

Approche de modélisation pour l'étude de l'efficacité des stations de dessalement et des techniques de valorisation des saumures. Etudes des cas

Sellami Mohamed Habib¹, Amor Boughdiri² FatmaAbdel Malek¹

¹Département Hydraulique, Ecoles Supérieure des Ingénieurs de Medjez El Bab, TUNISIE,

² Ecole Supérieure Agronomique de Mateur Affiliation de l'auteur, Tunisie

Résumé

Face aux pénuries d'eau que nous enregistrons de nos jours dans plusieurs pays du monde, les expériences de valorisation des eaux saumâtres en général et des eaux de mer en particulier ont démarré depuis des décennies. Mais malgré l'effet positif sur le développement en général des quantités d'eau dessalées produites le problème de consommation énergétique des usines de dessalement et les impacts de leurs rejets sont des points que les intervenants dans ce secteur ne cessent de les signaler. Pour participer à l'apport des solutions à ces demandes nous allons dans ce travail présenter un approche de modélisation permettant d'étudier l'efficacité des stations de dessalement et des impacts de certaines techniques de valorisation des saumures. Une première validation de cet approche en se basant sur des études des cas sera présentées.

Mots-clés : Usine de dessalement, technique membranaire, énergie, cogénération, valorisation, saumure

A modeling approach to study the efficiency of desalination stations and of the brine valorization technologies. Cases studies

Abstract

To face the water penuries that we record our days in many countries in the world, the valorization experiences of salt water in general and the sea water in particular is in progress for many decays ago. But despite the positive impact of the amount of water produced on the development in general, the problem of high energy consumption by the desalination stations and the impacts of their rejets are points always signaled by all intervening in the sector.. To participate in responding that request we are in this work developing a modeling approach permitting to study the desalination station efficiency and to analyze the impacts of certain brine valorization technologies. Cases studies will be presented

Key Words: Desalination factory, membrane techniques, energy, cogeneration, valorization, brine

¹ Corresponding author: sellami.fac@gmail.com

INTRODUCTION

Face à une conjoncture de pénurie d'eau en croissante et qui menace plusieurs pays du monde y compris la Tunisie, l'orientation vers la valorisation des eaux non conventionnelles en générale et des eaux saumâtres en particulier est devenue une obligation.

Le dessalement des eaux saumâtre, alternative pour faire face au manque d'eau et d'améliorer la qualité des eaux distribuées, peut concerner tout les domaines : domestique, industriel et agricole. En Tunisie, l'usage des eaux dessalées comme eau potable est bien développé. En effet, plusieurs stations de dessalement existent dans plusieurs gouvernorats et d'autres en installation. Cependant l'expérience de l'usage des eaux dessalées pour des projets industriels est en développement et plusieurs appels pour la généralisée à augmenter. Dans ce cadre nous s'intéressons dans ce travail à la réhabilitation, conception et dimensionnement d'une station de dessalement des eaux de nappe pour asservir une usine de produit chimique. Une étude expérimentale pour l'analyse de l'efficacité avec la station afin de valider les calculs effectués a été réalisée.

OUTILS ET METHODES

Pour mener cette étude de diagnostic et d'analyse de l'efficacité de la station de dessalement des eaux de nappe pour le fonctionnement d'une usine en Tunisie nous avons procédé au développement d'un approche de modélisation pour faire des simulations, nous avons utilisé les logiciels WAVE et IMS Design et nous avons mené des expériences de mesure de l'efficacité de chaque technique de traitement dans la station.

Mise en équation pour le diagnostic et l'analyse de l'efficacité des techniques membranaires pour le dessalement

Etude de diagnostic des techniques membranaires

Le passage des eaux saumâtres à travers les filtres membranaires peut être sous l'effet d'une différence de charge ionique de soluté et c'est le cas du dialyse, sous l'effet d'un potentiel électrique et c'est le cas de l'électrodialyse, sous l'effet d'une différence de concentration et c'est le cas de l'osmose, sous l'effet d'une pression et c'est le cas de l'osmose inverse et sous l'effet de la vitesse de décharge et c'est le cas du microfiltre, ultrafiltre et nanofiltre, accelo-filtre, aéro-filtre...

Pour toutes les catégories des filtres rappelées ci-dessus nous pouvons donner les formules suivantes de dimensionnement :

$$V_{filt} = \frac{Q_i t d_i}{d_t}$$

V_{filt} : volume filtrant en m^3 , Q_i : Débit initial d'eau non conventionnelle dans l'influent en m^3 /jour, d_i : Densité des particules initiale dans l'influent en mg/l , t : Temps mis pour une séance de traitement, d_t : Densité des particules dans l'eau de l'effluent tolérable pour la réutilisation en mg/l

Une fois nous avons caractérisé les particules à éliminer et nous avons déterminé ainsi le volume occupé par une particule ou un nombre de particule nous pouvons proposer les formes et les dimensions des pores du filtre à utiliser qui doivent être inférieures à celles des particules polluantes à éliminer. Leur nombre dans le volume filtrant est donné par

$$N_{por} = \frac{V_{filt}}{V_{por}}$$

N_{por} : Nombre des pores dans le volume filtrant, V_{por} : Volume occupé par un pore, V_{filt} : Volume filtrant totale

Le nombre des unités à proposer pour accomplir la conception de notre filtre dépend des éléments existants sur le marché. Il suffit d'avoir la structure et la texture du filtre exigé (volumes des pores, nombre des pores par unité de longueur, par unité de surface, par unité de volume, forme des pores) et voire la surface ou le volume occupé par unité. Le nombre totale des unités est donné par

$$N_{uni-filt} = \frac{V_{filt}}{V_{uni-filt}}$$

$N_{uni-filt}$: Nombre des unités filtrantes, $V_{uni-filt}$: volume occupé par une unité filtrante, V_{filt} : Volume filtrant total

La relation entre les caractéristiques de structure de la membrane (nombre pores, diamètre pores, épaisseur membrane) le débit transitant à travers la membrane et la pression transmembranaire que nous pouvons utiliser dans la conception est la suivante :

$$Q_{mem} = \frac{N_{por} r_{por}^2}{8 E_{mem} \mu} P_{trans-mem}$$

E_{mem} : Epaisseur membrane, N_{por} : Nombre des pores, $P_{trans-mem}$: Pression transmembranaire, r_{por} : Rayon des pores , μ : Viscosité dynamique de l'eau salée

Nous définissons aussi la perméabilité hydraulique de la membrane, la résistance hydraulique de la membrane et la transmittivité de la membrane Nous écrivons :

$$L_{perm-hyd-mem} = \frac{Q_{mem}}{P_{trans-mem}}, R_{res-hyd-mem} = \frac{1}{L_{hyd-mem} \mu_{permeat}}, T_{trans-hyd-mem} = \frac{C_{permeat}}{C_{rétentat}} 100$$

C_p : concentration du perméat (g. L-1), $C_{rét}$: concentration du rétentat (g. L-1), $L_{perm-hyd-mem}$: Perméabilité hydraulique membrane, $R_{res-hyd-mem}$: Résistance hydraulique de la membrane, $T_{trans-hyd-mem}$: Transmittivité hydraulique de la membrane
Etude d'analyse de l'efficience des techniques membranaires

L'étude de l'efficacité d'un filtre consiste à suivre sa capacité d'éliminer les particules polluantes qui existent dans les eaux non conventionnelles dans le temps et en se référant à l'évolution des caractéristiques des eaux non conventionnelles tout en essayant d'établir des relations mathématiques. Ceci est toujours relatif puisqu'il dépend de l'exigence de l'application de valorisation des eaux non conventionnelles en qualité. Donc on doit suivre l'évolution des normes et construire un filtre qui répond aux niveaux de traitement fixées.

Nous pouvons donner les équations suivantes de l'efficience des filtres :

Formule du National Research Council of USA :

$$E = \frac{100}{1 + 0.44 \sqrt{Q_{dech}}}$$

E : efficience du filtre en terme de % des particules enlevée, Q_{dech} : Décharge hydraulique en $kg/m^3/jour$

E s'exprime aussi par

$$E = \frac{C_{inf} - C_{ef}}{C_{inf}} 100$$

C_{inf} : Concentration des particules initiale dans l'influent , C_{ef} : Concentration des particules finale dans l'effluent

La relation entre la concentration initiale des particules qui existent dans l'eau à traiter (influent) et la concentration finale des particules après passage à travers un filtre et qui restent dans l'eau traitée (effluent) peut être exprimée de plusieurs façons nous donnons les suivantes :

Equation de Velz :

$$\frac{C_{ef-z}}{C_{inf}} = \frac{1}{(R + 1) \exp\left(\frac{K_{20} \theta^{T-20} A_s Z}{(Q_{dech} (R + 1))^n}\right) - R}$$

C_{ef-z} : Concentration des particules enlevées dans l'effluent à la profondeur z du filtre en mg/l, C_{inf} : Concentration des particules à enlever initiale dans l'influent en mg/l, R : Taux de recyclage, K_{20} : Constante de vitesse à la température 20 °C, θ : Coefficient de correction de la température (1.035), A_s : Surface spécifique (m^2/m^3), Q_{dech} : Débit de décharge, Z : Epaisseur du filtre, n : Constante fonction de la température et de la surface spécifique de l'ordre de 0.67.

Outils logiciels de diagnostic et d'analyse de l'efficacité de la station

Pour mener un diagnostic de la conception de la station réalisée sur champ et analyser son efficacité nous avons procédé à l'usage de deux outils logiciels afin de comparer les résultats des logiciels à ceux donnés par le calcul direct avec les formulations proposées. Les logiciels sont :

- Logiciel WAVE qui intègre trois des technologies de pointe de l'industrie - ultrafiltration, osmose inverse et échange d'ions - dans un outil complet utilisant une interface commune. Il simplifie le processus de conception multi-technologie et contribue finalement à réduire le temps nécessaire à la conception de systèmes de traitement de l'eau
- IMS-Design est un logiciel de dimensionnement répondant aux exigences des professionnels et des experts du dessalement. et cela dans le but de sélectionner la membrane et la configuration la plus performante selon la qualité et la quantité de l'eau à traiter ,

Pour les deux logiciels nous devons introduire les caractéristiques de l'eau à traiter, les normes exigées par le projet qui va utiliser cette eau et les quantités d'eau à produire.

Analyse expérimentale de l'efficacité de la station de dessalement

La partie expérimentale consiste à mesurer les paramètres indicateurs de caractérisation des eaux à l'entrée et à la sortie de chaque composante de la station. De même une mesure des pression dans différents points particuliers de la station a été effectuée. En utilisant les formules de calcul de l'efficacité des systèmes nous avons pu estimer expérimentalement le rendement de chaque élément de la station et du rendement total.

RESULTATS ET INTERPRETATION

Caractéristiques des eaux saumâtres brutes

Les eaux saumâtres à traiter sont des eaux de nappe extraites via cinq forages de débit respectivement 180 m³/heure, 210 m³/heure, 220 m³/heure, 230 m³/heure et 240 m³/heure. La salinité est respectivement de 10 g/l, 9.6 g/l, 8.1 g/l, 10.16 g/l et 10.5 g/l.

Les résultats des analyses de la conductivité et de la turbidité des eaux salées de nappe sont dans les figures suivantes :

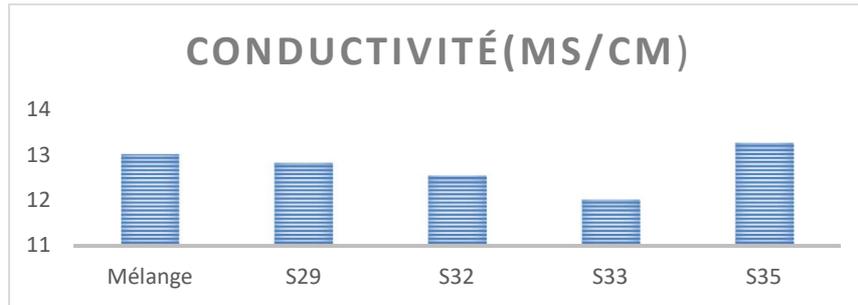


Figure 1. Variation de la conductivité des eaux salées

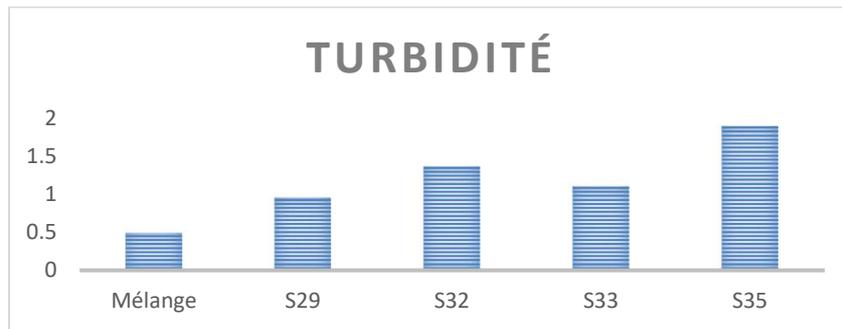


Figure 2. Variation de la turbidité des eaux brutes des nappes

La mesure de la conductivité électrique au niveau des forages montre une variation irrégulière d'un forage à un autre, Les valeurs sont comprises entre 1201 et 1325 μ s/cm. Les points de prélèvement ont une CE supérieure à 1000 donc on constate une minéralisation élevée (eau salines). Les teneurs de turbidité présente dans les eaux des forages de SIAPE Skhira sont généralement compris entre 0,5 et 1,9. La plupart des points de prélèvement ont une teneur de turbidité très faible..

Diagnostic de la conception proposée pour la station

Les résultats de l'étude du diagnostic de la conception actuelle de la station sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau 1. Résultats de dimensionnement du filtre à cartouches par ligne

Débit de filtration (m ³ /h)	220
Vitesse de filtration (m/h)	12
Surface de filtration (m ²)	13.75
Forme	Cylindrique
Nombre de cartouches (unités)	60

Les résultats de la conception optimale de la station est dans la figure suivante :

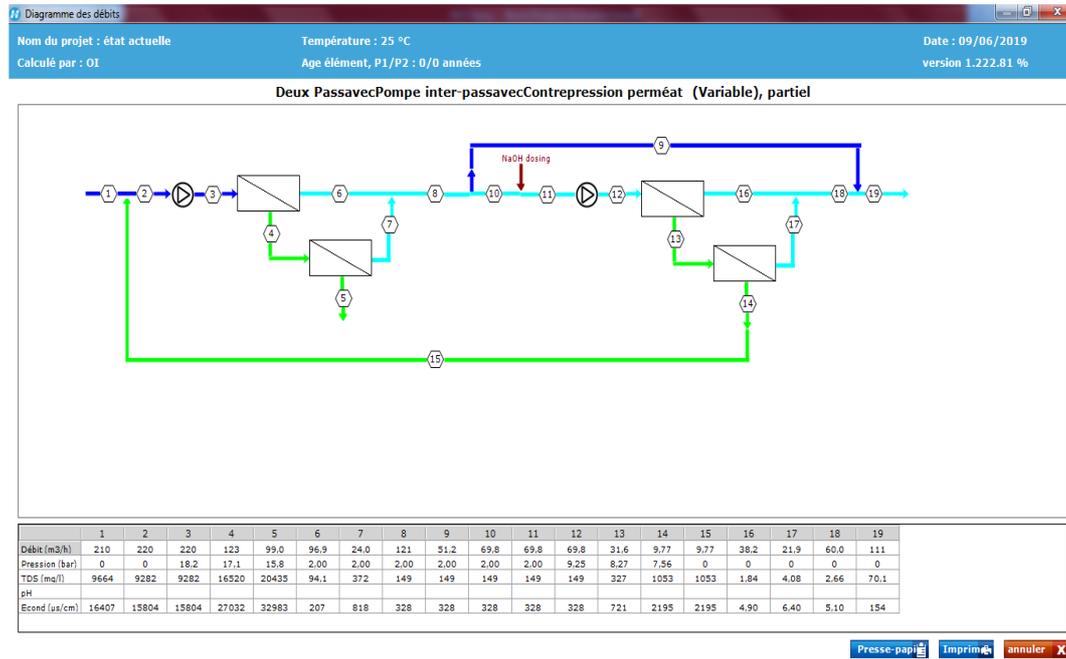


Figure 3. Schéma de la conception optimale des lignes d'osmose inverse A, B ou C

Analyse de l'efficacité de s lignes d'osmose inverse

Le tableau suivant récapitule les résultats de l'analyse de l'efficacité des unités d'osmose inverse de la station :

Tableau n° 2 Paramètres d'analyse des lignes A, B, C des unités d'osmose inverse

Ligne A, B, C	Entrée	Sortie
Débit (m ³ /h)	220	121 (eau osmosée)
Pression (bar)	26	18 (rejets)
Salinité totale d'eau brute (g/L)		10
Débit de rejets des saumures (m ³ /h)		99
Salinité totale des saumures (g/L)		22
Salinité entre l'entrée et les rejets de saumures		2.2
Rendement global (taux de conversion)		55%

Le suivi des paramètres de surveillance de la performance de train osmotique est dans les figures suivantes :

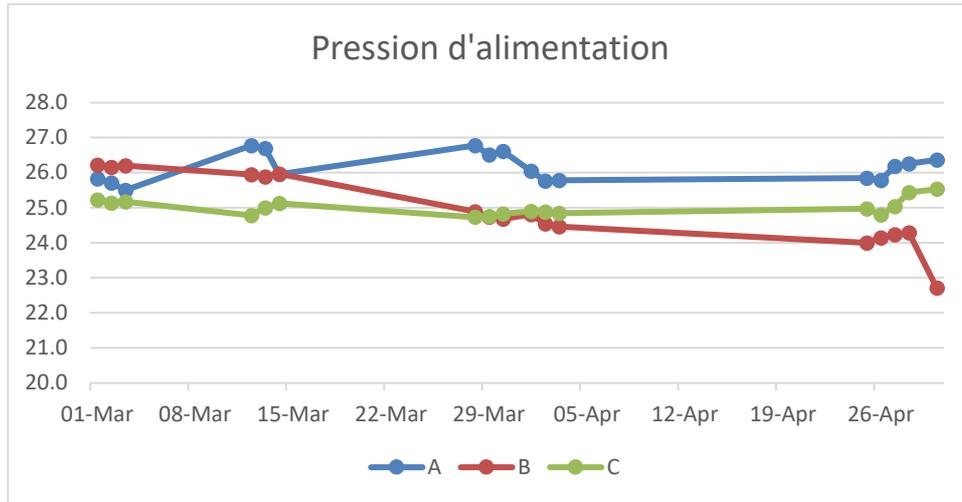


Figure 4 Evolution de la pression d'alimentation des lignes osmotiques

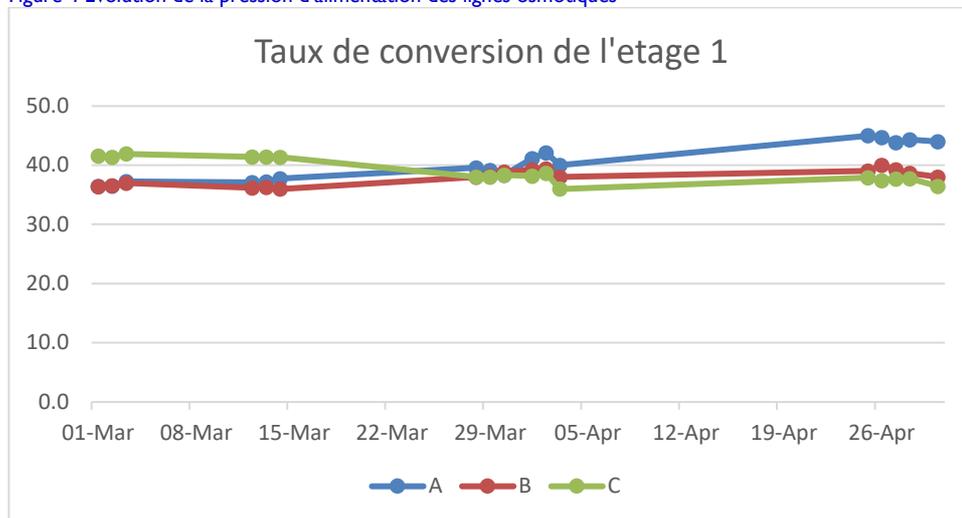


Figure 5. Evolution du taux de conversion

L'évolution de la pression de la ligne A oscille entre 25 et 27 bars, il y a dépassement de la valeur de conception 26 bars, cette élévation peut être due à un colmatage des membranes. L'évolution de la pression de la ligne B oscille entre 24 et 26 bars, donc les membranes est en état normal. L'évolution de la pression de la ligne C oscille entre 25 et 26 bars, donc les membranes est en état normal

L'évolution de taux de conversion moyen mensuel des lignes d'osmose inverse A, B, C pendant une période de 2 mois montre que ce taux est variable par rapport valeur de dimensionnement de la station pour les 2 étages (40% pour étage 1 et 25% pour étage 2).

CONCLUSION

Nous avons dans ce travail présenté la méthodologie générale à suivre pour la conception et le dimensionnement des différentes installations d'une station de dessalement de l'eau de nappe afin d'assurer le besoin en eau d'une usine. Nous avons essayé de donner aux formulations un aspect général de façon que nous pouvons les appliquer pour la phase de récupération des eaux non conventionnelles, leur adduction, leur traitement et leur distribution dans le projet qui est une usine dans ce cas. L'analyse de l'efficacité de la station conceptualisée et dimensionnée a été réalisée expérimentalement et par l'usage de deux logiciels différents. Les résultats trouvés sont comparables et très acceptables.

Référence :

- [1]Bechmann H 1999 "Modelling of wastewater systems" ATV Erhvervsforskerprojekt EF 623 ISSN 0909-3192, IMM-PHD-1999-69 ISBN 87-88306-01-1 Lyngby 1999
- [2]Block J.C., L.Schwartzbrod. 1984 « Analyse virologique des eaux ». Technique et documentation. Lavoisier. Paris (1984).
- [3]George Tchobanoglous 2002 "Waste water Engineering: Treatment and reuse" METCALF&EDDY, McGraw-Hill's. ISBN-10: 0070418780 | ISBN-13: 978-0070418783 | Edition: 4th
- [4]Maurel Alain, 2006« *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres* », 286 p, Ed. Tec&Doc Lavoisier , 2006
- [5] Sellami M.H. 2020 « Ingénierie de la valorisation des eaux non conventionnelles » Edition Universitaire Européenne, ISBN. 978-620-2-53308-9, 107 pages.
- [6]Tata Ducru F,2009 « Dessalement de l'eau de mer; bilan des dernières avancées technologiques ; bilan économique ; analyse critique », AgroParisTech – ENGREF Montpellier janvier 2009
- [7]Teodosiu, C., Gilca, A.-F., Barjoveanu, G., Fiore, S., 2018. Emerging pollutants removal through advanced drinking water treatment : A review on processes and environmental performances assessment. J. Clean. Prod. 197, 1210–1221. doi : 10.1016/j.jclepro.2018.06.247