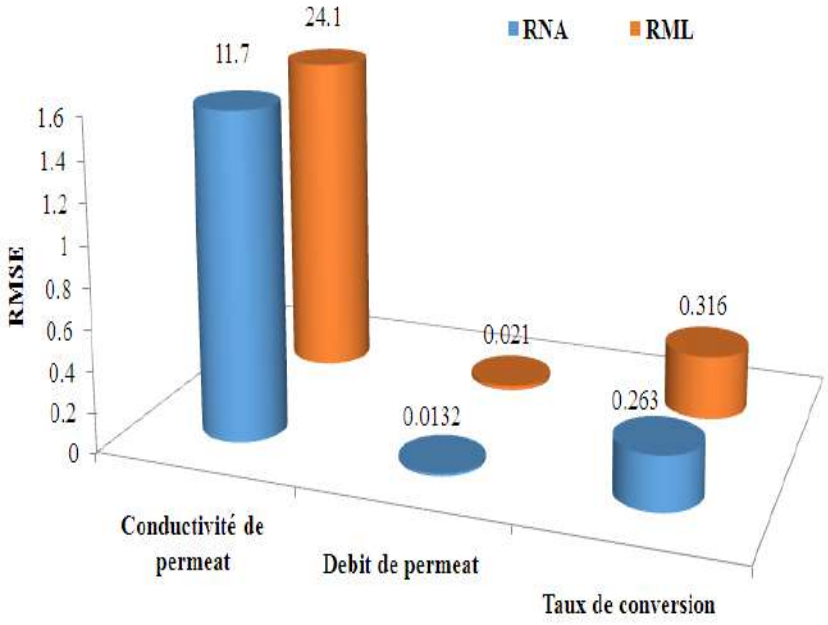
	(c) Taux de conversion		
	Coeff. a_i	**Std. Err**	**P-value**
Constante/Intercepté	111,4918	21,15245	0,000002
Temps	0,176681	0,00082	0,573324
Pression	0,195155	0,07329	0,350126
Température	-0,283619	0,11141	0,348894
Débit d'alimentation	-0,358571	1,35776	0,003807
Conductivité d'alimentation	-0,299892	0,00028	0,048181

IV.3.6. Comparaison entre les modèles RNA et RLM

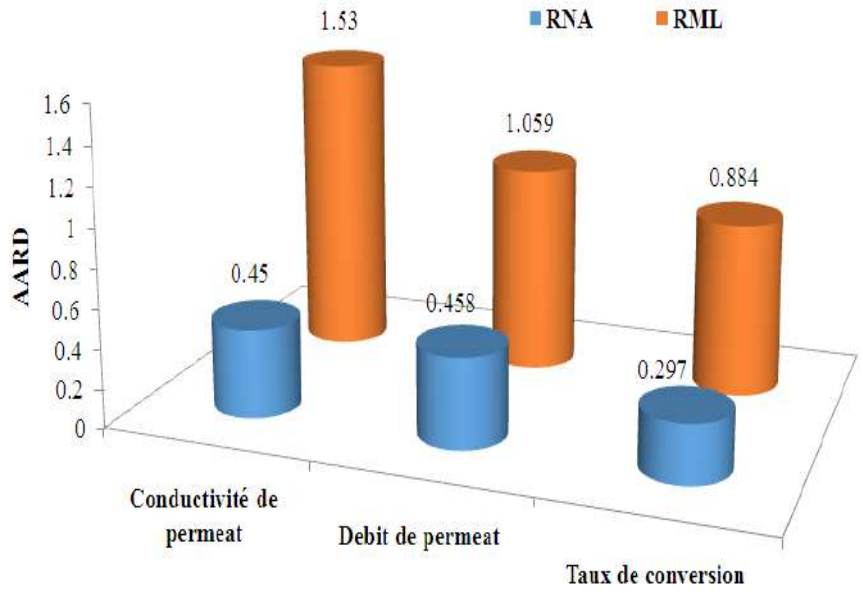
La figure IV.9 montre une comparaison entre les modèles de RNA et RLM en termes de l'erreur absolue moyenne *(MAE*), la racine de l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) et l'erreur de standard de prédiction (*AARD*), pour la totalité de l'ensemble de données. La comparaison des résultats entre les modèles a montré la supériorité des modèles de Réseau de Neurone Artificielle.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.9. Comparaison des résultats de la base totale entre les modèles RNA et les modèles RLM : (a) MAE, (b) RMSE, (c) AARD

IV.4. Dimensionnement du système de dessalement NF/SWRO/PV

Le dimensionnement d'un tel système est organisé de la façon suivante :

- Estimation de besoin énergétique de la station de dessalement ;
- Définition des conditions du site ;
- Dimensionnement du système photovoltaïque.

IV.4.1. Estimation de besoin énergétique de la station de dessalement

Avec le débit et la pression d'alimentation donnée par la station, la consommation d'énergie de l'unité de dessalement est déterminée. Ces besoins énergétiques sont utilisés pour modéliser la principale source d'énergie renouvelable (PV photovoltaïque) dans cette configuration, le système PV est connecté à une unité de batterie pour piloter l'unité de dessalement OI.

Les paramètres opérationnels du système NF/SWRO sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.7. Paramètres opérationnelles de la station

Paramètre	**NF/SWRO**
Taux de conversion	45%
Pression d'alimentation (bar)	58 ,89
Débit d'alimentation (m^3/h)	8,014
Débit de permeat (m^3/h)	1,406

L'énergie requise par le dessalement exprimé par kwh/j est donnée par l'équation (III.31) et le rendement de la pompe à haute pression est égal à 0,85.

SEC_{DES}=SEC_{NF} + SEC_{SWRO}=2,191+ 4,206= 6,397 kwh/m^3

La consommation électrique journalière du système de dessalement en (kWh/j) est donnée par le produit de la consommation énergétique spécifique, le débit de permeat et le nombre d'heure d'utilisation ou de pompage journalière (5h/jour).

P_{DES} =44,97 kwh/j

IV.4.2. Présentation du site

La variation des radiations solaire est donnée par les valeurs mensuelles moyennes de l'irradiation solaire présentent dans la figure IV.10. Le rayonnement le plus élevé de 6,902 $KWh\ /\ m^2\ /\ jour$ est obtenu en juin et un minimum de 3,463 $KWh\ /\ m^2\ /\ jour$ en décembre.

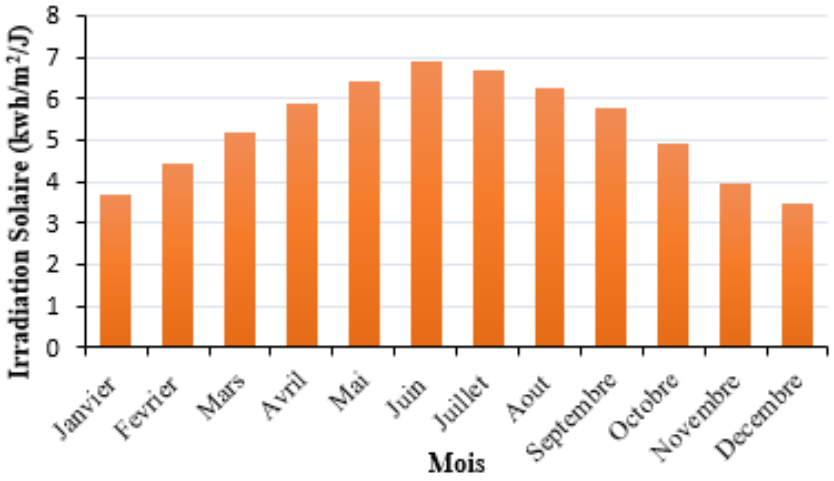


Figure IV.10. Moyen mensuel de l'irradiation solaire Horizontal en Arabie saoudite (Rehman et al.2017)

IV.4.3. Dimensionnement du système photovoltaïque

La production d'énergie requise par le système photovoltaïque P_{PV} $(kWh\ /\ jour)$ est donné par l'équation (III.38) tel que :

L'efficacité de charge de la batterie, α_{BCH} =0,2

L'efficacité de décharge de la batterie. α_{BDCH}=0,8

$t_{\ h}$: 6.902 heure de moyen de la durée journalière d'éclairement

La consommation électrique journalière (ou besoin journalier en (kWh/j)) est donnée par le produit de la puissance nominale de la charge (W) et du nombre d'heure d'éclairement $(6{,}902\ h/j)$.

$P_{PV,tot}$=111,98 kwh/j

On a $Ppv_{,mod} = 0{,}001 \times P_{pv,tot} \times t_{hd}$ (IV.7)

$Ppv_{,mod} = 0{,}77\ kwh/j$

$N_{mod} = 144{,}8\ modules$

Le nombre des panneaux nécessaire pour alimenter la station NF-SWRO est 145 d'une capacité de 150W.

Tension de fonctionnement

La tension du système photovoltaïque dépend du type d'application, de la puissance photovoltaïque du système et de la disponibilité des matériels (modules et récepteurs). Le tableau suivant indique la tension adaptée au générateur PV.

Tableau IV.8. Tensions recommandées pour les systèmes photovoltaïques en fonction de leurs puissances.

Puissance du système Photovoltaïque	0-500Wc	500-2KWc	2-10KWc	>40KWc
Tension recommandée	12VDC	24VDC	24VDC	>48VDC

IV.4.4. Calcul la capacité de stockage de batterie

Les systèmes photovoltaïques exigent habituellement des batteries qui peuvent être chargées pendant le jour et déchargées durant la nuit.

Le dimensionnement des batteries requiert une attention particulière afin de diminuer le coût global du système. La capacité de stockage pour une autonomie de 5 jours requise se calcul suivant l'équation (III.41) :

$C_{batt} = 58{,}32\ kwh$

IV.5. Optimisation du système dessalement /photovoltaïque

On a développé un programme sur logiciel MATLAB afin d'optimiser la consommation énergétique de la station et le nombre des modules photovoltaïque nécessaire pour répondre au besoin énergétique de la station .A cet effet, on a d'adapter un algorithme du gradient projeté de façon à respecter, à chaque pas de l'itération, les contraintes.

IV.5.1. Principe de la méthode

La méthode du gradient projeté s'inspire des méthodes usuelles de gradient. Supposons, d'une façon générale, que l'on souhaite minimiser une fonction $:\rightarrow R$, Avec $f$un problème d'optimisation non linéaire de plusieurs variables sous contraintes (Ciarlet et Lions 1982).

- Supposons que l'on connaît une approximation $x_k \in$ R ;
- Comme dans un algorithme de descente classique, on choisit une direction de descente.

$$\begin{cases} x_0 \\ x^{(k+1)} = x^{(k)} - x_k \nabla f(x^{(k)}) \end{cases}$$

Un organigramme a été établié représente l'enchainement des étapes de la méthode du gradient projeté, effectuées par un programme sur MATLAB.

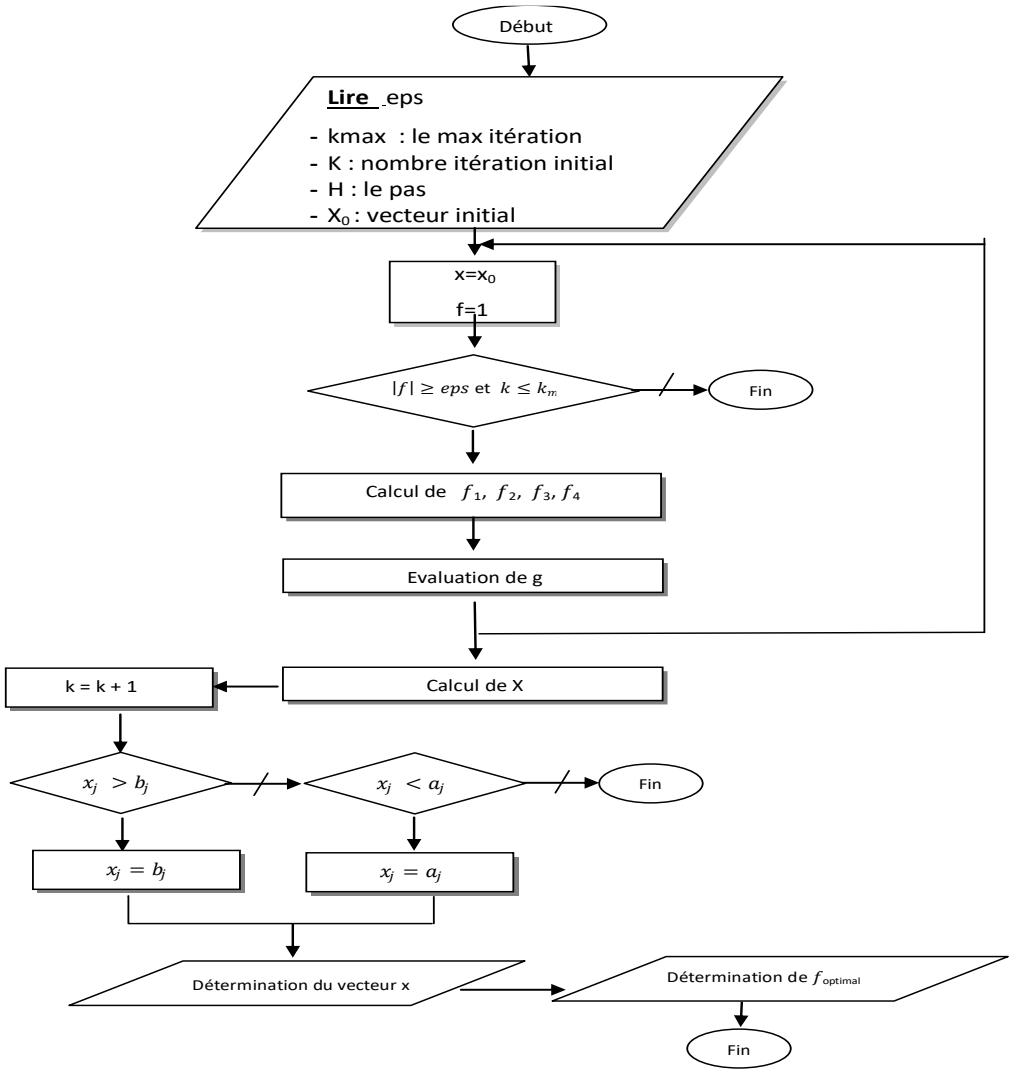


Figure IV.11. Organigramme de méthode Gradient projeté

Dans notre cas absence du système de récupération, la pompe à haute pression joue le rôle, les contraintes sont présentées comme suit :

$$\begin{cases} 60bar \leq P_A \leq 80bar \\ 0{,}45 \leq y \leq 0{,}47 \\ 0{,}6 \leq \eta_p \leq 0{,}85 \end{cases}$$

La puissance nécessaire, sans récupération d'énergie, pour la production de 1,406 m^3 /h est de $44{,}97KWh/j$,. Selon la littérature, l'énergie spécifique pour la production d'un mètre cube d'eau traitée sans récupération d'énergie est comprise entre 6 et 7,5 KWh/m^3 . Cette valeur dépend des caractéristiques physico-chimiques de l'eau de mer.

Le programme recalcule les valeurs et donne les valeurs optimums des paramètres opérationnelles. La valeur initial de la consommation d'énergie spécifique (CES) est de l'ordre 6,397 h/m^3 après l'exécution du programme la valeur optimal est 4,36 KWh/m^3 avec une erreur de 31,8 % (figure IV.10).

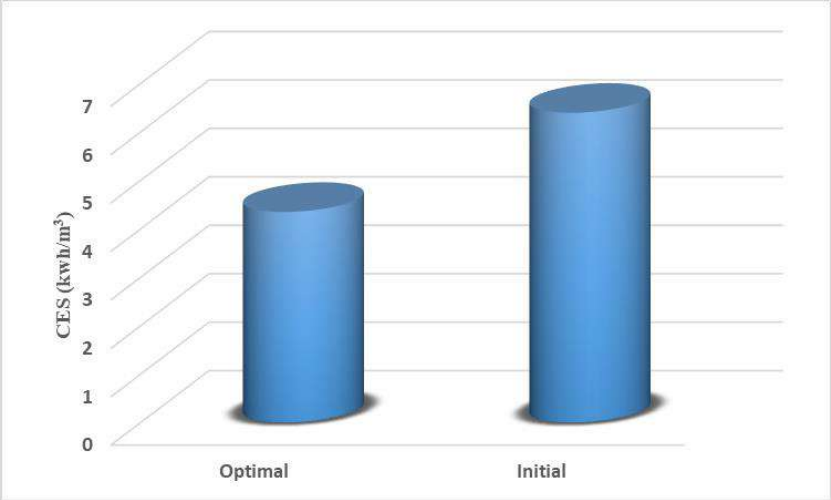


Figure IV.12. Résultats d'exécution du programme de la méthode gradient projeté

IV.6. Conclusion

La modélisation nous permettre de décrire les problèmes existent en réalité ainsi les outils informatiques aide de résoudre les problèmes complexes en temps réduit.

Dans ce chapitre deux modèles ont été développés, le premier un modèle non linéaire décrit la performance membranaire, à travers la modélisation de volume de filtrat au cours de l'adsorption des substances. La résolution du modèle complexe est réalisée par un programme sur logiciel MATLAB. Le modèle donne une bonne corrélation avec les données expérimentales comparant aux autres modèles existants dans la littérature (pseudo premier et seconde ordre de filtration). Un test de validation du modèle pour différentes substances est réalisé montre sa capacité.

Le deuxième modèle, un réseau de neurone artificiel (RNA), dont le but de modéliser les performances du procédé membranaire hybride de NF/OI dans l'unité de dessalement de l'eau de mer. Un réseau de trois couche d'entée, huit couches cachées prédit le taux de conversion, le débit

de permeat et la conductivité de permeat .L'apprentissage du modèle donne une bonne corrélation entre les valeurs expérimentales et valeurs calculées, un coefficient de corrélation dépasse 0.94.

L'analyse de sensibilité par la méthode de "poids" a rapporté que les variables les plus importantes qui influent sur la prédiction de taux de conversion, débit de permeat et la conductivité sont la pression et le débit d'alimentation. Une comparaison des modèles de RNA développés avec les modèles RLM dans ce travail ont donné des erreurs plus faibles ce que implique la robustesse de modèle neuronal.

Les besoins énergétique du dessalement de l'eau de mer sont tels qu'ils constituent la part la plus importante des coûts d'exploitation. A cet effet, dans cette direction les recherches ont toujours été orientés, et continuent à l'être, afin d'obtenir les gains ayant les répercussions les plus importantes sur le coût de production d'eau douce à partir de l'eau de mer.

Chapitre V
Etude technico-économique

V.1. Introduction

Le dessalement est une technologie énergivore par rapport aux méthodes traditionnelles de traitement de l'eau. Grubert et al.2014, suggèrent que la consommation d'énergie typique pour le traitement de l'eau douce de surface est d'environ 0,06$kWh\ /\ m^3$.

En revanche, la consommation d'énergie pour le dessalement de l'eau de mer est comprise entre 3,6 et 4,5 $kWh\ /\ m^3$. Selon la technologie de dessalement, la Consommation spécifique d'énergie totale peut varier entre 0,5 et 16 $kWh\ /\ m^3$ (Ghaffour et al.2013).

A cet effet, le procédé d'osmose inverse est devenu le plus utilisable grâce à son efficacité énergétique. Néanmoins, la comparaison des coûts de dessalement de l'eau de mer par OI et des procédés thermiques a montré que pour OI, le plus grand potentiel des coûts réside dans les coûts du capital et l'énergie, comme il est indiqué sur les figures (V.1 et V.2) (Ebensperger et Isley 2005 ; Loupasis 2002).

Aujourd'hui, Le photovoltaïque est la source d'électricité la moins coûteuse dans la plupart des régions du monde et, à mesure que le coût des technologies d'énergie renouvelable et du stockage de l'énergie diminue. Le dessalement à l'énergie renouvelable offre une alternative rentable au dessalement à base de combustibles fossiles. Dont le coût de l'eau produite dans les installations PV-OI est de l'ordre de 3,5 –7 €/m^3 pour l'eau saumâtre et de 9 –12 €/m^3 pour l'eau de mer (Caldera et al. 2018).

Dans ce chapitre on va répondre à la demande en eau potable d'ici 2030 par le dessalement en osmose inverse propulsé par énergie renouvelable. Tandis que il faudra calculer le coût correspond à la production du mètre cube dessalé ou le coût de l'eau produite (Levelized water cost LWC), la valeur actuelle nette (VAN) et le taux de rentabilité interne (TRI). Les coûts peuvent ensuite être comparés aux coûts des usines de dessalement à énergie fossile existantes pour évaluer le rapport coût-efficacité.

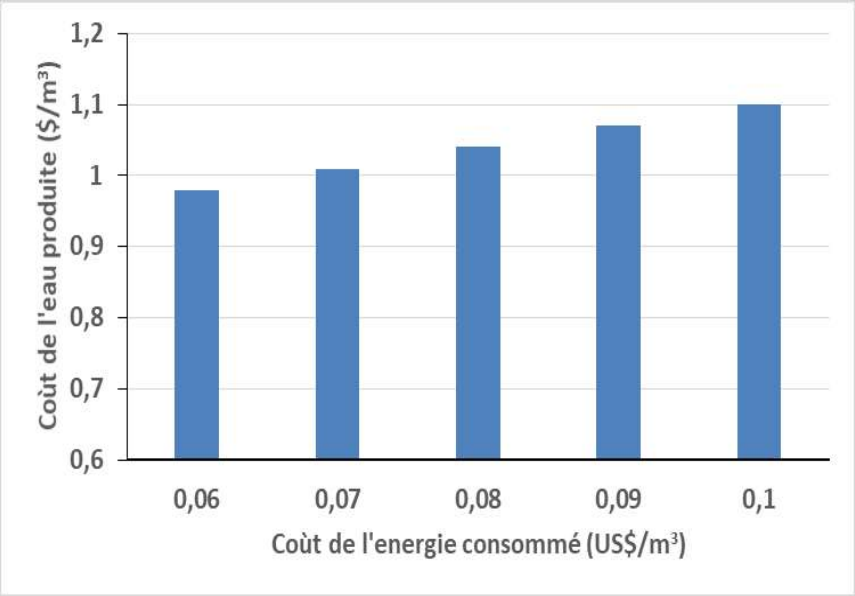


Figure V.1. Influence du prix de l'énergie électrique sur le cout de l'eau produite du dessalement (Al-Karaghouli et Kazmerski 2012).

V.2. Calcul des indicateurs économiques

Les indicateurs économiques sont des critères de mesure de la performance de projet apprécient la viabilité et la rentabilité du projet d'une manière quantitatif et qualitatif par une étude de faisabilité économique inclure une analyse économique du projet.

L'analyse économique a pour but de déterminer s'il existe une meilleure justification économique à la décision d'investissement. La faisabilité économique est intéressée par :

-Les avantages économiques du projet ;

-Les coûts économiques du projet ;

-Le solde de ceux-ci exprimés en valeur actuelle (le coût économique net).

Les coûts et les avantages économiques ne sont pas toujours les mêmes que les coûts et les avantages financiers. L'analyse économique inclut les impacts du projet. C'est donc de cette manière que le développement économique de l'analyse jette un filet plus large qu'une évaluation financière.

Les indicateurs de rentabilité identifiés servent à mesurer la faisabilité financière et économique du projet de dessalement alimenté par énergie solaire photovoltaïque à travers :

-La valeur actualisée nette (VAN) ;

-Le taux de rentabilité interne (TRI).

La valeur actualisée nette (VAN)

Lorsque on effectue une analyse économique d'un projet, un résultat est obtenu en convertissant tous les coûts et avantages futurs en valeurs actuelles. La valeur actuelle nette (VAN), l'un des outils les plus importants appliqués dans les analyses de projets d'eau compte tenu de sa polyvalence, elle est la différence entre la Capacité d'Auto-financement actualisée générée par un investissement et le montant initial de l'investissement. La VAN résume les valeurs des coûts et des bénéfices économiques pertinents sur la durée de vie d'un projet (Molinos-Senante et al.2015).

On la calcule de la manière suivante :

$$VAN(n) = \sum_{i=1}^{n} \frac{Ai}{(1+r)^n} - C \qquad \text{(V.1)}$$

Où

C Correspond au capital initial d'investissement, Ai est l'entrée de trésorerie à la fin de chaque année, r est le taux de rendement de l'investissement.

En effet, dans notre étude la méthode TRI a été utilisée comme indicateur économique pour étudier la faisabilité de raccorder unité de dessalement par Osmose inverse d'une capacité de 2.016 m^3/ j avec les meilleures sources d'énergie (photovoltaïque ou conventionnelle).

V.2.1. Modélisation de la faisabilité économique par la méthode TRI

La viabilité financière du système analysé a également été évaluée grâce au taux de rendement interne (TRI). D'une manière générale, le taux de rentabilité interne est considéré comme facteur de classement des projets, plus il est élevé plus il sera probablement considéré comme le meilleur et sera entrepris le premier.

Le TRI est un taux d'actualisation qui rend la VAN de tous les flux de trésorerie d'un projet particulier égale à zéro, décrit le montant des entrées de trésorerie dépassant les sorties de trésorerie sur une base de pourcentage annualisé en tenant compte du calendrier de ces flux de trésorerie. Il assimile les sorties de trésorerie futures actualisées (argent versé en raison de ses

activités d'exploitation ou d'investissement) aux entrées de trésorerie (argent reçu en raison de ses activités d'exploitation), il permet de connaitre le taux réel de rentabilité (Aparicio et al.2017).

Les projets dont le taux de rentabilité interne (TRI) est supérieur au taux d'actualisation choisi par les porteurs du projet ont une valeur actualisée nette (VAN) positive et doivent être retenus.

La formule utilisée pour déterminer ce chiffre est la suivant :

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{A_i}{(1+TRI)^n} - C = 0 \qquad \text{(V.2)}$$

V.2.2. Coût d'investissement de l'usine de dessalement SWRO

Le coût est un facteur majeur dans la mise en œuvre des technologies de dessalement. Cette section fournit des éléments de coût de dessalement qui font partie des coûts directs, indirects et d'exploitation.

V.2.2.1. Facteurs influant sur les coûts de dessalement

Le coût unitaire de l'eau produite est affecté par plusieurs facteurs de conception, d'exploitation et de maintenance (figure V.2), qui comprend les éléments suivants :

- ***Qualité et salinité de l'eau d'alimentation*** : La qualité de l'eau d'alimentation est un facteur de conception essentielle. La salinité d'alimentation inférieure permet des taux de production plus élevés. En conséquence, la station fonctionne avec une consommation d'énergie spécifique plus faible.
- ***Capacité de l'usine*** : Les usines de grande capacité nécessitent un coût en capital élevé par rapport à des installations de capacité faible. Cependant, le coût de production unitaire pour les installations de petite capacité peut être inférieur qu'une grande capacité ;
- ***Conditions du site :*** L'installation de nouvelle unité sur le site existant réduirait les coûts associés à des installations de la prise en mer, d'élimination de la saumure et le prétraitement (Bilton et al.2011) ;
- ***Main-d'œuvre qualifiée :*** la disponibilité des opérateurs et des ingénieurs qualifiés réduit les arrêts de la station ce qu'implique une capacité de production de l'usine plus élevée ;
- ***Coût de l'énergie :*** le procédé de traitement (MSF ou OI) exige le type d'énergie utilisé dans de l'usine (thermique ou électrique) ;

- ***Durée de vie de la station*** : L'augmentation de la durée de vie de la station réduit le coût de l'eau produite ;
- ***Exigences réglementaires*** : Ces coûts sont associés aux permis locaux et exigences réglementaires.

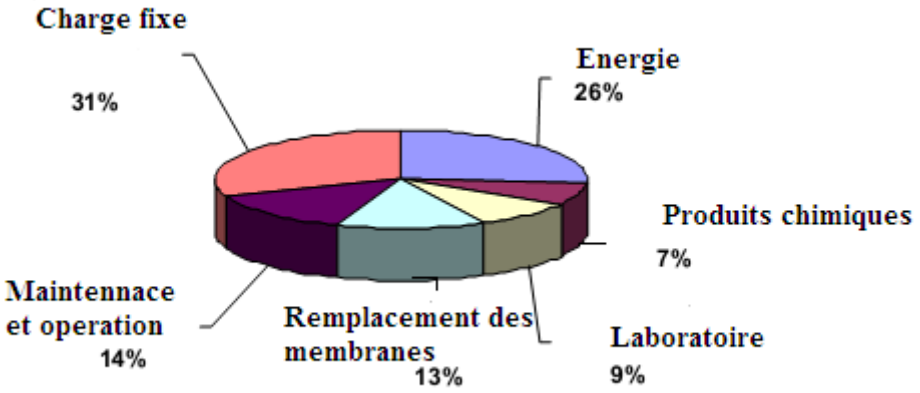


Figure V.2. Composition des coûts pour une usine de dessalement de l'eau mer par osmose inverse (Burn et al.2015)

V.2.2.2. Eléments de calcul économique

Le calcul du coût unitaire des produits dépend de la capacité de l'usine, des caractéristiques du site et caractéristiques de conception. La capacité de l'usine spécifie les dimensions de divers équipements de traitement, des unités de pompage et les modules membranaires. Les caractéristiques du site ont un effet important sur le type d'équipements de prétraitement, de post-traitement et taux de consommation de produits chimiques. En outre, les caractéristiques de conception du processus affectent la consommation d'énergie électrique et produits chimiques.

Les coûts de mise en œuvre des installations de dessalement peuvent être classés en coûts d'investissement, d'exploitation et de maintenance.

A. Frais d'exploitation

Les postes de coûts d'exploitation comprennent la main d'œuvre, l'énergie, les produits chimiques, les pièces de rechange et les produits divers. Vous trouverez ci-dessous une brève description de chaque élément et des coûts actuels estimés .

Tableau V.1. Estimations des frais d'exploitation d'une unité de dessalement (Liu et al. 2008).

	Les frais d'exploitation
Energie	52%
Opération	8 ,6%
Produit chimique	8,10%
Maintenance	3,00%
Personnel	10,3%
Combustible	18,00%
Remplacement des membranes	5%-20%/ans

B. Le coût des Produits chimiques

Les produits chimiques utilisés dans le traitement et le nettoyage des membranes comprennent l'acide chlorhydrique, Soude caustique, anticalcaire, bisulfite de sodium, chlorure ferrique et chlore.

Tableau V.2. Estimations du coût des produits chimiques et des taux de dosage

Produit Chimique	**Le pris/ton (DA)**
Acide hydrochlorate (33%)	807000
Soda Caustique (50%)	941500
Antiscalant (100%)	376600
Chlorite (10%)	739750
bisulfite de sodium (100%)	672500
Chlorure ferrique (100%)	807000

Le coût annuel de l'usine SWRO est estimé sur une durée de vie de25 ans, la même durée pour le système Photovoltaïque. Les coûts d'investissement ont été calculés sous la base des coûts fixes et variable (Figure V.3) .Certains coûts sont les mêmes dans différents scénarios. Les bénéfices du projet ont été estimés sur la base du prix de vente et de l'eau produite de la station.

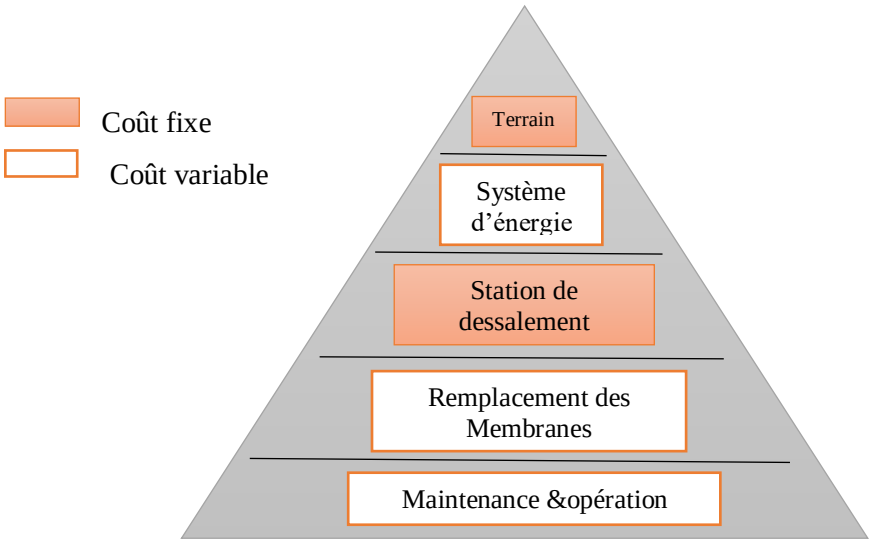


Figure V.3. Augmentation des coûts au cours des années

V.2.2.3. Coût de l'eau

Le coût de l'eau (The levelized Water Cost) *LWC* est généralement utilisé pour comparer différentes technologies d'usines de dessalement. C'est un facteur d'évaluation des performances économique des systèmes proposés.

Dans cette approche de calcul économique, les coûts d'investissement annuels (coûts annuels fixes et variables de l'installation OI et de l'installation solaire photovoltaïque) sont divisés par la production annuelle totale d'eau douce. Les considérations économiques de l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'eau douce par dessalement sont les aspects les plus importants dans la sélection des processus de dessalement appropriés à utiliser dans tout projet et également dans le choix de site où l'usine sera mise en œuvre (Bilton et al.2011).

Il a été évaluée sur la base du coût standardisé de l'eau (DA / m^3). Le *lwc* a été calculée en utilisant l'équation suivante :

$$lwc = \frac{C_{inv}+C_{pv}+C_{ROO\&m}}{Q_P} \qquad (V.3)$$

V.3. Etude de cas

Les limites connues de combustibles fossiles obligent les sociétés du monde à travailler conjointement pour les remplacés progressivement par des énergies propres. Face à cette situation, le recours aux solutions énergétiques alternatives durables une meilleure réponse à nos stations à long terme. Actuellement, les énergies renouvelables constituent les seules alternatives crédibles sur le niveau environnemental, économique et sociétal.

Vue de sa situation idéale, l'Algérie dispose d'un important gisement d'énergie solaire dans tout le bassin méditerranéen. Elle possède l'un des gisements solaires les plus élevés au monde, elle prévoit de générer 31,2% de sa puissance électrique à partir de l'énergie solaire d'ici l'an 2030 (9,2% pour le *PV* et 24% pour le *CSP*) (Othenio et Awange2016). Dont la durée du rayonnement solaire sur tout le territoire national dépasse 2500 heures par an et peut atteindre 3900 heures (hauts plateaux et Sahara) (Tableau V.3). L'énergie reçu quotidiennement sur une surface horizontale est estimée à 1m² soit près de 3 KWh/m^2 au nord et dépasse 5,6 KWh/m^2 au Grand Sud (ME 2019).

Afin d'assurer une consommation électrique moins couteuse et permanente dans les stations du dessalement, on a étudié le couplage de la station pilot du centre de l'UDES Bousmail (Tipaza) au système solaire photovoltaïque. Le choix de cette technologie est lié à la priorité donnée par le programme d'énergies renouvelables mis en œuvre par le gouvernement Algérien, pour installer une capacité d'environ 13575 MWc de photovoltaïque d'ici 2030.

Tableau V.3. Potentiel solaire en Algérie (Sonalgaz, 2019)

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heurs/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m^2)	1700	1900	2650

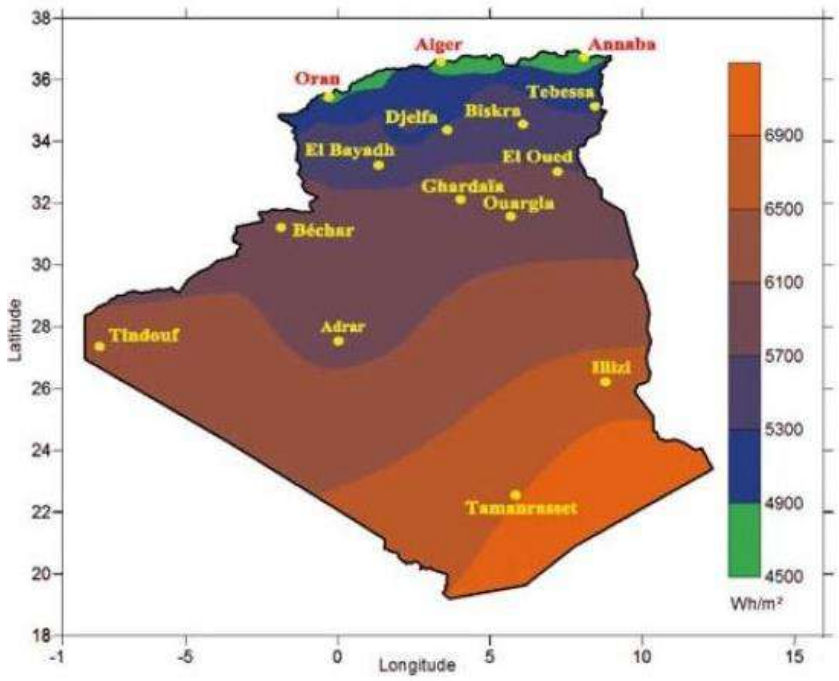


Figure V.4. Carte de l'irradiation solaire en Algérie (CDER 2018)

V.3.1. Données climatiques et l'énergie reçue

Les figures ci-dessous représentent les données journalières climatiques (UDES 2017) du site étudié pendant une année (Bousmail- Tipaza (Algérie)). La figure V.5 illustre la température atmosphérique durant l'année 2017 avec une variation comprise entre 13 et 33 °C sur l'année et un écart journalier moyen entre les températures maximales et minimales d'environ 8°C sur toute l'année.

Le rayonnement solaire mensuel reçu sur un plan incliné à latitude du site de Bou-Ismail a été déterminé à partir des mesures d'éclairement sur un plan incliné toutes les 10 minutes sur le site de Bou-Ismail. La figure V.6 montre l'évolution de l'irradiation mensuelle du site de Bou-Ismail en 2017.

Le maximum de l'irradiation moyenne mensuel à l'été atteint $485\ W/m^2$. Cette région est caractérisée par un important gisement solaire .Cependant, le dimensionnement du système PV pour alimenter l'unité de l'osmose inverse est basé sur les caractéristiques de la pompe et les hypothèses de dimensionnement. Ainsi, en utilisant les données de rayonnement solaire, nous avons dimensionné un champ solaire photovoltaïque autonome d'une puissance de $2{,}8\ kW$ qui peut faire fonctionner la pompe haute pression.

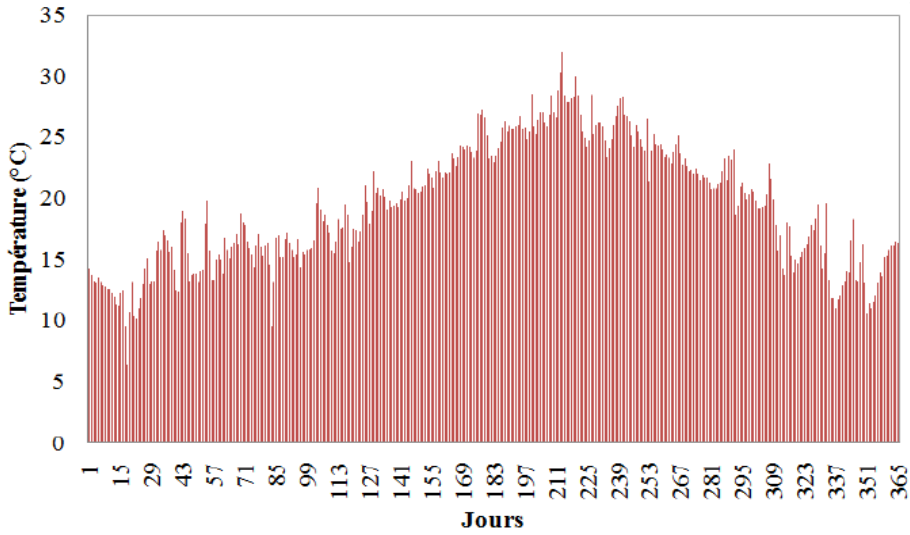


Figure V.5. Température ambiante du site de Bousmail (UDES 2017)

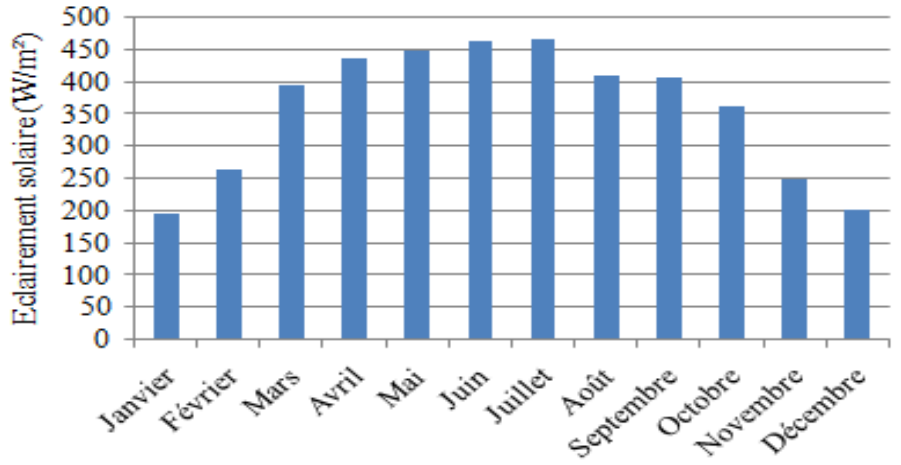


Figure V.6. Irradiation Solaire mensuelle du site de Bousmail (UDES 2017).

V.3.2. Présentation de la station du dessalement osmose inverse/photovoltaïque

L'étude a été menée sur un prototype de dessalement réalisé dans l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES) de Bou Ismail, fonctionnant en énergie solaire photovoltaïque depuis l'année 2015. L'osmose inverse (OI) EUROS-MM-M-25-22 a été conçue en France par le groupe DFM pour le Centre UDES afin d'exploiter une unité de dessalement par osmose inverse d'une capacité 84 l/h associé à l'énergie solaire à l'aide des cellules de système photovoltaïque (figure V.7). Les caractéristiques de l'unité de l'osmose inverse et les caractéristiques physico-chimique de l'eau sont présentés dans les tableaux V.4 et V.5 respectivement.

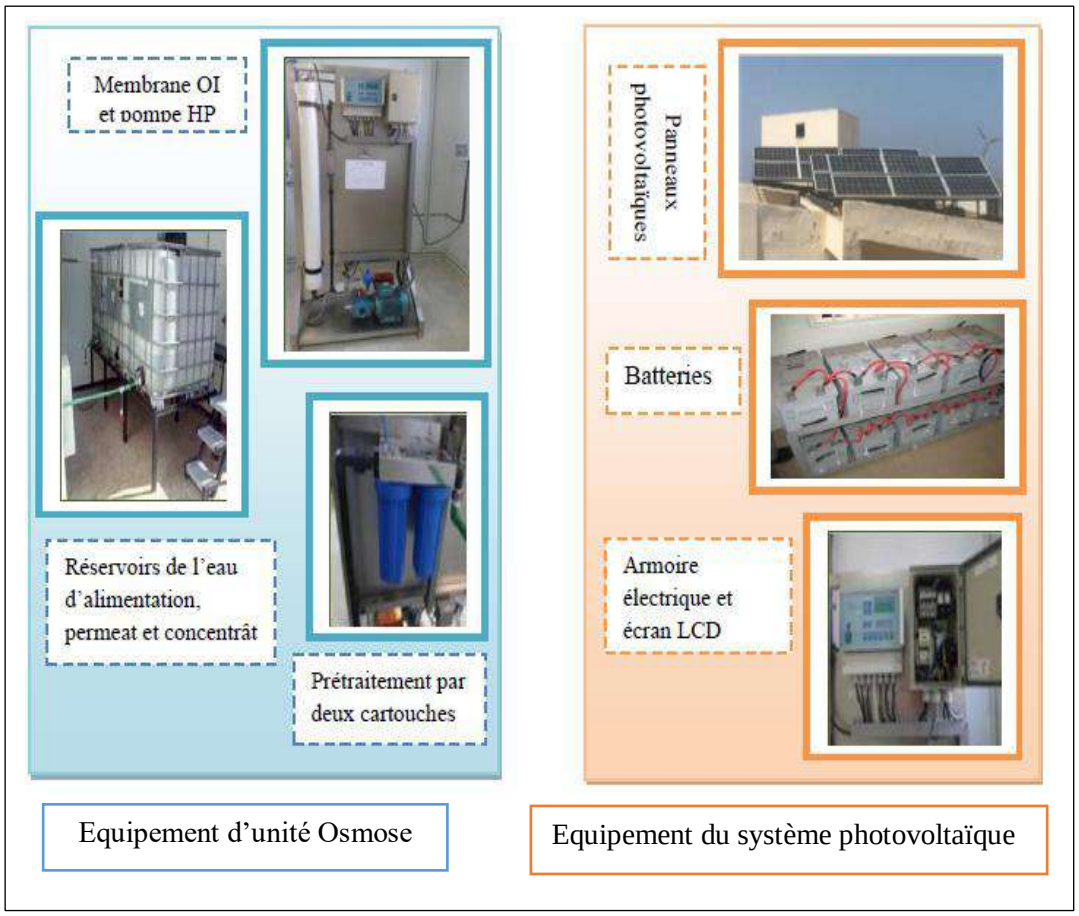


Figure V.7. Prototype de la station de dessalement /photovoltaïque (UDES)

Tableau. V.4. Caractéristiques de l'unité d'Osmose Inverse

Caractéristique	**Value**
Type membrane OI	SW30HR380 Filmtec
Le débit de production	2,016 m^3/j
La pression d'opération	55 bars
La pression d'alimentation	3-5 bars
Le débit d'alimentation	3,96 m^3/j
La rétention	99%
L'efficacité de la pompe HP	75%
L'énergie spécifique	3,3562 kWh/m^3
La consommation d'énergie	2 kWh
Vitesse de la pompe HP	1700t/m
Courant &voltage	3,7Amp-400V
Puissance mécanique nominal	1kw
Facteur de puissance (coût)	0,77

Tableau. V.5. Résultats physico-chimique de l'eau

Paramètres	**Values**
Température (°C)	17,8
pH	8,05
Salinité ‰	5,2
Conductivité (µs/cm)	13,36
M.E.S (mg/l)	1,6
Ammonium (NH_4) mg/L	8,0876
Nitrite (HNO_2) mg/L	0,0751
Nitrate (NO_3^-) mg/L	202,56
Phosphate (PO_4^{3-}) mg/L	0,0086
Chlorite (ClO_2^-) mg/L	1762,57
Carbonate (CO_3^{-2}) mg/L	0,1065
Calcium (Ca^{-2}) mg/L	438,12
Sulfate (SO_4^{-2}) mg/L	0

Afin d'assurer le besoin énergétique de l'unité de dessalement, le système sera composé de : panneaux photovoltaïques, et batteries, ajouté à cela des onduleurs permettant de convertir le courant continu en courant alternatif. Le schéma global de ce prototype est présenté sur la figure V.8.

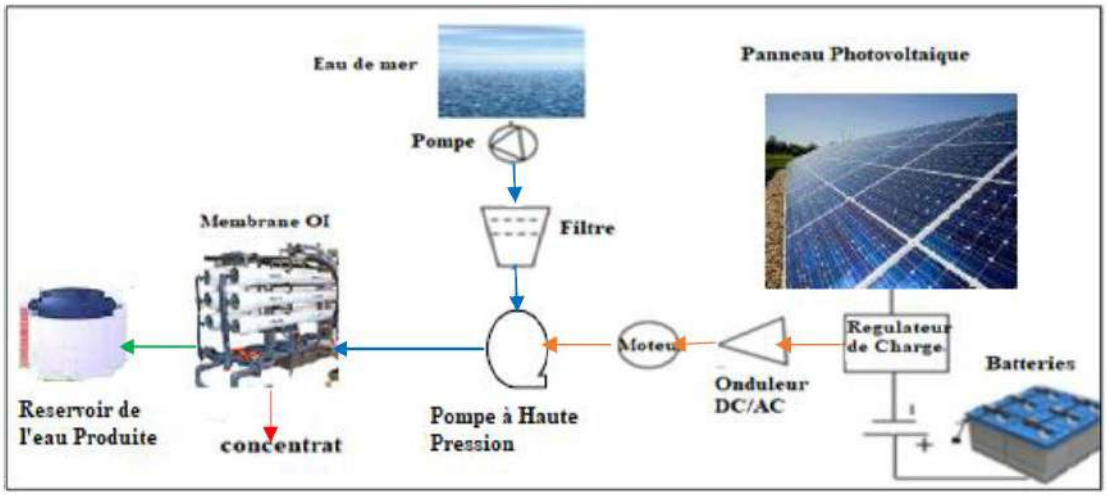


Figure V.8. Schéma du système de dessalement par procédé osmose inverse alimenté par Photovoltaïque

Le système photovoltaïque autonome (voir tableau V.5) devrait être composée de vingt modules PV de 150 Wc (monocristallin), deux régulateurs 50A / 48V, onduleur 3kW (48VDC / 400VAC), batteries solaires (250Ah x 8) et accessoires de montage et de protection (câblage, disjoncteur électromagnétique, coffret électrique). Le rôle du contrôleur solaire est d'assurer et de réguler la charge de la batterie. Il optimise la puissance des panneaux et évite les décharges / surcharges profondes nuisibles à la bonne durée de vie des batteries. Ils améliorent la charge de la batterie. Pour compléter la charge complète, il sépare le courant fourni par les panneaux et l'envoie aux batteries sous forme d'impulsions. La lecture précise du régulateur aux bornes de la batterie module ces impulsions. Cela lui permet de connaître son niveau de charge. On tenu compte de l'irradiation annuelle du site de Bousmail, le dimensionnement du champ photovoltaïque, 20 modules photovoltaïques de $150\ Wc$ chacun pour fournir environ $500\ kWh$ de consommation annuelle de pilote OI.

Tableau. V.6. Caractéristiques des composants du système photovoltaïque

Descriptions	**Values /quantité**
Modules	20
conducteur d'entrée de PV	1
disconnecteur d'entrée de PV	1
conducteur sortie de PV	1
Onduleur	3
Câble vers OI unité	1
Contrôleur de charge	1(100 A)
Banque des batteries	24 (500Ah/48V)
Système d'acquisition des données	1
Modem	1
Batterie	1 (48V/500Ah)

Tableau V.7. Analyse globale des coûts du système

Cout d'investissement et installation		
paramètre	**Prix DA**	**Durée de vie (ans)**
Panneau photovoltaïque	18490.00/module	25
Onduleur/régulateur	106174.03	20
Unité de dessalement	3 000 000	20
Module de membrane	60000/module	4
Réservoir	8659,82	30
Batterie	70925,39	6
Assurance sur le coût de PV système	4% du coût PV	

V.3.3. Présentation de l'approche utilisée

Dans cette étude une analyse économique a été réalisé pour une station de dessalement par procédé d'osmose inverse alimentée par photovoltaïque .Plusieurs techniques et approches économique sont proposés afin d'évaluer la faisabilité économique du projet.

La méthode de Taux de Rendement Interne (TRI) a été utilisée comme indicateur économique. Dont, nous avons pris en compte deux scénarios de l'alimentation du système par l'énergie électrique requise pour son fonctionnement.

Scénario 1 : Alimentation par réseau électrique publique (On Grid).

Scénario 2 : Alimentation par un champ solaire photovoltaïque et batteries pour le stockage (Off Grid).

V.3.3.1. Scénario 1 (On Grid)

La figure V.9 représente le premier scénario du système proposée, qui dépend des conditions locales du réseau électrique. L'énergie requise par l'unité de dessalement est de 2,8 kwh /j, alors que le prix commercial d'un kilowatt d'électricité est estimé à 10,5 DA / kWh. L'estimation des autres coûts ont été effectués en faisant référence aux Autorités algérienne de l'énergie et Myah Tipaza et UDES. Le tableau V.7 montre ces estimations.

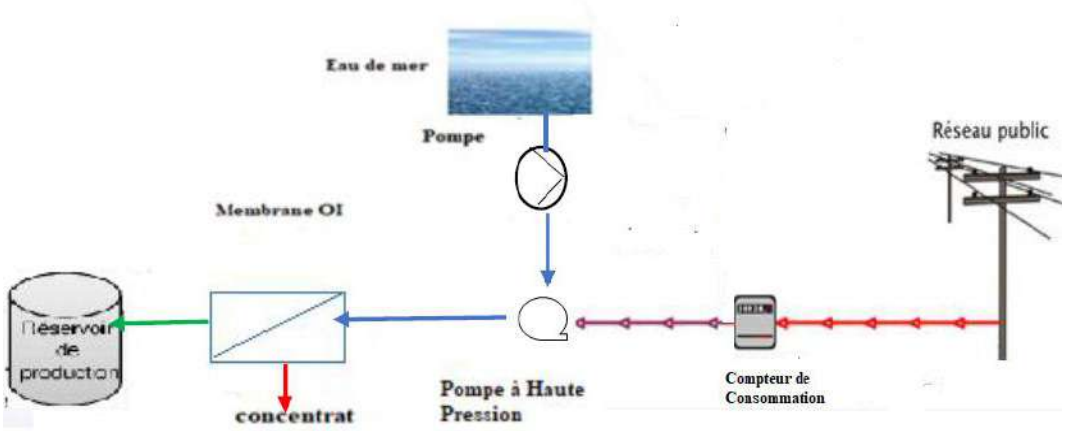


Figure V.9. Schéma d'un système de dessalement dépond de réseau publique (On grid).

Tableau V.8. Représentation des détails des frais (On Grid)

Types	Eléments	Unités	Couts annuel
Fixe	Système de dessalement	DA	3000000
	Terrain	m²	0
Variables	Energies	DA	29400
	Operations & Maintenances	DA	43443,5
	Remplacement	DA	73786,4

Pour estimer la valeur de TRI du projet le taux d'actualisation approprie devrait être déterminée par la valeur actuelle nette (VAN) pour évaluer correctement les flux de trésorerie futurs, on a travaillé sur Excel qui nous permettre de calculer le TRI et le cout de mètre cube et pour un taux d'intérêt, i = 4% (Abbas et al.2018).

Tableau V.9. Paramètres économiques du projet (On Grid)

TRI	11,43%
Prix du m^3 (LWC)	50DA
VAN (DA)	-2144691,00

L'analyse précédente (Tableau V.9) montre que la valeur de TRI du projet est égale à 11.43 % et une valeur de VAN négative ce qu'implique que le projet n'est pas rentable. La valeur de TRI du projet est supérieure au taux d'intérêt en Algérie, qui est égal à 2.5%.Alors la valeur est réalisable du point de vue des investisseurs.

V.3.3.2. Scénario 2 (Off Grid)

La figure (V.10), représente le deuxième scénario de la centrale proposée, qui dépend de système d'énergie solaire uniquement connu sous le nom de (système hors réseau).Les systèmes hors réseau ne sont pas connectés au réseau électrique. La sortie du système hors réseau dépend entièrement de l'intensité du soleil. Plus l'exposition au soleil est intense, plus le rendement est important.

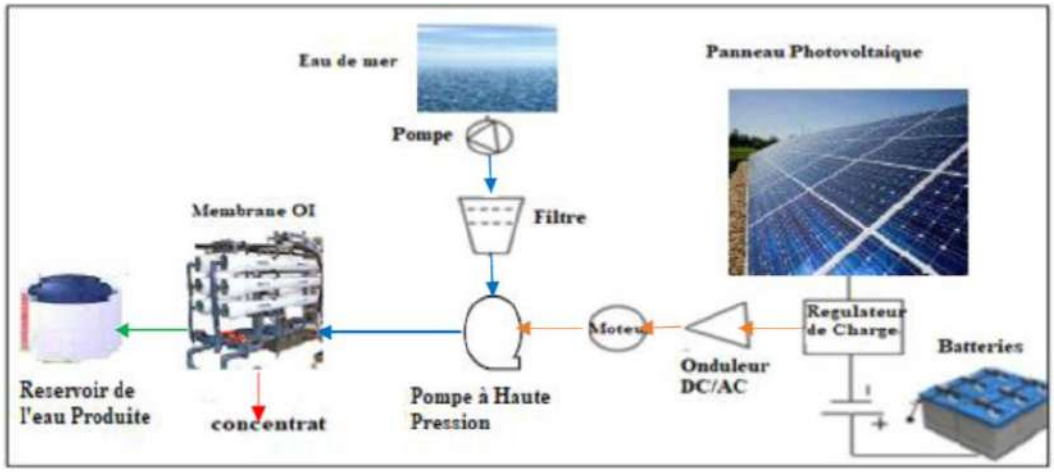


Figure V.10. Schéma du 2eme scenario dépend d'un système d'énergie solaire (Off grid)

Tableau V.10. Représentation des détails des frais (Off Grid)

Types	Eléments	Unités	Couts annuel
Fixe	Système de dessalement+ photovoltaïque	DA	36396611,39
	Terrain	m²	0
Variables	Energies	DA	29400
	Operations & Maintenances	DA	240000
	Remplacement	DA	73786,4

Tableau V.11. Paramètres économique du projet (Off Grid)

TRI	11,72%
Prix du m^3 (LWC)	44DA
VAN (DA)	50917444,00

La présente analyse présente une valeur de VAN positive alors que le projet est rentable et TRI du projet est égal à 11,72 %.

V.3.4. Récapitulation des résultats

Le coût de l'eau produite de l'usine de dessalement SWRO (2,016 m^3/ j) qui dépend du système (Système Off Grid) en tant que source d'énergie est le coût le plus bas entre les deux scénarios. C'est reflété positivement selon les indicateurs économiques (figure V.11).

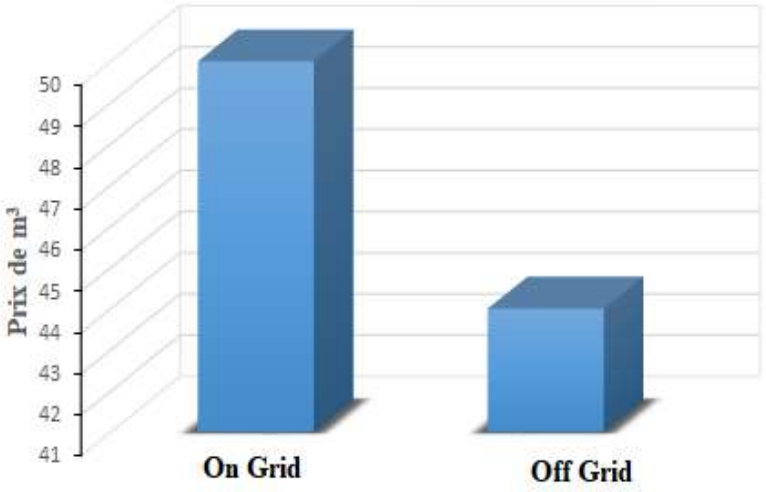


Figure V.11. Taux de rendement interne TRI en fonction de prix de mètre cube d'eau produite

V.4. Conclusion

Plusieurs facteurs économiques existent dans la littérature afin de réussir une étude de faisabilité d'un projet .Dans notre cas on a choisi la méthode de taux de rendement interne TRI pour estimer le bénéfice de système et calculer le coût de l'eau produite .deux scenario étaient proposés dont le premier scenario une station de dessalement alimenté par réseau publique sans système de d'énergie solaire (On Grid) et le deuxième scenario une station alimenté par les

panneaux photovoltaïque. Les calculs montrent que le deuxième scénario a été choisi comme la meilleure option économique pour optimiser le coût de l'unité de dessalement à L'UDES. Cela dépend du système d'énergie solaire et de l'énergie électrique connu sous le nom (Off Grid).

Conclusion générale et perspectives

Notre travail est une contribution en domaine de la modélisation du système de dessalement fonctionnant en énergie solaire, tandis que la modélisation nous a permis d'optimiser les performances du procédé de dessalement afin de réduire les coûts de production de l'eau et les coûts énergétiques. A travers ce travail deux modèles différents ont été développé :

Le premier modèle, un nouveau modèle non linéaire de $n^{ième}$ pseudo ordre a été développé sur la base des hypothèses réelles, le logiciel MATLAB a été utilisé pour optimiser le pseudo-ordre et décrire les paramètres cinétiques. Ainsi, une comparaison entre le pseudo-premier, seconde ordre, (PPO, PSO) et le modèle proposé (PNO) a été établi et une description de la cinétique de la filtration a été examinée.

Les résultats indiquent que les valeurs prédites obtenues à partir du nouveau modèle sont parfaitement accordées avec les données expérimentales du processus de filtration membranaire, ce qui donne un meilleur coefficient de corrélation R^2 allant jusqu'à 0,997 et une faible valeur raisonnable de $RMSE$ et MAE respectivement 0,0171 et 0,2141. Le pseudo- optimal ordre d'adsorption de albumine sérum bovine (BSA) sur la membrane polycarbonate track-etched (PCTE) est n = 1,115 compris entre 1 et 2 ; les courbes de meilleur ajustement ont été tracées pour le modèle proposé. Afin de tester la capacité de modèle on a simulé avec autre bases de données .les résultats de la simulation montrent la validité de modèle développé.

Le deuxième modèle, un réseau de neurone à feed-forward a été construit afin de modéliser les performances d'une unité pilote de dessalement d'eau de mer hybride NF / OI. Dans ce contexte, le modèle RNA prédit la conductivité de perméat, le débit de perméat et le taux de conversion globale de l'unité. Le RNA optimisé se composait de cinq neurones dans la couche d'entrée, de huit neurones dans la couche cachée et de trois neurones dans la couche de sortie.

Les résultats de la simulation montrent que le RNA a interpolé les données avec une bonne précision et donne de meilleurs résultats pour les trois paramètres (conductivité de perméat, débit de perméat, taux de conversion) et avec des erreurs faibles. Une comparaison entre les modèles développés de RNA et les modèles de RLM montre la performance de Réseau de neurone. Un dimensionnement de système NF/OI et photovoltaïque et optimisation de la consommation énergétique spécifique sont effectués.

Une étude technico-économique portait sur l'utilisation optimale de l'énergie solaire et la sélection des produits les plus utiles. Configuration économiquement réalisable d'utiliser cette source totalement dans SWRO. La méthode de taux de rendement interne (TRI) a été utilisée comme indicateur économique de faisabilité de création d'une unité de dessalement d'une

capacité de 2,016 m^3/j fonctionnant avec l'énergie solaire photovoltaïque. Les scénarios proposés sont : 1- Système de dessalement alimenté par le réseau publique (On Grid).

2- Système de dessalement alimenté par énergie solaire photovoltaïque (Off-Grid).

On conclut que le système Off grid est le plus rentable par rapport l'On Grid proposé avec une valeur actuelle net (VAN) positive.

De ce travail de thèse ont émergé de nombreuses pistes de recherche qui feront l'objet de futurs travaux.

- ✓ Les perspectives concernent plus particulièrement le modèle développé des RNA nous permettre d'établir un nouveau modèle de la consommation énergétique de station de dessalement.
- ✓ Utilisation d'autre méthode d'intelligence artificielle Machine Learning (ML), QSAR et QSPR.
- ✓ Le modèle arithmétique ouvre la porte pour une Modélisation fractionnaire plus développé.
- ✓ Modélisation et optimisation d'un système de dessalement hybride alimenté par système d'énergie renouvelable hybride (photovoltaïque –éolienne).

Références bibliographiques

Abbas A., Al-Bastaki N. (2005). "Modeling of an RO water desalination unit using neural networks". Chemical Engineering Journal. **114** (1) : 139–143.

Abbas M., Adda A., Hanini S., Tassalit D., Aburdeh H., Tgrine Z. (2018). "Design, Techno Economic and Environmental Evaluation of a Small Scale Brackish Water Desalination Systems Powered by Solar Energy in the Arid Regions of Algeria". Proceedings of 160th IASTEM International Conference, Istanbul, Turkey, 20th-21st December 2018.

Abdelkader M.A., Antar M.A., Khan Z. (2018)." Nanofiltration as a Pretreatment Step in Seawater Desalination: A Review".Arabian Journal for Science and Engineering. 43 (9): 4413-4432

Abdelkreem M.A., El Haj assad M., Sayed E.T., Soudan B.(2018)."Recent progress in the use of renewable energy sources to power water desalination plants".Desalination. 435 :97–113.

Abu-Zeid M.A.E.R., Zhang Y., Dong H., Zhang L., Chen H. L., Hou L. (2015)."A comprehensive review of vacuum membrane distillation technique". Desalination 356 : 1–14.

Ahmad G. & Schmid J. (2002). "Feasibility study of brackish water desalination in the Egyptian deserts and rural regions using PV systems". Energy Conversion and Management. 43 (18) : 2641–2649.

Aish A.M., Zaqoot H.A., Abdeljawad S.M. (2015)."Artificial neural network approach for predicting reverse osmosis desalination plants performance in the Gaza Strip". Desalination. 367 : 240–247.

Ammi Y., Khaouane L. et Hanini S. (2015)."Prediction of the rejection of organiccompounds (neutral and ionic) by nanofiltration and reverse osmosis membranes using neural networks". Korean Journal of Chemical Engineering. 32 (11): 2300-2310.

Antonyan M. (2019). "Energy Footprint of Water Desalination". Lambert academic Publishing.

Antoine B. (2004). "Etude de la nanofiltration pour son intégration dans les procédés dans de production d'acides organiques". Thèse de doctorat. Université Paul Sabatier. Toulouse. France.

A.E.C. Algerian Energy Company **(2018).** https://www.aec.dz: consulté le 14/12/2018.

Al-Hallaj S., Farid M.M.,Tamimi A.R. (1998)."Solar desalination with a humidification dehumidification cycle: performance of the unit". Desalination. 120 : 273–280.

Al-hajouri A., Al-amoudi A., Farooque M.(2013)."Long term experience in the operation of nanofiltration pretreatment unit for seawater desalination at SWCC SWRO plant". Desalination and Water Treatment. 51 : 1861-1873

Akther N., Sodiq A., Giwa A., Daer S., Arafat H.A., Hasan S.W. (2015)."Recent advancements in forward osmosis desalination: a review". Chemical Engineering Journal. 281: 502–522

Al-Karaghouli A., Renne D., Kazmerski L.L. (2009). "Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions".Renewable and Sustainable Energy Reviews. 13(9): 2397-2407.

Al-Karaghouli A., Kazmerski L. (2012). "Economic and technical analysis of a reverse-osmosis water desalination plant using DEEP-3. 2 software". Journal of Environmental Science and Engineering A, 1:3, 318-328.

Al-Karaghouli A., Kazmerski L.L. (2013). "Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 24: 343-356.

Alnouri S., Linke P. (2013). "Optimal SWRO desalination network synthesis using multiple water quality parameters". Journal of Membrane Science. 444: 493-512.

Al-Shayji K.A., Liu Y.A. (2002)."Predictive modeling of large-scale commercial water desalination plants: Data based neural network and model-based process simulation".Industrial & Engineering Chemistry Research.41: 6460–6474.

Al-Subaie K.Z. (2007). "Precise way to select a desalination technology".Desalination, 206: 29-35.

Al Suleimani Z., Nair V.R. (2000)."Desalination by solar-powered reverse osmosis in a remote area of the Sultanate of Oman". Applied Energy. 65(1-4): 367-380.
Altaee A., Sharif A.I. (2011). "Alternative design to dual stage NF seawater desalination using high rejection brackish water membranes". Desalination. 273: 391-397.

Al Zoubi H. (2006)."Development of novel approach to the prediction of nanofiltration membrane performance using advanced atomic force microscopy".PhD Thesis, University of Nottingham.

Akther N., Sodiq A., Giwa A., Daer S., Arafat H.A., Hasan, S.W. (2015)."Recent advancements in forward osmosis desalination: a review". Chemical Engineering Journal. 281: 502–522.

Aparicio J., Candela L., Alfranca O., García-Aróstegui J.L. (2017)."Economic evaluation of small desalination plants from brackish aquifers. Application to Campo de Cartagena (SE Spain)".Desalination. 411: 38-44.

Arzate A. (2008)."Procédés de séparation membranaire et leur application dans l'industrie alimentaire". Thèsede doctorat Acer, 642-RVL-0508.Saint –Norbert d'Athabaska.

Atallah A. (2014). "Procédé de dessalement et qualité physico-chimique de l'eau dessalée de la station Honaine". Mémoire de Master. Université Abou BekrBelkaid Tlemcen.

Babu P., Nambiar A., He T., Karimi I.A., Lee J.D., Englezos P., Linga P. (2018)."A review of clathrate hydrate based desalination to strengthen energy-water nexus. ACS Sustainable Chemistry & Engineering.6(7): 8093–8107.

Bacchin P.(2008). "Principes de bases de la filtration membranaire".2ème Ecole d'Eté Franco Maghrébine. hal-00201760f., Monastir, Tunisia.

Balmann H. (2006). "Electrodialyses".Traité Génie des Procédés.Techniques de l'Ingénieur. n° J2840.

Baranowski B. (1991)."Non-equilibrium thermodynamics as applied to membrane transport". Journal of Membrane Science. 57: 119.

Bartels C., Bates W., Lai K., Kiefer C.A., Bayler D. (2011)."Optimization Membrane Performance at a Hybrid NF Plant". IDA Journal of Desalination and Water Reuse, 3: 74-80.

Barello M., Manca D., Patel R., Mujtaba I.M.(2014)."Neural network based correlation for estimating water permeability constant in RO desalination process under fouling". Desalination. 345: 101–111.

Bilton A.M., Wiesman R., Arif A.F.M., Zubair S.M., Dubowsky S. (2011). "On the feasibility of community-scale photovoltaic-powered reverse osmosis desalination systems for remote locations". Renewable Energy, 36: 3246–3256.

Ben Meriem A., Bouguecha S., Elsayed Aly S., (2013). "Solar-Driven Integrated RO/NFfor Water Desalination". International Journal of Engineering Research and Applications.3: 354-368**.**

Benrabeh D., Hafaifa A., Kouzou A.(2015). "Performance control of gas turbines". Turbomachinery International Journal.pp10-14.

Berland JM., Juery C. (2002). "Les procédés membranaires pour traitement de l'eau". FNDAE. Document Technique FNDAE N 14.Paris.

Blagin E., Biryuk V., Anisimov M.Y., Shimanov A.A., Gorshkalev A. (2018). "Parametric optimization of the MVC desalination plant with thermomechanical compressor". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 339.

Bribieska A. (2005). "Colmatage des membranes par les minéraux et les protéines en coursd'électrodialyse conventionnelle". Collection des thèses et mémoires électroniques.

Boyé H. (2008). "Eau, énergie, dessalement et changement climatique en Méditerranée".Rapport d'étude régionale du Plan Bleu. Valbonne : Plan Bleu.

Bouamar M. et Ladjal M. (**2007)**."Système multicapteur utilisant les réseaux de neurones artificiels pour la surveillance des eaux potables". 4th International Conference: Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications March. Tunisia : 25-29

Bouchekima B., Gros B., Ouahes R., Diboun M. (1998). "Performance study of the capillary film solar distiller". Desalination, 116 (2-3): 185-192.

Boucif N. (2012)."Modélisation et simulation de contacteurs membranaires pour les procédés d'absorption de gaz acides par solvant chimique".Thèse de Doctorat, Université de Lorraine.

Boulehdid H. (2008). "Elaboration et caractérisation d'une membrane cationique mono sélective par modification chimique d'un film ETFE". Thèse de doctorat.Université libre de Bruxelles.

Burn S., Hoang M., Zarzo D., Olewniak F., Campos E., Bolto B., Barron O. (2015). "Desalination techniques — A review of the opportunities for desalination in agriculture". Desalination, 364, 2–16.

Buros OK, (1980). "The U.S.A.I.D. Desalination manual". Agency for internal development.CH2M HILL International Corporation. Washington DC, Chapter 5. p.3.

Busch M., Chu R., Rosenberg S. (2010). "Novel trends in dual membrane systems for seawater desalination: minimum primary pretreatment and low environmental impact treatment schemes". IDA Journal of Desalination and Water Reuse. 2 (1): 56–71.

Bross S. (2007)."SWRO core hydraulic system: extension of the SalTec DT to higher flows and lower energy consumption". Desalination. 203: 160-7.

Cabrera P., Carta J.A., González J., Melián G. (2017). "Artificial neural networks applied to manage the variable operation of a simple seawater reverse osmosis plant", Desalination, 416, 140–156.

Cabrera P.,Carta J.A., González J., Melián G. (2018). "Wind-driven SWRO desalination prototype with and without batteries: A performance simulation using machine learning models". Desalination. 435:77–96.

Caldera U., Bogdanov D., Breyer C. (2018). "Desalination costs using renewable energy technologies". Renewable Energy Powered Desalination Handbook, 287–329.

Calise, F., d'Accadia, M. D., & Piacentino, A. (2014)."A novel solar trigeneration system integrating PVT (photovoltaic/thermal collectors) and SW (seawater) desalination: dynamic simulation and economic assessment". Energy. 67: 129-148.

CDER (2018). www.cder.dz. Consulté le 14/09/2019.

Chaabane T., Taha S., Maachi R., and Dorange G. (2007). "Coupled model of film theory and the Nernst-Planck equation in nanofiltration". Desalination. 206: 424-432.

Charcosset C. (2012). "Principles on membrane and membrane processes". Membrane Processes in Biotechnologies and Pharmaceutics. Amsterdam. 1–30.

Chollom M.N., Rathilal S., Pillay V. L., Alfa D. (2015)."The applicability of nanofiltration for the treatment and reuse of textile reactive dye effluent". Water SA. 41(3): 398–405.

Ciarlet PG., Lions J.L. (1982). "Introduction à l'analyse numérique matricielle et à l'optimisation".Université Pierre et Marie curie école normale supérieure. Masson. Paris. ISBN : 2-225-68893-1, ISSN : 0754-4405.

Corsin P., ManguinG. (2003). "Dessalement de l'eau de mer par osmose inverse : les vrais besoins en énergie". inL'Eau, l'industrie, les nuisances.N° 262. 57-61.

Cui Z.F., Jiang Y., Field R.W. (2010)."Fundamentals of pressure-driven membrane separation processes".Membrane technology. Butterworth-Heinemann. 1-18.

Dach H. (2008). "Comparaison des opérations de nanofiltration et d'osmose inverse pour le dessalement sélectif des eaux saumâtres : de l'échelle du laboratoire au pilote industriel".Thèse doctorat, Université d'Angers.

Dastkhoon M., Ghaedi M., Asfaram A., Azqhandi M.H., &Purkait M.K. (2017). "Simultaneous removal of dyes onto nanowires adsorbent use of ultrasound assisted adsorption toclean wastewater: chemometrics for modeling and optimization, multicomponent adsorption and kinetics study". Chemical Engineering Research and Design. 124: 222-237.

DeCanio S.J.,& Fremstad A. (2011)."Economic feasibility of the path to zero net carbon emissions". Energy Policy.39 : 1144–1153.

Dreyfus G, (1998). "Les réseaux de neurones". Mécanique Industrielle et Matériaux, N^0 51.

Dreyfus G., Martinez J. M., Samuelides M., Gordon M. B., Badran F., Thiria S. et Hérault L. (2002). "Réseaux de neurones : Méthodologie et applications". Éditions Eyrolles, Paris : 408.

Duffie J.A., Beckman J.W. (1991)."Solar Engineering of Thermal Processes". 2^{eme} edition. Inc 1991**.**

Dundorf S., Macharg J., Seacord T.F. (2007)."Optimizing lower energy seawater desalination, the affordable desalination collaboration". In: IDA World Congress. Maspalomas, Gran Canaria. Spain.

Ebensperger U., Isley P. (2005)."Review of the Current State of Desalination". Water Policy Working Paper 2005-008.https://www.issuelab.org/resources/4717/4717.pdf.

El-Ghonemy A.M.K. (2017). "Performance test of a sea water multi-stage flash distillation plant: Case study".Alexandria Engineering Journal.

El-Ghonemy A.M.K. (2012)."Waste energy in seawater reverse osmosis desalination plants.part2: case study".Renewable and Sustainable Energy Reviews. 16: 4016-4018.

El-Hawary M.E. (1993). "Artificial neural networks and possible applications to desalination». Desalination. 92 (1-3): 125-147.

Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. (2014)."Renewable energy resources: current status, future prospects and their enabling technology".Renewable and Sustainable Energy Reviews. 39 : 748–764.

El khabbaze hatim. (2008). "Traitement des solutions modèles du lait par des membranes de nanofiltration et d'osmose inverse". Thèse de doctorat, Université Mohamed V, Rebat.

Erik D., Juan MP. (2011)."A case study: energy use and process design considerations for four desalination projects in California". In: IDA World Congress – Perth Centre Convention et Exhibition (PCEC). Perth, Western Australie.

Ersoy Y., Moscardini A.O. (2013)."Mathematical Modelling Courses for Engineering Education". Springer, Berlin Heidelberg.

Ettouney H.,Wilf M. (2009). "Commercial Desalination Technologies, An Overview of the Current Status of Applications of Commercial Seawater". Desalination Processes.

Esteban LG., Fernández F.G., and Palacios P. (2011)."Prediction of plywood bonding quality using an artificial neural network". Holzforschung.65: 209-214.

Fahmy F.H., Ahmed N.M., & Farghally H.M. (2012). "Optimization of renewableenergy power system for small-scale brackish reverse osmosis desalination unit and atourism motel in Egypt". Smart Grid and Renewable Energy.3: 43-50.

Fane A.G., Tang C., & Wang R. (2011)."Membrane technology for water: microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, and reverse osmosis". Treatise on Water Science. 301-335.

Farooque A.M., Jamaluddin A.T., Al-Reweli A.R., Jalaluddin P.A.M., Al-Marwani S.M., Al-Mobayed A.S.A., Qasim A.H. (2004)."Comparative study of various energy recovery devices used in SWRO process". Technical Report No. TR.3807/EVP 02005.

Fouladitajar A., Ashtiani F.Z , Okhovat A., Dahir B. (2013)."Membrane fouling in microfiltration of oil in water emulsion; comparison between constant pressure blocking laws and genetic programming (GP) model". Desalination. 329:41-49.

Foo K.Y., Hameed B.H. (2010)."Insights 469 into the modeling of adsorption isotherm systems".Chemical Engineering Journal. 156: 2–10.

Gaid K., et Treal Y. (2007). "Le dessalement des eaux par osmose inverse : l'expérience de VéoliaWater". Desalination. 203: 1-14.

Galanakis C.M., Fountoulis G., Gekas V. (2012)."Nanofiltration of brackish groundwater by using a polypiperazine membrane". Desalination. 286: 277–284.

Garg M.C., Joshi H. (2014)."A new approach for optimization of small-scale RO membrane using artificial groundwater". Environ. Technol. 35: 2988–2999.

Garson G.D.(1991)."Interpreting neural network connection weights". AI Expet. 6:47–51.

Gavach M. (2010). "Détoxification de condensats de distillerie par osmose inverse échange d'ions et leur combinaison. Application au recyclage en fermentation alcoolique", Thèse de doctorat.AgroParisTech.

Ge, Y., & Wu, H. (2019). "Prediction of corn price fluctuation based on multiple linear regression analysis model under big data**".** Neural Computing and Applications, 1-13**.**

Ghaffour N. (2009). "The challenge of capacity-building strategies and perspectives for desalination for sustainable water use in MENA". Desalination and Water Treatment. 5(1-3): 48-53.

Ghaffour N., Missimer T.M., & Amy G.L. (2013)."Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability". Desalination. 309: 197–207.

Ghermandi, A., Messalem, R. (2009). "Solar-driven desalination with reverse osmosis: the state of the art. Desalination and Water Treatment. 7(1-3): 285-296.

Gocht, W., Sommerfeld A., Rautenbach R., Melin T., Eilers L., Neskakis A., Muhaidat A. (1998). "Decentralized desalination of brackish water by a directly coupled reverse-osmosis-photovoltaic-system - a pilot plant study in Jordan". Renewable Energy. 14(1-4): 287–292.

Goh A.T.C. (1995)."Back-propagation neural networks for modeling complex systems". Artif Intell Eng.9:143–51.

Goosen M., Mahmoudi H., Ghaffour N. (2010). "Water desalination using geothermal energy**".** Energies, 3:8, 1423-1442.

Gore D.W.(1982)."Gore-Tex membrane distillation". Proceedings of the 10thAnnualConvention of the Water Supply Improvement Association. Honolulu. USA.

Gude V.G. (2011)."Energy consumption and recovery in reverseosmosis". Desalination and Water Treatment. 36: 239-260.

Gude V.G, Nirmalakhandan N. (2010)."Sustainable desalination using solar energy". Energy conversion and Management. 51(11): 2245-2251.

Grubert A.E., Stillwell A.S., Webber M.E. (2014)."Where does solar-aided seawater desalination make sense? A method for identifying suitable sites". Desalination. 339: 10–17.

Hamani A. (2013). "Etude des performances du pilote d'électrodialyse dans la déminéralisation des eaux saumâtres". Mémoire de fin d'études. Ecole Nationale Supérieure de l'Hydraulique AbraouiAbdelah.

Hadjali Y.(2012). "Impact des stations de dessalement de l'Eau de mer sur le littoral cas de la Station Plage EL Hilel (Ain Temouchent)".Thèse master. Université Abou Belkaid.Tlemcen.

Hamadache M. (2014)."Modélisation en vue de la prédiction ou de la corrélation de l'activité toxicologique à partir de la structure moléculaire". Thèse de doctorat. Université de Médéa.

Hamed O.A., Hassan A.M., Al-Shail K., & Farooque M.A. (2009)."Performance analysis of a trihybrid NF/RO/MSF desalination plant". Desalination and Water Treatment. 1(1-3): 215-222.

Hagan, M.T., Demuth H.B., and Beale, M.H. (1996)."Neural network design". PWS Published Company. Boston. USA.

Hasnain S.M., & Alajlan S.A. (1998)."Coupling of PV-powered RO brackish water desalination plant with solar stills". Desalination. 116(1): 57-64.

Hassan A.M., Al-Sofi M.A.K., Al-Amoudi A.S., Jamaludin A.T.M., Farooque A.M., Rowaili A., Dalvi A.G.I., Kither N.M., Mustafa G.M., Al-Tisan I.A.R., (1998). "A new approach to membrane and thermal seawater desalination processes using nanofiltration membranes (Part 1)". Desalination, 118: 35–51.

Hassan A.M., et al. (2002). "Conversion and operation of the commercial umm lujj swro plant from a single swro desalination proces to the new dual nf-swro desalination process". IDA Conference. Manama Bahrain.https://www.researchgate.net/publication/237714403.

Hassan A.M., et al. (2000). "Simulation of the NF-SWRO Operation at Umm Lujj SWRO plant". TR 3807/APP 96008. June.

Herold D., & Neskakis A. (2001)."A small PV-driven reverse osmosis desalination plant on the island of Gran Canaria". Desalination, 137(1-3): 285-292.

Hilal N., Al-zoubi H., Mohammad A.W., Darwish N.A., (2005)."Nanofiltration of highly concentrated salt solutions up to seawater salinity". Desalination 184: 315–326.

Ho C.C., Zydney A.L. (2000)."A combined pore blockage and cake filtration model for protein fouling during microfiltration". Colloid Interf Sci J. 232:389-399.

Ho Y.S., McKay G.A. (1998)."Comparison of chemisorption kinetic models applied topollutant removal on various sorbents.Institut".Chemical Engineering Journal. 76B: 332-340.

Ho Y.S., McKay G. (1999). "Comparative sorption kinetic studies of dyes and aromatic compounds onto fly ash". Env Sci Healt Jpart A: Toxic /Hazardous. Subst Env Eng. A34:1179-1204.

Ho Y.S, McKay G. (2000)."The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat". Water Research. 34:735-742.

Huo J.H., Peng Z.G., Ye Z.B., Feng Q., Zheng Y., Zhang J., Liu X. (2018)."Investigation of synthesized polymer on the rheological and filtration performance of water based drilling fluid system". Journal of Petroleum Science and Engineering. 165: 655-663.

Intelligence Artificielle : http://intelligence-artificielle-robotique.weebly.com (Consulté le 22 juin 2019).

Iranmanesh F., Moradi A., Rafizadeh M., (2016)."Implementation of radial basic function networks for the prediction of RO membrane performances by using a complex transport model".Desalination and Water Treatment. 57:20307–20317

Iritani E., Nobuyuki K., Takenaka T., Yamashita Y. (2015)."Membrane pore blocking during4cake formation in constant pressure and constant flux dead-end microfiltration of verydilute colloids". Chemical Engineering Science Journal. 122: 465-473.

Jain S., Gupta S.K. (2004)."Analysis of modified surface force pore flow model withconcentration polarization and comparison with Spiegler-Kedem model in reverse osmosis systems". Journal of Membrane Science, 232 (1-2): 45-62.

Jambi F.I., Wie J.M. (1989)."The royal Commission Gas Turbine/HRSG/DesalinationCogeneration Plant". ASME COGEN-TURBO. 3rdInternational Symposium onTurbomachinery, Combined-Cycle and Cogeneration, American Society of Mechanical Engineer. New York. 275–280.

Jye L.W., Ismail A.F. (2016)."Nanofiltration membranes: Synthesis, characterization, and applications". 1st Edition. Crc Press.

Kalogirou S.A. (2013)."Solar energy engineerring : processes and systems ". Acadimic Press.

Kalogirou S.A.(2005)."Seawater desalination using renewable energy sources". Progress in Energy and Combustion Science.31: 242–281.

Kaya C., Sert G., Kabay N., Arda M., Yüksel M., Egemen Ö. (2015)."Pre-treatment with nanofiltration (NF) in seawater desalination—Preliminary integrated membrane tests in Urla, Turkey".Desalination. 369: 10–17.

Karagiannis I.C., Soldatos P.G. (2008)."Water desalination cost literature:review and assessment".Desalination. 223 : 448-456.

Kassmi K. (2007). "Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique". Revue des Energies Renouvelables.CDER. 10: 451-462.

Kedem O., Katchalsky A. (1963). "Permeability of composite membranes: 1–3. Trans". Faraday Soc. 59:163.

Khanzada N.K., Khan S.J., & Davies P.A. (2017)."Performance evaluation of reverse osmosis (RO) pre-treatment technologies for in-land brackish water treatment". Desalination. 406: 44–50.

Khawaji A.D., Wie J.M., and Khan T. (1997)."Operating experience of the royal commissionacid-dosed MSF seawater desalination plant".In: Proceedings of IDA World Congress on Desalination and Water Reuse, Madrid, Spain. 2: 3–19.

Khawaji A.D., Kutubkhanah I.K., Wie J.M. (2008). "Advances in seawater desalinationtechnologies". Desalination. 221: 47–69.

Khayet M., Cojocaru C., Essalhi M. (2011)."Artificial neural network modeling and response surface methodology of desalination by reverse osmosis".Journal of Membrane Science. 368: 202–214.

Klinowski J., Foley T., Meares P. (1974)."Differential conductance coefficients in a cation-exchange membrane". Proc R Soc, Lond A. 336.

Kong S., Aucamp J., Nigel J., Hooker T. (2010). "Studies on membrane sterile filtration of plasmid DNA using an automated multiwell technique". Memb Sci J. 353: 144-150.

Labouret A., Villoz M. (2006)."Energie solaire photovoltaïque". 3èmeEdition.

Lee D.S., Park J.M. (1999)."Neural network modelling for on-line estimation of nutrient dynamics in a sequentially-operated batch reactor". J Biotechnol. 75: 229-239.

Lee Y.G., Lee Y.S, Jeon J.J, Lee S., Yang D.R, Kim I.S, Kim J.H. (2009)."Artificial neural network model for optimizing operation of a seawater reverse osmosis desalination plant". Desalination, 247: 180–189.

Leparc J. (2010). "Dessalement : deux grandes technologies**"**, Présentation Veolia Environnement, Angers

Libotean D., Giralt J., Giralt F., Rallo R., Wolfe T., Cohen Y. (2009)."Neural network approach for modeling the performance of reverse osmosis membrane desalting". J. Membr. Sci. 326: 408–419.

Llenas L., Martı´nez-Llado X., Yaroshchuk A., Rovira M., DePablo J. (2011)."Nanofiltration as pretreatment for scale prevention in seawater reverse osmosis desalination".Desalination and Water Treatment. 36: 310–318.

Liu T.K., Sheu H.Y., Tseng C.N. (2013)."Environmental impact assessment of seawater desalination plant under the framework of integrated coastal management.". Desalination. 326: 10-18.

Liu W., Hui F., Lédion J., Xing-wu W. (2008). "The influence of metal ion on the scaling in the mineral water tests". Ionics, 14: 449–454.

Loupasis S., (2002). "Technical analysis of existing RES desalination schemes". (Commission of the European Communities Directorate-General for Energyand Transport, Altener Programme, Renewable Energy Driven DesalinationSystems – REDDES, Contract number 4.1030/Z/01-081/2001).

Ljung L., Glad T. (1994). "Modelling of dynamic systems". Publisher: Prentice Hall; 1Edition

Luck M., Landis M., Gassert F. (2015)."Aqueduct water stress projections: decadal projections of water supply and demand using CMIP5 GCMs".Technical Note. Washington, D.C.World Resources Institute.

Luciano L., Hamza A. B. (2018). "Deep learning with geodesic moments for 3D shape classification **"**. Pattern Recognition Letters, 105, 182-190.

Macedonio F., Curcio E., Drioli E., (2007)."Integrated membrane systems for seawater desalination: Energetic and exergetic analysis, economic evaluation, experimental study". Desalination. 203: 260–276.

Madani A. (1994)."Combined water purification and power of generating plant". U.S. Patent No 5, 346, 592.

Madaeni S.S., Shiri M., Kurdian A.R., (2015)."Modeling, optimization, and control of reverse osmosis water treatment in kazeroon power plant using neural network". Chem. Eng. Commun. 202: 6–14.

Mahmoudi H., Abdul-Wahab S.A., Goosen M.F.A., Sablani S.S., Perret J., Ouagued A. (2008). "Weather data and analysis of hybrid photovoltaic–wind power generation systems adapted to a seawater greenhouse desalination unit designed for arid coastal countries".Desalination. 222: 119–27.

Mahmoudi H., Ouagued A., Ghaffour N. (2009)."Capacity building strategies and policy for desalination using renewable energies in Algeria". Renewable and sustainable Energy Reviews. 13: 921–926.

Mahmoudi H., Spahis N., Goosen M.F., Sablani S., Abdul-wahab S.A., Ghaffour N., Drouiche N. (2009a). "Assessment of wind energy to power solar brackish water greenhouse desalination units: A case study from Algeria". Renewable Sustainable Energy Reviews. 13: 2149–2155.

Mahmoudi H., Spahis N., Goosen M.F., Ghaffour N., Drouiche N., Ouagued A. (2010)."Application of geothermal energy for heating and fresh water production in a brackish water greenhouse desalination unit: A case study from Algeria". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14: 512–517.

Mall I.D., Srivastava V.C., Agarwal N.K. (2006)."Removal of Orange-G and Methyl Violet dyes by adsorption onto bagasse fly ash-kinetic study and equilibrium isothermanalyses".Dyes. Pigments J. 69:210–223.

Malinov S., Sha W. (2003)."Software products for modelling and simulation in materials science". Comput Mater Sci. 28:179-198.

Maurel A. (2006). "Dessalement de l'eau de mer et des eaux de saumâtres : et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce".2ème Edition.

Mathioulakis E., Belessiotis V., & Delyannis E. (2007)."Desalination by using alternative energy: review and state-of-the-art". Desalination. 203: 346–365.

Mcculloch W.S., Pitts W. (1943)."A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity". Bull Math Biophys. 5:115

Meares P., Thain J.F., Dawson D.G. (1972)."Transport across ion-exchange resin membranes:the frictional model of transport". G. Eisenmann (Ed.). Membranes. 1, Dekker. New York, (Chapter 2).

Merrick J.H. (2010). "An assessment of the economic, regulatory and technical implications of large-scale solar power deployment". 2010. Thèse de doctorat. Massachusetts Institute of Technology.

M.E. Algérie (2018).https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie : consulté le 14/12/2018. Ministère de l'Energie.

Metaiche M. (2014). "Technologie membranaire". Faculté des sciences appliquées. Université de Bouira.

Mendret J. (2007). "Mise au point de caractérisation de membrane application à la caractérisation in situ d'un dépôt particulaire en ultrafiltration frontale en lien avec les performances du procédé". Thèse de doctorat. INSA Toulouse.

Méricq J.P. (2009). "Approche intégrée du dessalement d'eau de mer : Distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilités de couplage avec l'énergie solaire". Thèse de doctorat. Université de Toulouse.

Mohanty P., MuneerT., Kolhe M. (2016) ."Solar Photovoltaic System Applications". A Guidebook for Off-Grid Electrification".Springer.

Molinos-Senante M., Hernández-Sancho F., Mocholí-Arce M., Sala-Garrido R. (2015). "Productivity growth of wastewater treatment plants – accounting for environmental impacts: a Malmquist-Luenberger index approach". Urban Water J. 13 (5): 476–485.

Moradi A., Mojarradi V., Sarcheshmehpour M. (2013)."Prediction of RO membrane performances by use of artificial neural network and using the parameters of a complex mathematical model".Res. Chem. Intermed. 39: 3235–3249.

Morsli M.S. (2013). "Impacts des arrêts Techniques de l'usine de dessalement de l'eau de mer sur l'entreprise et l'environnement". Mémoire de Magister en Management, Université d'Oran.

M. R. E. (2018). "Note sur le dessalement en Algerie". Ministère des Ressources en Eau. Algérie.

Niemi H., Bulsari A., Palosaari S. (1995). "Simulation of membrane separation by neural networks". Journal of membrane separation. 102: 185-191.

Nicolini J.V., Borges C.P., Ferraz H.C., (2016). Selective rejection of ions and correlation with surface properties of nanofiltration membranes, Sep. Purif. Technol. 171, 238–247.

Negewo B.D. (2012). "Renewable energy desalination: an emerging solution to close the water gap in the middle east and north Africa". World Bank Publications.

ONU (2013). "La population mondiale devrait atteindre 9,6 milliards en 2050". http://www.adequations.org/spip.php?article985 consulté le 21/01/2019

ONU (2019). https://www.latribune.fr/ consulté le 21/01/2019

Othenio H., Awange J.(2016)."Energy resources in Africa; Distribution, opportunities and challenges". Edition Springer.

Oyoh T.D. (2016). "Desalination in water treatment and sustainability**"**. Thèse. Université Finlande

Paulson, D. (2015). "Nanofiltration: The up-and-coming membrane process**"**. Water Online. http://www.wateronline.com.consulté le 24/11/2018,

Pearce G.K. (2007)."The case study of UF/MF pretreatment to RO in seawater applications". Desalination 203: 286-295.

Peñate B., DelaFuente J.A., Barreto M. (2010)."Operation of the RO kinetic_energy recovery system: description and real experiences". Desalination. 252: 179-85.

Peñate B. (2011)."Energy optimization of existing SWRO (seawater reverse osmosis) plants with ERT (energy recovery turbines): Technical and thermo-economic assessment".Energy. 36: 613-626.

Qiblawey H., Banat F., & Al-Nasser Q. (2011)."Performance of reverse osmosis pilot plant powered by Photovoltaic in Jordan". Renewable energy.36(12): 3452-3460.

Rahman M.M., Lusk C., Guirguis M.J. (2011)."Energy recovery devices in seawater reverse osmosis desalination plants with emphasis on efficiency and economical analysis of isobaric versus centrifugal devices". Master Degree of Science. University of South Florida.

Rehman S., Ahmed M.A., Mohamed M.H., Al-Sulaiman F.A. (2017)."Feasibility study of the grid connected 10 MW installed capacity PV power plants in Saudi Arabia". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 80 : 319-329.

Remigy J. (2005)."Filtration membranaire (OI, NF, UF) présentation des membranes et modules". Technique de l'ingénieur. W4090.

Reddy V.K. & Ghaffour N. (2007)."Overview of the cost of desalinated water and costing methodologies". Desalination. 205: 340–353.

Rivals I., Personnaz L., Dreyfus G. (1995)."Modélisation, classification et commande par réseaux de neurones : principe fondamentaux, méthodologie de conception et illustrations industrielles". Technique et documentation. Lavoisier. Paris.

Richards B.S., Schafer I.A., **(2002).**"Design considerations for a solar-powered desalination system for remote communities in Australia". Desalination. 144: 193–199.

Sablani S., Goosena M.F.A. (2001). "Concentration polarization in ultrafiltration and reverse osmosis: a critical review". Desalination. 141: 269-289.

Sabokpa O., Zarei-Hanzaki A., Abedi H.R. Haghdadi N. (2012). "Artificial neural network modelling to predict the high temperature flow behaviour of an AZ81 magnesium alloy". Mater Des. 39: 390–396.

Sabry M., Nahas M., AlLehyani S. (2015)."Simulation of standalone portable steam generator Driven by a solar centrator".Energies.8(5): 3867-3881.

Sadhwani J.J,Veza J.M. (2001). "Cleaning tests for seawater reverse osmosis membranes". Desalination. 139: 177-182.

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

Salgado-Reyna A., Soto-Regalado E., Gómez-González R., Cerino-Córdova F.J, García-Reyes R.B., Garza-González M.T., Alcalá-Rodríguez M.M., (2015)."Artificial neural networks for modeling the reverse osmosis unit in a wastewater pilot treatment plant".Desalination and Water Treatment. 53: 1177–1187.

Salami E.S., Ehetshami M., Karimi-Jashni A., Salari M., Nikbakht Sheibani S., Ehteshami A., (2016)." A mathematical method and artificial neural network modeling to simulate osmosis membrane's performance". ModelingEarth Systems and Environment. 2: 207.

Sassi K.M.,Iqubal M. (2011)."Optimal design and operation of reverse osmosis desalination process with membrane fouling". Chemical Engineering Journal. 171: 582-593.
ScienceDirect (2019).www.sciencedirect.com.consulté le 01/10/2019.

Schneider B. (2005)."Selection, operation and control of a work exchanger energy recovery system based on the Singapore Project".Desalination. 184: 1177-1190.

Shemer H., Semat R. (2017)."Suistainable RO desalination–energy and environmental impact". Desalination 424: 10-16.
Shen J., Mkongo G., Abbt-Braun G., Ceppi S.L., Richards B.S., Schäfer A.I., (2015). "Renewable energy powered membrane technology: fluoride removal in a rural community in northern Tanzania".Sep. Purif. Technol. 149: 349–361.

Sia partners (2017). https://energie.sia-partners.com/ le 21/01/2019.

Singlande E. (2006). "Procèdes intègres couplant l'électrodialyse et le traitement biologique : influence de la composition ionique et application au traitement des effluents salins". Thèse de doctorat.Université Paul Sabatier.

Silva R.G, Cruz A.J.G, Hokka C.O., Giordano R.L.C, Giordano R.C. (2000)."Hybrid feed-forward neural network model for the cephalosporin C production process". Braz J Chem Eng. 17: 587.

Sommariva C. (2010)."Desalination and Advance Water Treatment Economics and Financing". p. 168. Hopkinton, USA: Balaban Publishers.

Sonalgaz (2019).www.sonalgaz.dz/fr.Consulté le 14/09/2019.

Song L., Hu J.Y., Ong S.L, Ng W.J., Elimelech M., and Wilf M. (2003)."Performance limitation of the full-scale reverse osmosis process". J Membr Sci. 214: 239–244.

Song Y., Gao X., Gao C., (2013)."Evaluation of scaling potential in a pilot-scale NF-SWRO integrated seawater desalination system" J. Memb. Sci. 443: 201–209.

Skiborowski M., Mhamdi A., Kraemer K., Marquardt W. (2012)."Model-based structural optimization of seawater desalination plants". Desalination. 292: 30-44.

Stover R.L. (2005)."Energy recovery device performance analysis". Water Middle East 2005. November 14.

Stover R.L, Martin J. (2009)."Titan PX-1200 Energy Recovery device - test results from the Inima Los Cabos". Mexico. seawater RO facility.Desalination and Water Treatment.3: 179–182.

Spiegler K.S, Kedem O. (1966)."Thermodynamics of hyperfiltration (reverse osmosis):criteria for efficient membrane".Desalination.1: 311-326.

Staverman A.J, (1952). "Trans. Faraday Soc". 48: 176.

Si-Moussa C., Hanini S., Derriche R., Bouhedda M., Bouzidi A. (2008)."Prediciton of high-pressure vapor liquid equilibrium of six binary systems, carbon dioxide with six esters, using an artificial neural network model". Brazilian Journal of Chemical Engineering. 25(1): 183-199.

Tran T.T., Smith A.D. (2017)."Evaluation of renewable energy technologies and their potential for technical integration and cost-effective use within the U.S. energy sector".Renew. Sust. Energ. Rev. 80 :1372–1388.

Tahraoui, D. (2010). "Qualité des eaux de mer après dessalement au niveau de la station de dessalement de la ville de Ténes (Chlef) et l'impact de dessalement sur l'environnement (milieu aquatique)". Communication, WATMED5, lille-France.

Tansakul C. (2009). "Procédés hybrides à membranes pour le Prétraitement d'eau de mer avant dessalement par osmose inverse", Thèse de doctorat. INSA. Toulouse.

Tambe S.S., Kulkami B.D., Deshpande P.B. (1996)."Elements of Artificial Neural Networks with Selected Applications in Chemical Engineering, and Chemical and Biological Sciences". Simulation and Advanced Controls, Ltd., Louisville, KY, USA.

Tien C., Ramarao B. (2011)."Revisiting the laws of filtration: an assessment of their use in identifying particle retention mechanisms in filtration". Memb Sci J. 383:17-25.

Thomson M., Infield D. (2003)."A photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries". Desalination, 153(1-3): 1-8.

Thomson M., Infield D. (2005)."Laboratory demonstration of a photovoltaic-powered seawater reverse-osmosis system without batteries". Desalination. 183(1-3): 105-111.

Tzen E., Morris R. (2003). " Renewable energy sources for desalination. Solar Energy. 75(5): 375-379.

Ullah I., Rasul M.G. (2019)."Recent developments in solar thermal desalination technologies: A review". Energies.12 : 119.

Vilain J. (1998)."La dualité des approches numérique et symbolique en contrôle avancé", Revue de l'électricité et de l'électronique.pp: 37-38.

Vishnuvardhan T.R., Sachin Ch., Saswati Ch. (2017). "Adsorption isotherm and kinetics analysis of hexavalent chromium and mercury on mustard oil cake". Env Eng Research. 22: 95-107.

Yu H., & Wilamowski B.M. (2011). "Levenberg-marquardt training". Industrial electronics handbook, 5(12), 1.

Wang X.L., Tsuru T., Nakao S., Kimura S. (1997)."The electrostatic and steric-hindrance model for the transport of charged solutes through nanofiltration membranes". Journal of Membrane Science. 135(1):19–32.

Wang Y., Wang S., Xu S., (2005)."Investigations on characteristics and efficiency of a positive displacement energy recovery unit". Desalination. 177: 179–185.

Wehebe N. (2008). "Dénitrification de l'eau potable en réacteur". Thèse doctorat. Université de Lyon.

Wen-jun L., Hui F., Lédion J., Xing-wu W. (2008). "The influence of metal ion on the scaling in the mineral water tests". Ionics, 14: 449–454.

Weisberg, S. 1985. Applied Linear Regression, 2eme edition.
Wolf P.H., Siverns S., Monti S. (2005)."UF membranes for RO desalination pretreatment". Desalination. 18(2): 293-300.

Wu B., Suwarno S.R., Tan H.S., Kim L.H., Hochstrasser F., Chong T.H., Burkhardt M., Pronk W., Fane A.G. (2017). "Gravity-driven microfiltration pretreatment for reverse osmosis (RO) seawater desalination: microbial community characterization and RO performance". Desalination 418, 1–8.

Zeman L.J., Zydney A.L. (2017) "Microfiltration and ultrafiltration: Principles and applications". CRC Press. 618.

Zhao Y., Taylor J.S., Chellam S. (2005). "Predicting RO/NF water quality by modified solution diffusion model and artificial neural networks", J. Membr. Sci., 263: 38–46.

Zhu A., Panagiotis D.C., Cohen Y. (2009). "Minimization of energy consumption for a two-pass membrane desalination: effect of energy recovery, membrane rejection and retentate recycling". Journal of membrane science 339 (1-2): 126-137.

Zerhouni F.Z, Zegrar M., Kaddour Brahim S., Boudghène Stambouli A., (2008)."Optimisation d'un système à énergie verte avec validation pratique". Revue des Energies Renouvelables. CDER. 11:41 – 49.