

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : **Hydraulique**

Spécialité : **Hydraulique urbaine**

Par :

AYAD Abdellatif Farouk & BENS AOULA Mohammed Said

Etude des performances de fonctionnement d'une station de dessalement d'eau de mer : cas de la SDEM de Honaine

Soutenu publiquement, le 04 / 06 / 2019, devant le jury composé de :

M HABI M.	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
M CHIBOUB A.	Professeur	Univ. Tlemcen	Examinateur
M BESSEDIK M.	Maître-conférence B	Univ. Tlemcen	Examinateur
M BOUMEDIENE M.	Maître-conférence B	Univ. Tlemcen	Encadreur
M BEDDIAF A.	Ingénieur	SDEM Honaine	Co-encadreur

Année Universitaire 2018-2019

Dédicace

Dédicace

A nos chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de nos études,

A nos chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A nos chers frères pour leur appui et leur encouragement,

A nos familles pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

A toute l'équipe universitaire y compris nos enseignants depuis la première année,

A tous mes amis en particulier : B. Abderrahim, R. Habib, T. Sidi Mohamed,

H. Ali, B. Amine, Z. Chakib, M. Hakim, T. Sid Ahmed, B. Salah,

K. Riza, M. Khaled,

Mme B. Nadia, T. Feriel, M. Aicha, B. Nassima, B. Ahlem, M. Ikram, K. Yasmine,
Z. Zahra, M. Hadjer, T. Ghizlene, A. Imene, B. Nor, B. Imene,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

REMERCIEMENT

Au nom d'Allah le Tout Clément le Tout Miséricordieux et que sa prière et son salut soient sur son Prophète Mohammed et alliés. Louanges à Dieu en tout temps pour sa bénédiction.

Dans un premier temps, nous remercions nos chers parents qui nous ont soutenus depuis les premiers jours de nos vies et pour leurs encouragements constants.

*Nous remercions aussi **Mr. HABI MOHAMMED**, qui a bien voulu nous honorer de sa présence en présidant le jury.*

*J'adresse mes sincères remerciements et profonde reconnaissance à **Mr. CHIBOUB FELLAH ABDELGHANI** et **Mr. BESSEDIK MADANI** pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce mémoire en acceptant de l'examiner. Notre plus grand respect et nos sincères remerciements vont à nos illustres encadreurs pour le temps et la patience, **Mr. BOUMEDIENE MAAMAR** et **Mr. BEDDIAF ABDELHALIM**, ainsi qu'à l'ensemble du personnel de l'université Abou-Bakr BELKAID de Tlemcen, en particulier nos professeurs, afin qu'ils puissent trouver ici l'expression de notre considération et le témoignage de notre profonde reconnaissance pour le temps, la patience qu'ils ont mis à notre disposition et les judicieux conseils qu'ils nous ont prodigués tout le long de ce travail et de notre parcours universitaire.*

Nous remercions toute l'équipe de dessalement de Honaine pour nous avoir donnés l'occasion extraordinaire de réaliser notre travail sur le terrain.

Et enfin, nous aimerions exprimer notre gratitude à tous nos amis, camarades ainsi qu'à toute personne qui nous a apporté le soutien moral et intellectuel tout au long de ce travail.

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier expérimentalement les performances de fonctionnement de la station de dessalement d'eau de mer de Honaine située au niveau de la Wilaya de Tlemcen à travers une série de mesures effectuées sur des paramètres hydrauliques et physico-chimiques du process par un suivi de la qualité de l'eau dessalée (ou produite). Les expérimentations sont réalisées sur une période de 41 jours allant de la mi-mars à la fin Avril 2019. Les résultats obtenus ont montré que les paramètres hydrauliques étudiés sont en accord avec les objectifs fixés par la station : Taux de conversion moyen de 45 %, Taux de rejet d'environ 99 %, indice de colmatage $SDI < 2$, un débit spécifique Q_{sp} autour de 13 l/h.m^2 et une pression de refoulement de la pompe HP < 70 bars. Les résultats obtenus sur les paramètres physico-chimiques de l'eau dessalée sont conformes aux normes de l'OMS ainsi qu'aux normes Algériennes : un pH compris entre 8,1 et 8,4, une dureté $< 70 \text{ mg/l}$ de CaCO_3 et une concentration en TDS oscillant entre 350 et 480 mg/l.

Abstract

The objective of this work is to study experimentally the operating performance of Honaine seawater desalination plant located at the Wilaya of Tlemcen through a series of measurements carried out on hydraulic and physical-chemical process parameters by monitoring the quality of the desalinated (or produced) water. The experiment was conducted over a 41-day period from mid-March to the end of April 2019. The results obtained showed that the hydraulic parameters studied are in good agreement with the objectives set by the station: average conversion rate of 45%, rejection rate of about 99%, clogging index $SDI < 2$, a specific flow Q_{sp} around 13 l/h.m^2 and a repression pressure of the HP pump < 70 bar. The results obtained on the physico-chemical parameters of desalinated water comply with OMS standards and Algerian standards: pH between 8,1 and 8,4, a hardness $< 70 \text{ mg/l}$ of CaCO_3 and a TDS concentration between 350 and 480 mg/l.

الخلاصة

الهدف من هذا العمل هو دراسة مخبرية للأداء التشغيلي لمحطة تحلية مياه البحر في هنين الواقعة في ولاية تلمسان من خلال سلسلة من القياسات التي أجريت على المؤشرات الهيدروليكية والفيزيائية-الكيميائية للعملية من خلال مراقبة جودة المياه المحلاة (أو المنتجة). تم إجراء التجربة على مدار 41 يوماً من منتصف شهر مارس إلى نهاية أبريل 2019. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن المؤشرات الهيدروليكية التي تمت دراستها تتفق جيداً مع الأهداف التي حددتها المحطة: معدل تحويل 45 % ، ومعدل رفض حوالي 99 % ، ومؤشر انسداد $SDI < 2$ ، ومعدل تدفق معين Q_{sp} حوالي 13 لتر / ساعة / م^2 وضغط تصريف المضخة $HP < 70 \text{ bar}$. تتوافق النتائج التي تم الحصول عليها مع المؤشرات الفيزيائية والكيميائية للمياه المحلاة المحددة من طرف منظمة الصحة العالمية والمعايير الجزائرية، درجة الحموضة بين 8,1 و 8,4 والصلابة أقل من 70 ملغ / لتر من CaCO_3 و تركيز TDS يتأرجح بين 350 و 480 ملغم / لتر.

Table des Matières

<i>Table des Matières</i>	<i>i</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>ii</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>vi</i>
<i>Liste des Abréviations</i>	<i>vii</i>
<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>

Chapitre I : Généralités sur le dessalement de l'eau et normes de potabilité

I.1. Introduction	4
I.2. Caractéristiques des eaux de mer et des eaux saumâtres	4
I.2.1. Les eaux de mer	4
I.2.2. Les eaux saumâtres	5
I.3. Le dessalement de l'eau dans le monde et en Algérie.....	6
I.3.1. Définition du dessalement de l'eau de mer	6
I.3.2. Le dessalement dans le monde	6
I.3.3. Le dessalement de l'eau en Algérie :.....	8
I.3.3.1. Les stations de dessalement en Algérie :	9
I.3.3.2. Stations monoblocs :.....	9
I.4. Impacts de rejets de dessalement	10
I.4.1. La saumure	10
I.5. Normes de potabilité de l'eau.....	11

Tables des matières

I.5.1. Paramètres organoleptiques	12
I.5.1.A. La couleur	12
I.5.1.B. Goûts et odeurs	12
I.5.2. Paramètres physicochimiques	12
I.5.2.1. La turbidité.....	12
I.5.2.2. Potentiel d'hydrogène « pH »	12
I.5.2.3. La température	12
I.5.2.4. Matières en suspension	13
I.5.2.5. Matières organiques dissoutes	13
I.5.2.6. Conductivité électrique	13
I.5.2.7. La dureté totale de l'eau.....	14
I.5.2.8. L'alcalinité	14
I.5.2.9. Cations et anions	14
I.5.2.10. Pollution des eaux par les métaux lourds.....	16
I.5.3. Paramètres microbiologiques	16
I.6. Conclusion.....	17

Chapitre II : Procédés de dessalement de l'eau

II.1. Introduction.....	19
II.2. Structure générale d'une installation de dessalement :.....	19
II.2.1. La prise d'eau de mer :	19
II.2.2. Le poste de pompage.....	20
II.2.3. Le poste de prétraitement	20
II.2.4. Le Prétraitement par les procédés membranaires.....	20
II.2.5. Le Poste de traitement	21
II.2.5.a. Les traitements de neutralisation ou de reminéralisation des eaux.....	21
II.2.5.b. La décarbonatation	21
II.2.5.c. La désinfection.....	21
II.2.5.d. L'aération.....	22

Tables des matières

II.3. Les procédés de dessalement	22
II.3.1. Les procédés de distillation	22
II.3.1.1. Distillation à simple effet	22
II.3.1.2. Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effet distillation MED)	23
II.3.1.3. Le procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation)	23
II.3.1.4. La distillation solaire	25
II.4. Dessalement par électrodialyse.....	26
II.4.1. Définition	26
II.4.2. Principe de fonctionnement.....	26
II.4.3. Les membranes d'électrodialyse	27
II.4.4. Avantages et inconvénients.....	27
II.5. Dessalement membranaire (Osmose Inverse).....	27
II.5.1. L'Osmose inverse (OI).....	28
II.5.2. Schéma général d'une installation d'osmose inverse	29
II.5.3. Modules d'osmose inverse.....	29
II.5.3.1. Modules plans.....	30
II.5.3.2. Modules spiraux	30
II.5.3.3. Modules tubulaires	31
II.5.3.4. Modules fibres creuses	32
II.5.4. Coût d'investissement et d'exploitation.....	33
II.5.5. Les Avantages et Les inconvénients de l'osmose inverse.....	34
II.5.5.a. Avantages.....	34
II.5.5.b. Inconvénients.....	34
II.6. Conclusion	35

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

Tables des matières

III.1. Situation géographique.....	37
III.2. Présentation du promoteur de projet.....	38
III.3. Structure du projet.....	39
III.4. Installations principales :.....	40
III.5. Description du process utilisés dans le traitement des eaux.....	41
III.5.1. Pompage de l'eau de mer.....	41
III.5.2. Le Prétraitement.....	42
III.5.2.1. Le pré-traitement physico-chimique.....	42
A- Filtration à sable et charbon.....	42
La première phase est constituée de 48 filtres contenant chacun :.....	43
La deuxième phase est constituée de 32 filtres contenant :.....	43
B- Filtration à cartouches.....	44
Chloration.....	45
Coagulation-Floculation.....	45
Dosage de dioxyde de carbone.....	45
Dosage de bisulfite de sodium.....	45
Dosage d'inhibiteur « anti-scalant ».....	45
Dosage d'hydroxyde de sodium.....	45
III.5.3. L'étape d'osmose inverse.....	45
III.5.3.A. Le châssis à membrane.....	46
III.5.3.B. La pompe à haute pression.....	48
III.5.3.C. La pompe de recirculation.....	48
III.5.3.D. Le système de récupération de pression (ERIS).....	49
III.5.4. Le Post-traitement.....	50
a) Reminéralisation de l'eau dessalée :.....	50
b) Réservoir d'eau traitée :.....	50
III.6. Caractéristiques de l'eau traitée :.....	51
III.7. Equipements auxiliaires de la station sont :.....	51

Tables des matières

III.8. Traitement des rejets liquides :.....	51
Eaux résiduelles.....	51
Solution de nettoyage chimique	51
La saumure	52
Saumure de nettoyage des filtres	52
III.9. Institut de formation :	52

Chapitre IV : Matériel et méthodes

IV.1. Analyses physico-chimiques des eaux traitées.....	55
IV.1.1. Prélèvement et échantillonnage	55
IV.1.1.1. Sites de prélèvements.....	55
IV.1.1.2. Mode de prélèvement.....	55
IV.1.3. Paramètres physicochimiques :	56
IV.1.3.1. Mesure de la Température.....	56
IV.1.3.2. Mesure du pH.....	57
IV.1.3.3. Mesure de la Turbidité :	59
IV.1.3.4. Mesure de la conductivité	60
IV.1.3.5. Mesure de l'Alcalinité.....	61
IV.1.3.5.1. Titre alcalimétrique simple :	61
IV.1.3.5.2. Titre alcalimétrique complet :	62
IV.1.3.6. Mesure de la Dureté Total (TH) :	64
IV.1.3.7. Mesure de calcium (Ca^{2+}) :	66
IV.1.3.8. Mesure de Magnésium (Mg^{2+}) :	68
IV.1.3.9. Mesure du chlore Cl^- :	68
IV.1.3.10. Mesure des solides dissous totaux (TDS) :	70
IV.1.3.11. Mesure des matières en suspension (MES)	71
IV.1.3.12. Mesure de l'indice de colmatage (SDI)	73
IV.2. Paramètres hydrauliques.....	74

IV.2.1. Sites de contrôle.....75

Chapitre V : Résultats et interprétations

V.1. Introduction 77

V.2. Performances de fonctionnement hydraulique 77

 V.2.1. Taux de conversion totale de la station..... 77

 V.2.2. Taux de rejet total de la station 78

 V.2.3. L'indice de colmatage (SDI)..... 79

 V.2.4. Le débit spécifique 80

 V.2.5. Taux de conversion du rack N°05..... 81

 V.2.6. Le débit du perméat produit par le rack N°5 : 81

 V.2.7. Variation du débit spécifique en fonction de la pression :..... 82

 V.2.8. Pression de la pompe HP et pression de sortie du concentrat..... 83

 V.2.9. Pression d'entrée et de sortie de la pompe booster 84

 V.2.10. Pression de l'eau perméat et de l'eau concentrat 85

V.3. Performances de traitement et qualité de l'eau..... 86

 V.3.1. La température : 86

 V.3.2. Le pH 86

 V.3.3. La conductivité..... 87

 V.3.4. Le TDS..... 89

 V.3.5. Matières en suspension (MES) 90

 V.3.6. Dureté..... 91

 V.3.7. L'alcalinité totale 92

 V.3.8. L'indice de Langelier 93

Conclusion générale 96

Tables des matières

BIBLIOGRAPHIE	99
WEBOGRAPHIE.....	103
Annexe.....	106

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur le dessalement de l'eau et normes de potabilité

Figure I. 1 : Le dessalement à travers la méditerranée	7
Figure I. 2 : Capacités de dessalement dans le monde	7

Chapitre II : Procédés de dessalement de l'eau

Figure II. 1 : Diagramme de processus de dessalement de l'eau de mer	19
Figure II. 2 : Distillateur simple effet	22
Figure II. 3 : Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED)	23
Figure II. 4 : Distillateur par détente successive	24
Figure II. 5 : Distillateur solaire à effet de serre	25
Figure II. 6 : Principe de dessalement par l'électrodialyse	26
Figure II. 7 : Principe de l'osmose inverse	28
Figure II. 8 : Schéma de principe d'une unité d'osmose inverse	29
Figure II. 9 : Modules spirales	31
Figure II. 10 : Modules tubulaires	32
Figure II. 11 : Modules fibre creuses	33

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

Figure III. 1 : Limites administratives de la Commune [46].	37
Figure III. 2 : Vue satellitaire du site de la station de dessalement.	38
Figure III. 3 : Tour de captage d'eau en cours de construction [46].	42
Figure III. 4 : Filtres à sable et anthracite.	43
Figure III. 5 : Filtres à cartouches.	44
Figure III. 6 : Photo de l'étape d'osmose inverse (SDEM-Honaine).	46

Liste des Figures

Figure III. 7 : Un châssis à membrane (châssis n°05).	47
Figure III. 8 : La membrane spirale de l'osmose inverse [48].	47
Figure III. 9 : Photo d'une pompe à haute pression.	48
Figure III. 10 : Pompe booster.	48
Figure III. 11 : Schéma de la récupération d'énergie [49].	49
Figure III. 12 : Les ERIS (système de récupération de pression).	49
Figure III. 13 : Photo du réservoir de stockage de l'eau produite.	50
Figure III. 14 : la saumure au niveau de SDEM HONAINE.	52

Chapitre IV : Matériel et méthodes

Figure IV. 1 : Thermomètre.....	56
Figure IV. 2 : Les solutions tampons de pH.	57
Figure IV. 3 : pH mètre (PH 25) au niveau de laboratoire de station de Honaine.	58
Figure IV. 4 : Turbidimètre.	59
Figure IV. 5 : Conductimètre.....	60
Figure IV. 6 : Les solutions tampons de conductivité.	61
Figure IV. 7 : L'essai de titrage de l'alcalinité.	63
Figure IV. 8 : Titrage de la dureté.	65
Figure IV. 9 : L'essai de Titrage de Ca ⁺⁺	67
Figure IV. 10 : Mesure de chlore.....	69
Figure IV. 11 : Chloromètre.	70
Figure IV. 12 : L'étuve.	71
Figure IV. 13 : Les membrane filtrantes.	71
Figure IV. 14 : Balance numérique.	72
Figure IV. 15 : le rack N0 05.....	74
Figure IV. 16 : schéma de contrôle du rack n°05.	75

Chapitre V : Résultats et interprétations

Figure V. 1 : Variation journalière du débit d'alimentation, débit produit et du taux de conversion dans la station (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).....	78
Figure V. 2 : Variation journalière de taux de rejet total de la SDEM (Période entre le 20 Mars	

Liste des Figures

et le 30 Avril 2019).....	79
Figure V. 3 : Variation journalière de l'indice de colmatage au niveau de la station (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).....	79
Figure V. 4 : Variation journalière du débit spécifique de rack N°05 de la SDEM Honaine (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019)	80
Figure V. 5 : Variation journalière de taux de conversion de rack N°05 de la SDEM Honaine (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019)	81
Figure V. 6 : Variation journalière du débit de perméat produit par le rack N° 05 (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).....	81
Figure V. 7 : Variation de débit spécifique journalier en fonction de la pression (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).....	82
Figure V. 8 : Variation des pressions de la pompe haute pression (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).	83
Figure V. 9 : Variation journalière de la différence entre les pressions de la pompe HP (Période du 20 Mars au 30 Avril 2019).....	83
Figure V. 10 : Variation journalière des pressions de la pompe booster (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019)	84
Figure V. 11 : Variation de la pression de l'eau perméat et de l'eau concentrat (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).....	85
Figure V. 12 : Variation journalière de la température d'eau de mer, d'eau produite et d'eau dans le rack n°05 (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019)	86
Figure V. 13 : Variation journalière du pH d'eau de mer, du perméat et de l'eau produite (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).....	87
Figure V. 14 : Variation journalière de la conductivité d'eau de mer et d'eau de rejet (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).....	88
Figure V. 15 : Variation journalière de la conductivité d'eau produite et d'eau de perméat (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).....	88
Figure V. 16 : Variation journalière des concentrations de TDS à l'eau de mer au niveau de la station (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).	89
Figure V. 17 : Variation journalière des concentrations de TDS dans l'eau produite au niveau de la station (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).....	90
Figure V. 18 : Variation journalière des concentrations de MES d'eau de mer alimentant la SDEM de Honaine (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).....	91
Figure V. 19 : Variation journalière de la concentration de la dureté au niveau de la station	

Liste des Figures

(Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).....	91
Figure V. 20 : Variation journalière des concentrations de Ca ²⁺ et de Mg ²⁺ de l'eau traitée par la station (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).	92
Figure V. 21 : Variation journalière des concentrations de l'alcalinité totale de l'eau produite au niveau de la station (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).	93
Figure V. 22 : Variation journalière de de l'indice de Langelier (LSI) au niveau de la SDEM Honaine (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).	94
Figure V. 23 : Variation journalière de la concentration de Cl ₂ au réservoir d'eau traitée (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).....	94

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur le dessalement de l'eau et normes de potabilité

Tableau I. 1 : Stations de dessalement en Algérie réalisées entre 2005 -2014.....	9
Tableau I. 2 : Stations monoblocs de dessalement réalisé en Algérie.	10
Tableau I. 3 : Caractéristiques principales de l'eau de mer et saumure	11
Tableau I. 4 : Classification des eaux selon la conductivité	13
Tableau I. 5 : Principales maladies hydrique et agents microbiologiques responsables	16

Chapitre II : Procédés de dessalement de l'eau

Tableau II. 1 : Avantages et inconvénients des modules	30
Tableau II. 2 : Avantages et inconvénients des modules spirales	31
Tableau II. 3 : Avantages et inconvénients des modules tubulaires	32
Tableau II. 4 : Avantages et inconvénients des modules fibres creuses	33

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

Tableau III. 1: Caractéristiques techniques de Station de Dessalement d'eau de mer de Honaine	40
Tableau III. 2 : Caractéristiques de l'eau de mer à traiter.	41
Tableau III. 3 : Valeurs garanties pour l'eau de mer traitée par la SDEM de Honaine	51

Liste des Abréviations

ADE : Algérienne des eaux.

BEI ERE : Bureau d'Etudes Industrielles Energies Renouvelables et Environnement

C° : Degré Celsius.

Cp : concentration de TDS de l'eau produite (mg/l)

C₀ : concentration de TDS de l'eau de mer (mg/l)

DPD : Diéthyl-Phénylène-Diamine.

ED : Electrodialyse.

EDTA : Acide éthylène diamine tétraacétique

f° : Degrés français.

HP : Haute pression.

i : Nombre d'ion associé.

MED : Multi-Effet-Distillation (distillation à effet multiple).

MES : Matière en suspension en (mg/l).

MF : Microfiltration.

MFI: Modified Fouling Index.

MFI-UF: Modified Fouling Index by using Ultrafiltration membrane.

MSF : Multi-Stage-Flash distillation (distillation à détente étagées).

N.B : Note bien.

NF : Nanofiltration.

NTU : Nephelométric Turbidity Unit.

OI : Osmose Inverse.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

ONU : Organisation des nations unies.

P : Pression (bar).

pH : Potentiel d'Hydrogène.

Ppm : Partie par million.

Q₀ : Débit d'alimentation (m³/j).

Q_A : Débit d'alimentation (m³/j).

Q_c : Débit de concentrât (m³/j).

Q_{sp} : Débit spécifique (l/h.m²).

Liste des Abréviations

Q_p : Débit de perméat (m³/j).

R : Constante des gaz parfaits (0,081 L.atm/K/mol).

RS : Rejet de sels.

SDEM : station de dessalement d'eau de mer.

SDI : Silt Density Index.

T : Température (°C).

TA : Titre alcalimétrique.

TAC : Titre alcalimétrique complet (mg/l) en CaCO₃.

TDS : Total de Sel Dissous (mg/l).

TH : Titre hydrométrique (mg/l) en CaCO₃

UF : Ultrafiltration.

W : Pression osmotique (bar).

Y : Taux de conversion (%).

Introduction générale

L'eau est une source de vie pour tous les êtres vivants. Elle est une substance indispensable pour la survie de l'humanité et de son développement. Sur la planète terre, il y'a suffisamment d'eau. Cependant, les eaux douces ne représentent que 2,5 % du volume global de l'eau. 69.5 % de cette eau douce est située dans les calottes glaciaires alors que les 30.1 % restants est constituée par les nappes aquifères souterraines, 0,27 % sous forme d'eau dans les lacs et rivières et 0,13 % sous une autre forme (atmosphère, humidité dans le sol, marais, etc.) [1].

Dans les pays où les ressources en eau sont trop limitées et pour faire face à la pénurie d'eau et pallier aux problèmes des besoins en eau potable, l'homme a procédé à la recherche de techniques pour obtenir de l'eau douce à partir de l'eau de mer. L'eau de mer représente une richesse quasiment inépuisable dans la mesure où elle sera dessalée. Elle contient entre 80 à 100 fois plus de sel que la limite fixée par l'OMS pour pouvoir être consommée (soit 500 mg/l). En effet, le dessalement de l'eau de mer est devenu de plus en plus appliqué dans de nombreux pays du monde. Il représente un moyen industriel fiable de production d'eau douce.

L'Algérie a lancé ces dernières années un programme très ambitieux en matière de dessalement de l'eau à travers l'installation de stations de dessalement. On compte 14 stations de grande capacité qui sont opérationnelles réparties au long du littoral Algérien d'une capacité globale d'environ 2408000 m³/j [A]. Parmi ces stations figurent la station de dessalement de Honaine située à Tlemcen dans l'ouest de l'Algérie.

Le dessalement de l'eau est une opération très couteuse mais souvent délicate à laquelle les industriels doivent accorder beaucoup d'attention. Les membranes utilisées en osmose inverse sont très sensibles au colmatage et peuvent être à l'origine de dysfonctionnement du process ou parfois à des arrêts de la station.

L'objectif de notre travail est d'étudier les performances de fonctionnement de la station de dessalement d'eau de mer de Honaine située dans la Wilaya de Tlemcen. En utilisant la technique d'osmose inverse comme méthode de dessalement, cette structure fournit de l'eau potable pour le chef-lieu de wilaya ainsi que pour certaines localités de la zone côtière de la région.

Ainsi, on a divisé notre travail en deux parties : une partie théorique et une autre expérimentale présentant les chapitres suivants :

Introduction Générale

- Le premier chapitre aborde des généralités sur le dessalement de l'eau et les normes de potabilité ;

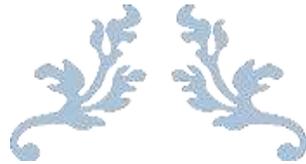
- Le deuxième chapitre donne les différents procédés utilisés pour le dessalement de l'eau ainsi que la situation de cette technique en Algérie et dans le monde.

- Une présentation et description de la station de dessalement de Honaine est présentée dans le troisième chapitre ;

- Le quatrième chapitre présente, avec plus de détails, le matériel ainsi que les méthodes d'analyse des paramètres (physico-chimiques et hydrauliques) étudiés.

- Le cinquième chapitre, quant à lui, est réservé aux résultats expérimentaux trouvés ainsi qu'à leurs interprétations.

Au terme de cette étude, une conclusion générale est donnée.



PARTIE 01

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE





Chapitre I

Généralités sur le dessalement de l'eau et normes de potabilité

Chapitre I : Généralités sur le dessalement de l'eau et normes de potabilité

I.1. Introduction

Le dessalement consiste à séparer l'eau et les sels à partir d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau saumâtre d'origine continentale et dans l'objectif est d'obtenir une eau potable douce qui ne représente que 3 % de toute l'eau qui existe sur la planète Terre [2].

En effet, les eaux de mer sont la plus grande richesse et qui est presque inépuisable ce qui permet de développer plusieurs techniques pour les dessaler.

I.2. Caractéristiques des eaux de mer et des eaux saumâtres

I.2.1. Les eaux de mer

Origine :

Edmond Halley fut le premier à établir des théories scientifiques sur les origines de l'eau de mer en 1715, proposant que le sel et d'autres minéraux soient emportés dans la mer par les rivières des continents. Ceux-ci provenaient du lessivage continu des minéraux sur le sol par les pluies. Une fois dans l'océan, ces sels se concentrent de plus en plus à travers le cycle hydrologique. Halley a également réalisé que les lacs qui n'avaient pas de débouché vers la mer (comme la mer Morte ou la mer Caspienne) avaient des concentrations élevées en sel. Halley a appelé le processus "l'attrition continentale".

Cette théorie était partiellement correcte. Pour ce fait, il faut ajouter le Sodium sur le fond de l'océan quand il a été formé. Or, la présence du chlore semble provenir des fuites gazeuses de l'intérieur de la Terre et s'échapper par des éruptions hydrothermales ou volcaniques. La théorie communément acceptée est que la salinité est restée stable pendant la vie de la Terre, et que les ions de sel maintiennent un cycle continu qui les fait pénétrer et être expulsés à l'intérieur de la Terre. Ainsi, les sels réagissent avec les basaltes du fond marin qui, une fois avalés par le processus de subduction, sont à nouveau expulsés par les courants hydrothermaux et les volcans. De nos jours, il existe plusieurs publications qui traitent de la possibilité que les océans archaïques soient beaucoup plus salins qu'actuellement [B].

Salinité :

La caractéristique la plus importante des eaux de mer est leur salinité, c'est-à-dire leur teneur globale en sels (Chlorures de sodium et de magnésium, sulfates, carbonates).

La salinité moyenne des eaux des mers et des océans est :

De 35 g.L^{-1} ($27,2 \text{ g.L}^{-1}$ de Na Cl, $3,8 \text{ g.L}^{-1}$ de MgCl_2 , $1,7 \text{ g.L}^{-1}$ MgSO_4 , $1,26 \text{ g.L}^{-1}$ CaSO_4 , $0,86 \text{ g.L}^{-1}$ K_2SO_4).

Cette salinité peut être différente dans le cas de mers fermées :

- Mer Méditerranée : 36 à 39 g.L^{-1} ,
- Mer Rouge : environ 40 g.L^{-1} ,
- Mer Caspienne : 13 g.L^{-1} ,
- Mer Morte : 270 g.L^{-1} ,
- Golfe Arabo-Persique : 36 à 39 g.L^{-1} .

Le pH moyen des eaux de mer varie entre $7,5$ et $8,4$; l'eau de mer est un milieu légèrement basique [3].

I.2.2. Les eaux saumâtres

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de comprise entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le CaCO_3 , le CaSO_4 , le MgCO_3 et le Na Cl [2].

D'autres facteurs interviennent également parmi lesquels nous citerons :

La vitesse de circulation de l'eau et par conséquent le temps de contact :

- Les soluté déjà préexistants (la solubilité variant avec la force ionique) : ainsi des eaux chlorurées et gypseuses peuvent contenir en solution des quantités de sulfate de calcium supérieures de beaucoup à la solubilité du sulfate de calcium dans l'eau pure (cas d'eau souterraines au Qatar) ;
- Le phénomène d'évaporation (évaporation directe ou évapotranspiration), principalement lié aux conditions climatiques mais aussi à la profondeur du niveau piézométrique des nappes phréatiques (influences irrigations) [4].

I.3. Le dessalement de l'eau dans le monde et en Algérie

I.3.1. Définition du dessalement de l'eau de mer

Le dessalement ou dessalage est un processus qui consiste à séparer l'eau et les sels à partir d'une eau brute, qui peut être de l'eau de mer ou une eau saumâtre d'origine continentale [4]. Cette Technique de suppression du chlorure de Sodium (Na Cl) de l'eau de mer. Pour contrer les pénuries d'eau, des systèmes sont mis en place pour produire de l'eau douce et potable à partir d'eau de mer. Parmi les techniques les plus utilisées il y a l'osmose inverse (traitement préalable de l'eau de mer par filtration et désinfection) et la distillation (purification par évaporation de l'eau de mer) [C].

I.3.2. Le dessalement dans le monde

Le dessalement de l'eau est en très forte croissance dans le monde. En effet, l'approvisionnement en eau potable sur le plan quantitatif et qualitatif s'impose progressivement, et qui est parallèle aux risques de pollutions (vecteurs de maladies, toxines ou matières en suspension ou agents pathogènes) qui perdurent à chaque étape du parcours de l'eau. La disponibilité géographique en eau douce est inégalement répartie sur la planète. Face à cette réalité, le dessalement de l'eau de mer est venu s'imposer pour pallier à ce déséquilibre.

La capacité installée de dessalement augmente chaque année en moyenne de plus de 10 %. Environ 17 000 unités de production d'eau potable, soit 58 millions de m³/jour d'eau produite, la production d'eau dessalée devrait dépasser 120 millions de m³/jour en 2019. La technologie de l'osmose inverse, qui constituait 20% des unités de production au début des années 1980, est devenue si importante aujourd'hui. Rappelons que la capacité mondiale de production en eau potable est de l'ordre de 500 millions de m³/j [5].

La répartition des usines de dessalement dépend de trois facteurs : une forte pénurie d'eau liée à l'aridité climatique, la proximité de la mer et une altitude basse et enfin la possibilité d'assumer financièrement un fort coût énergétique ce qui exclut pratiquement les régions pauvres [5].

La Chine a annoncé la production de 1 million de m³/j d'eau de mer traitée en 2010 et jusqu'à 3 millions de m³/j en 2020. 60% des besoins en eau douce des pays du Golfe Persique sont satisfaits par le dessalement d'eau de mer. En Méditerranée, la production artificielle d'eau douce par dessalement d'eau de mer ou d'eau saumâtre souterraine a commencé d'abord dans des situations d'isolement insulaire (Malte, Baléares, Dalmatie, Chypre, Cyclades...), littorales (Libye) et désertiques (Algérie), et se répand aujourd'hui très rapidement tout autour de la Méditerranée.

L'Algérie et l'Espagne ont clairement opté pour cette option pour résoudre leur problème d'insuffisance. A ce jour, la Méditerranée représente environ le quart du dessalement mondial. Vers 2030, la région pourrait approcher le chiffre du dessalement mondial actuel (soit environ de 30 à 40 millions de m³/j) [6].

Les figures (I.1) et (I.2) ci-dessous représentent la capacité du dessalement dans le bassin de la méditerranée et dans le monde entier.



Figure I. 1 : Le dessalement à travers la méditerranée [2].

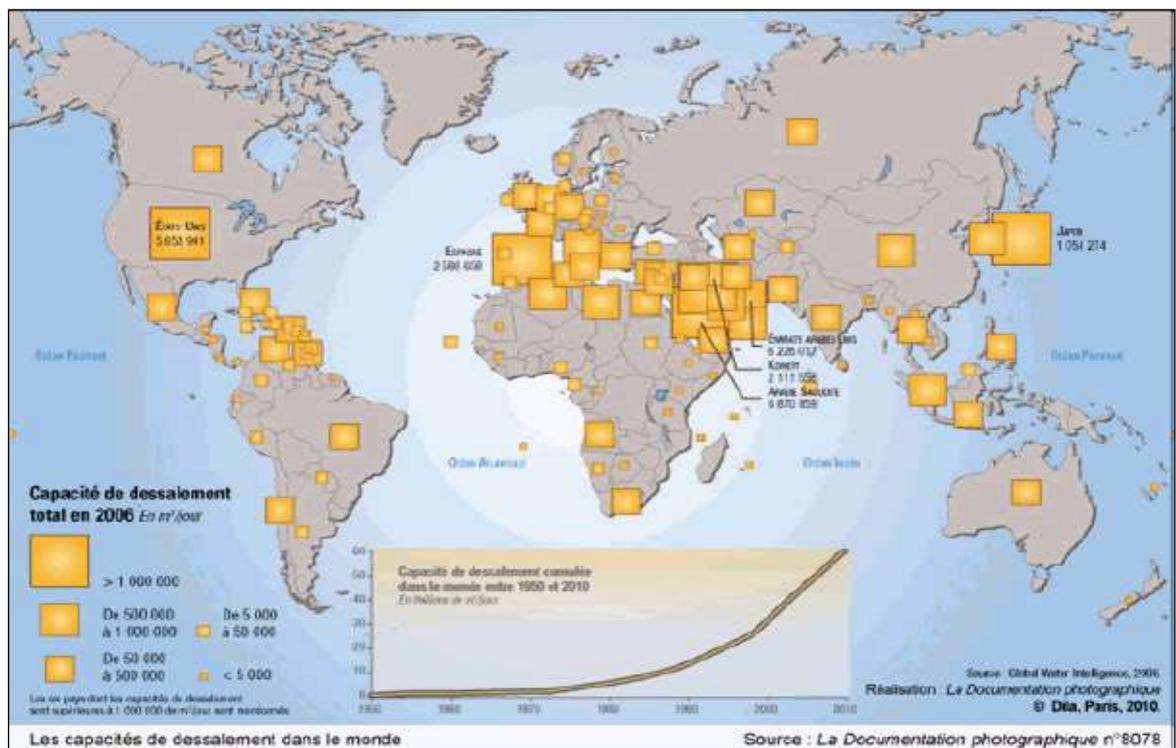


Figure I. 2 : Capacités de dessalement dans le monde [D].

I.3.3. Le dessalement de l'eau en Algérie :

L'expérience de dessalement des eaux en Algérie est étroitement liée au développement de l'industrie et tout particulièrement de l'industrie pétrolière et sidérurgique. Le recours au dessalement pour la production de l'eau est incontournable.

En 1964, trois petits blocs de 8 m³/h chacun a été installés au complexe Gaz liquéfié d'Arzew (ville côtière à l'ouest du pays). Le procédé utilisé fut la distillation à multiple effet. En 1969, une autre installation a eu lieu à Arzew avec une capacité de production de 4560 m³/j. Le procédé utilisé est le multi stage flash. D'autres installations ont été mises en exploitation pour les besoins en eau de haute pureté nécessaire au processus des complexes de production d'électricité (Cap Djanet à l'Est d'Alger) et l'industrie de liquéfaction (Arzew et Skikda) [7].

Dans le cadre d'un programme d'urgence dans les wilayas de Tlemcen, Oran, Tipaza, Alger, Boumerdès, Skikda et Tizi-Ouzou, l'Algérienne des Eaux (entreprise nationale) a entamé sa première expérience en matière de dessalement de l'eau de mer par la gestion de 23 stations monobloc, d'une capacité totale de 57 500 m³/j. 14 autres grandes stations d'une capacité totale environ de 2 000 000 m³/j ont été réalisés entre 2005 et 2014 [8]. D'autres stations ont été également mises en service dans les années 2009, 2010 et 2011. Il s'agit notamment des stations de Skikda (100 000 m³/j), Beni Saf (200 000 m³/j), Souk Tlata et Honaine à Tlemcen (200 000 m³ /j de chacune), Mostaganem (200 000 m³/jour), Fouka et Oued Sebt à Tipaza (respectivement 120 000 m³/j et 100 000 m³/j) et Cap Djinet à Boumerdès (100 000 m³/j). Encore d'autres sont, également, en cours de réalisation à la wilaya de Chlef (200 000 m³/j), El Tarf (50 000 m³/j) et la plus importante station est celle de Magtaâ, à Mostaganem, avec une capacité de production de 500 000 m³/j. La production en eau dessalée, selon les experts, passe de 500 000 m³/jour en 2008 à 1 100 000 m³/jour en 2009 et 2 260 000 m³/jour en 2011 pour atteindre 4 m³/j en 2020 [7].

Dans une déclaration faite par le ministre des Ressources en eau de l'Algérie en février 2019, la proportion d'eau dessalée est estimée à 17 % de l'eau distribuée qui est l'équivalent de 1.36 million m³/j [9].

I.3.3.1. Les stations de dessalement en Algérie :

Le tableau I.1 ci-dessous donne la répartition des stations de dessalement en Algérie entre 2005 -2014.

Tableau I. 1 : Stations de dessalement en Algérie réalisées entre 2005 -2014 [8].

N°	Station	wilaya	Capacité m ³ /j	Mise en Service
01	Kahrama Arzew	Oran	90.000	2005
02	Hamma	Alger	200.000	2007
03	Skikda	Skikda	100.000	2007
04	Beni Saf	Ain Timouchent	200.000	2007
05	Mostaganem	Mostaganem	200.000	2008
06	Douaouda	Alger Ouest	100.000	2008
07	Souk Tlata	Tlemcen	200.000	2011
08	Honain	Tlemcen	200.000	2012
09	Cap Blanc	Oran	200.000	2008
10	El-Taref	El-Taref	50.000	2008
11	Ténès	Chlef	200.000	2008
12	Magtaâ	Mostaganem	500.000	2014
13	Oued Sebt	Tipaza	100.000	2009
14	Cap Djenet	Alger Est	100.000	2011
Total		14 stations	2 400 000	

I.3.3.2. Stations monoblocs :

Ce sont des stations de petite capacité (2500 m³/j). L'Algérie en possède 23 petites stations de dessalement d'eau de mer pour une capacité de 57 500 m³/j ont été réalisées et réparties à travers 08 wilayas. Cette opération a fait l'objet d'une passation de deux marchés. 08 stations du tableau, sur 05 sites d'une capacité globale de 22 500 m³/j ont été réalisées par l'entreprise Allemande LINDE-KCA [8].

Tableau I. 2 : Stations monoblocs de dessalement réalisé en Algérie [8].

N°	Wilaya	Site	Commune	Capacité (m ³ /j)
01	Tlemcen	Ghazaouet	Ghazaouet	2 500
02		Ghazaouet II	Ghazaouet	2 500
03	Tipaza	Bou-Ismaïl	Bou-Ismaïl	5 000
04	Alger	Champ de tir	Zeralda	2 500
05		Champ de tir 2	Zeralda	2 500
06		Palme Beach	Staouali	2 500
07		La Fontaine	Ain Benian	2 500
08		La Fontaine	Ain Benian	2 500
Total	8 stations			22500

I.4. Impacts de rejets de dessalement

Parmi les impacts dus au dessalement par une usine de dessalement, il y a ceux qui se limitent à la phase de construction et ceux qui sont liés à la phase d'exploitation. Ces impacts débutent avec la transformation de l'occupation du sol, puis continuent avec des conséquences visuelles et des nuisances sonores pour s'étendre à des émissions polluantes dans l'atmosphère et des rejets dans l'eau ainsi qu'à des dommages potentiels pour le milieu récepteur.

Les activités de construction et d'exploitation se traduisent par une série d'impacts sur les zones littorales, qui affectent notamment la qualité de l'air, de l'eau, la flore et la faune marines, la perturbation d'écosystèmes importants (dunes de sables et autres habitats vulnérables par suite de l'emplacement choisi pour le trajet des canalisations), le dragage et ainsi l'élimination des déblais qui en résultent, le bruit. Tout un ensemble de produits chimiques servent en effet lors du dessalement, à prévenir ou combattre l'entartrage ou la prolifération de microorganismes dans les circuits, faute de quoi la bonne marche de l'exploitation serait entravée [4, 10].

I.4.1. La saumure

La saumure est un sous-produit du dessalement inévitable (contient les résidus des produits chimiques ayant servi aux prétraitements), qui est déchargée, généralement dans le milieu marin. Les constituants présents dans ces eaux résiduaires qui sont rejetées par ces usines de dessalement dépendent dans une large mesure de la qualité de l'eau d'alimentation, de la qualité de l'eau douce produite et de la technique de dessalement adoptée. Cependant, les rejets des

usines de dessalement ne comprennent pas seulement l'exode de saumure concentrée, les désinfectants et les agents antisalissures (antifouling), mais aussi des eaux chaudes et des effluents aqueux tels que les distillats et condensats d'éjecteur [11].

Ci-dessous, le tableau I.3 représentatif des caractéristiques physico-chimiques des eaux de mer et de la saumure.

Tableau I. 3 : Caractéristiques principales de l'eau de mer et saumure [12].

Paramètres	Eau de mer	Rejet (saumure)
Conductivité (ms/cm)	47	73,5
Salinité (g/l)	37	60
Turbidité (NTU)	1,14	2,03
pH	7,61	7,31
T (°C)	20	20
[Ca ²⁺] (g/l)	0,449	0,841
[Mg ²⁺] (g/l)	0,998	2,013
Chlorure (g/l)	14,200	22,412
Sulfates (g/l)	3,7	2,573
TA (°F)	0	0
TAC (°F)	13	28

Il est à signaler que dans le monde, 95 millions de mètres cubes d'eau douce sont produits chaque jour, entraînant 141,5 millions de m³/j de saumure aux impacts sur l'environnement sous-estimés [13].

I.5. Normes de potabilité de l'eau

Les normes fixent les concentrations maximales admissibles (CPA), c'est-à-dire la quantité tolérée de telle ou telle substance qu'un individu peut absorber sans danger quotidiennement à vie [14].

L'appréciation de la qualité de l'eau se base sur la mesure de paramètres physico-chimiques et chimiques ainsi que sur la présence ou l'absence d'organismes et de micro-organismes aquatiques.

I.5.1. Paramètres organoleptiques

Il s'agit de l'ensemble des paramètres gustatifs. Il est nécessaire que l'eau soit limpide, qu'elle n'ait pas mauvais goût ni une odeur désagréable pour le consommateur.

I.5.1.A. La couleur

Pour l'eau potable, le degré de couleur maximale acceptable est de 15 NTU [15]. Elle peut être due à certaines impuretés minérales (fer) mais également à certaines matières organiques (acides humiques, fulviques). En l'éliminant, l'eau sera agréable à boire. L'élimination de la couleur s'accompagne également de celles de certaines matières organiques indésirables et qui, devra alors être effectuée à l'usine de traitement avant l'entrée de l'eau dans le réseau [16].

I.5.1.B. Goûts et odeurs

Selon les physiologistes, il n'existe que quatre saveurs fondamentales : salée, sucrée, aigre et amère. Or, les eaux de consommation doivent posséder un goût et une odeur agréables. La plupart des eaux, traitées ou non, dégagent une odeur plus ou moins perceptible et ont une certaine saveur. Ces deux propriétés, purement organoleptiques, sont extrêmement subjectives et il n'existe aucun appareil pour les mesurer [15].

I.5.2. Paramètres physicochimiques

I.5.2.1. La turbidité

La turbidité d'une eau est due à la présence des particules en suspension, notamment colloïdales : argiles, limons, grains de silice, matières organiques, la pluviométrie joue un rôle important dans les eaux superficielles et souterraines selon leur origine [17].

I.5.2.2. Potentiel d'hydrogène « pH »

L'eau naturelle pure est neutre. Le pH d'une eau représente son acidité s'il est bas (inférieur à 7) ou alcalinité dans le cas inverse. C'est le paramètre le plus important de la qualité de l'eau, il doit être surveillé au cours de toute opération de traitement.

Un pH inférieur à 7 peut conduire à la corrosion du ciment ou des métaux des canalisations, avec entrainement des éléments indésirables comme le plomb et le cuivre [18].

I.5.2.3. La température

La température de l'eau, est un facteur qui agit sur la densité, la viscosité, la solubilité des gaz dans l'eau, la dissociation des sels dissous et de même que sur les réactions chimiques et biochimiques.

Une température élevée favorise la croissance des micro-organismes, peut accentuer le goût,

l'odeur et la couleur [19].

I.5.2.4. Matières en suspension

Ce sont les matières qui ne sont ni à l'état soluble ni à l'état colloïdal, retenues par un filtre. Ces matières en suspension, qui comportent des matières organiques et minérales, constituent un paramètre important qui marque bien le degré de pollution de l'eau [20].

Une eau potable ne doit pas contenir de matières, en suspension, décantables. Pour une eau qui contient des suspensions à des teneurs de quelques milligrammes par litre, ne pose pas de problèmes majeurs [21].

Les teneurs élevées en matières en suspension peuvent être considérées comme une forme de pollution.

I.5.2.5. Matières organiques dissoutes

Dans les eaux naturelles, on trouve plusieurs familles de composés parmi lesquelles on cite les acides humiques, les acides carboxyliques et les acides hydrates de carbone. Elles sont caractérisables globalement par l'oxydabilité au permanganate ou le carbone organique total [22].

I.5.2.6. Conductivité électrique

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface et séparées l'une de l'autre de 1 cm [18]. Elle est également relative à la température de l'eau, et proportionnelle à la minéralisation [23]. L'unité de la conductivité étant en micro siemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) [24].

Ci-dessous un tableau représentant les différentes eaux ainsi que leurs conductivités et résistivités.

Tableau I. 4 : Classification des eaux selon la conductivité [18].

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

I.5.2.7. La dureté totale de l'eau

Initialement, la dureté de l'eau représente sa capacité de transformer le savon en un composé insoluble. Mais maintenant, elle est calculée en mesurant la quantité d'ions calcium, magnésium, aluminium, fer, strontium, etc. présents dans l'eau, les deux premiers cations (Ca^{2+} et Mg^{2+}) étant généralement les plus abondants. Comme le calcium est un des ions les plus abondants, il devient donc un bon indicateur de la dureté de l'eau. C'est pourquoi on exprime la dureté selon la quantité de trioxycarbonate de calcium (CaCO_3 , communément appelé le carbonate de calcium) présente dans une solution. Cette quantité est exprimée en mg/L ou en ppm [25]. Dans l'eau, sont déterminés :

- La dureté totale ou titre hydrotimétrique TH qui est la somme des concentrations calcique et magnésienne $\text{TH} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]$
- La dureté calcique qui correspond à la teneur globale en sels de calcium ;
- La dureté magnésienne qui correspond à la teneur globale en sels de magnésium ;
- La dureté carbonatée correspond à la teneur en hydrogénocarbonate et carbonate de calcium et de magnésium [25, E].

I.5.2.8. L'alcalinité

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence de bases et de sels d'acides faibles. Dans les eaux naturelles, l'alcalinité résulte le plus généralement de la présence d'hydrogénocarbonates, carbonates et hydroxydes. D'autres sels d'acides faibles peuvent aussi être dosés et interfèrent dans la mesure : acides humiques, phosphates, citrates, tartrate. Deux titres qui sont le titre alcalimétrique simple (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC). L'unité utilisée est le degré français ($1^\circ\text{f} = 10 \text{ mg. L}^{-1}$ de $\text{CaCO}_3 = 0,2$ milliéquivalent. L^{-1}) [26].

I.5.2.9. Cations et anions

Les eaux douces, qu'elles soient d'origine souterraine ou superficielle sont plus ou moins minéralisées par des sels naturels. Il est souvent très important de connaître précisément cette minéralisation en plus des indications données par les paramètres globaux de type « titre » et « potentiel ». Par ailleurs, certains des cations et anions minéraux naturels présents dans les eaux sont considérés comme indésirables ou toxiques selon l'usage auquel l'eau douce est destinée (domestique, agricole, industriel, santé, tourisme, refroidissement...) [26].

Un ion est un élément chimique portant une charge électrique. On distingue les ions négatifs, les anions, et les ions positifs, les cations. Un anion est un atome (ou une molécule) qui a gagné un ou plusieurs électrons. Comme l'électron est chargé négativement, l'anion porte une charge négative. À l'inverse, un cation est un atome (ou une molécule) qui a perdu un ou plusieurs

électrons. La charge électrique globale du cation est donc positive. Les sels dissouts dans l'eau sont sous forme ionique. Les ions sont impliqués dans de nombreuses réactions chimiques notamment au sein des organismes vivants. [F].

- **Le Calcium (Ca^{2+})** : Est un élément chimique avec le symbole « Ca ». Il provient des roches calcaires. Il a un rôle important pour la formation des os et des dents. Il est aussi essentiel pour la contraction des muscles, ainsi que le maintien de la pression sanguine et pour la coagulation sanguine. Il est également un nutriment important pour la structure et le métabolisme des plantes. Il est également responsable de la dureté de l'eau.
- **Le Magnésium (Mg^{2+})** : Est un élément chimique avec le symbole « Mg ». Il provient de différents minerais. Il est un composant de la chlorophylle. Il est également responsable de la Dureté de l'eau. On le trouve dans la formation des os et des dents, ainsi que dans la fixation du calcium sur les os. [27].
- **Les Bicarbonates (HCO_3^-)** : L'ion de bicarbonate est le principal constituant alcalin de la plupart des eaux courantes. On le trouve souvent à une concentration de 5-500mg/L exprimée en CaCO_3 .
- **Le Chlore (Cl^-)** : Puisque tous les sels du chlore sont très solubles dans l'eau, le chlore est fréquent dans les réserves d'eau douce à un taux de 10 à 100 mg/l [28].

Les nitrates (NO_3^-) et les nitrites (NO_2^-) sont des ions présents de façon naturelle dans l'environnement. Ils sont le résultat d'une nitrification de l'ion ammonium (NH_4^+), qui est dans l'eau et le sol, qui est oxydé en nitrites par des bactéries : Nitrosomonas, puis en nitrates par d'autres bactéries : Nitrobacter (Santé Canada, 1992). Les nitrates sont très solubles dans l'eau ; ils migrent donc aisément dans la nappe phréatique lorsque les niveaux excèdent les besoins de la végétation (Santé Canada, 1992). La toxicité des nitrates résulte de leur réduction en nitrites et de la formation de méthémoglobine d'une part et de leur contribution possible à la synthèse endogène de composés N-nitrosés d'autre part.

Les concentrations de nitrates et de nitrites dans l'eau peuvent être exprimées sous forme de nitrates (ou nitrites) ou sous forme d'azote. Un milligramme de nitrates par litre (mg/l de NO_3) équivaut à 0,226 mg de nitrates, sous forme d'azote, par litre (mg-N/l). Dans le cas des nitrites, un mg/l équivaut à 0,304 mg-N/l [29].

I.5.2.10. Pollution des eaux par les métaux lourds

L'Homme et son activité principalement sont responsables de la pollution des eaux par les métaux lourds et qui ont un fort impact toxicologique. Ils sont nombreux, mais on peut citer surtout l'arsenic, le cadmium, le plomb et le mercure [30].

I.5.3. Paramètres microbiologiques

Le risque microbiologique d'origine hydrique (ou risque infectieux) correspond à la présence dans l'eau de microorganismes pathogènes, ou potentiellement pathogènes (opportunistes) et ce en quantité supérieure au seuil d'infection fixé par l'OMS. Parmi ces pathogènes, on distingue les virus, les bactéries et les protozoaires.

Tableau I. 5 : Principales maladies d'origine hydrique et agents microbiologiques responsables [31].

Origine	Maladies	Agents pathogènes
Parasitaire	Dysenterie amibienne	Entamoeba histolyca
	Gastro-enterites	Giardia lamblia Cryptosporidium parvum
Bactérienne	Fievres typhoïde et paratyphoïde	Salmonella typhi Salmonella paratyphi A et B
	Dysenterie bacillaire	Shigella
	Cholera	Vibrio cholerae
	Gastro-enterites	Escherichia coli enterotoxinogene Campylobacter jejuni Yersina enterocolitica
Virale	Hépatites A et E	Virus hépatite A et E
	Poliomyélite	Virus poliomyélitique
	Gastro-enterites	Rotavirus Enterovirus Calicivirus Adenovirus...

D'une manière générale :

- L'eau ne doit pas contenir de germes pathogènes en particulier de salmonelles dans 5 litres d'eau prélevés, de staphylocoques pathogènes dans 100 ml d'eau prélevée ;
- 95% au moins des échantillons prélevés ne doivent pas contenir de coliformes dans 100 ml d'eau.
- L'eau ne doit pas contenir de streptocoques fécaux dans 100 ml d'eau prélevé.

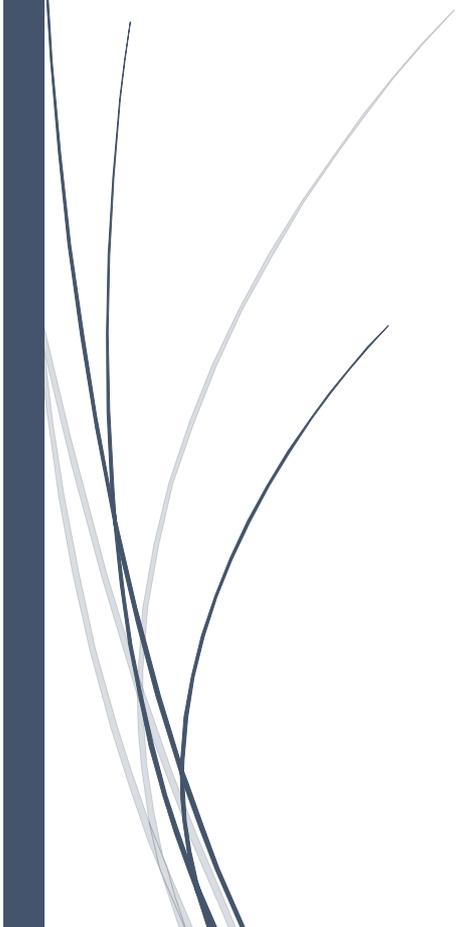
Il convient de préciser que la mise en œuvre de procédés élémentaires de désinfection telle que la chloration de l'eau, permet d'éradiquer totalement ces germes et d'éviter des maladies tels que le choléra, la dysenterie bacillaire ou les fièvres typhoïdes [32].

I.6. Conclusion

La solution du dessalement a été mise en œuvre avec succès, depuis quelques années grâce au partenariat étranger, et à de nombreux petits projets financés sur le budget de l'Etat. Elle est également une option hautement stratégique qui mettra fin, à terme, dans la majorité des villes du nord du pays (l'Algérie), selon les prévisions du gouvernement, aux difficultés récurrentes d'approvisionnement en eau, une denrée de plus en plus rare à cause des aléas climatiques et des longues périodes de sécheresse.

Chapitre II

Les procédés de dessalement de l'eau



Chapitre II : Les procédés de dessalement de l'eau

II.1. Introduction

Le dessalement de l'eau est un processus qui permet d'obtenir de l'eau douce à partir d'une eau saumâtre ou salée. En dépit du nom, il s'agit rarement de retirer les sels de l'eau, mais plutôt, à l'inverse, d'extraire de l'eau douce. Le dessalement est l'une des solutions éprouvées et sûres, mûries et maîtrisées techniquement, pour la mobilisation des ressources en eaux non conventionnelles.

II.2. Structure générale d'une usine de dessalement :

Dans une usine de dessalement par osmose inverse on trouve :

- Une prise d'eau de mer ;
- Un poste de prétraitement ;
- Une installation d'osmoseur ;
- Un système de récupération de l'énergie du concentrât ;
- Un ensemble de post-traitements du perméat ;
- Un poste de nettoyage chimique des membranes [33, 34].

Une installation de dessalement peut être schématiquement subdivisée en 4 phases comme dans la figure suivante :

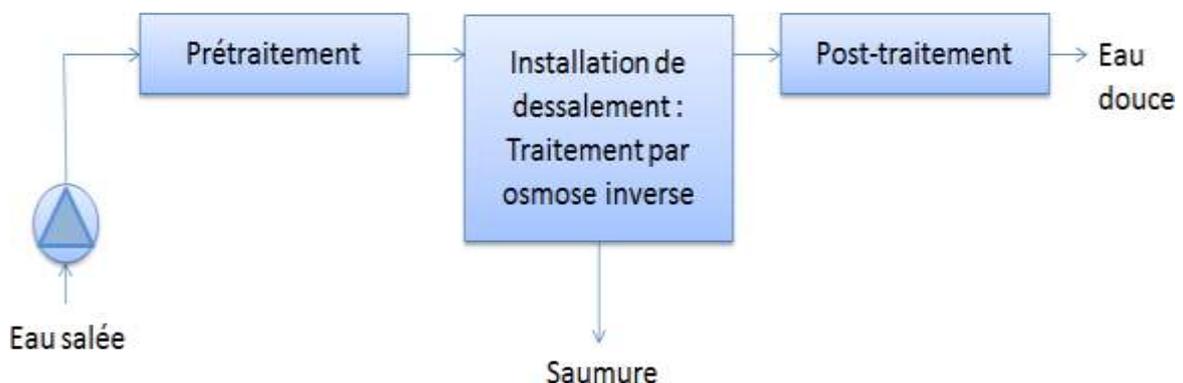


Figure II. 1 : Diagramme de processus de dessalement de l'eau de mer [34].

II.2.1. La prise d'eau de mer :

La prise d'eau de mer qui entre à l'usine de dessalement doit permettre d'obtenir une eau d'une qualité meilleure. Plus particulièrement, du point de vue matières en suspension. Cette prise en compte de la qualité de l'eau est d'autant plus importante que le procédé de dessalement choisi sera l'osmose inverse [34].

II.2.2. Le poste de pompage

La tour de captage de l'eau de mer où s'effectue la première opération consiste à pomper l'eau de mer par le biais de plusieurs pompes dont une de réserve, par aspiration à vide. Le système de préfiltration de cette tour comprend trois tubes de grilles à gros grains et des tamis autonettoyants. Cette filtration permet d'assurer une entrée en eau moins chargée en débris marins et homogène.

II.2.3. Le poste de prétraitement

Il est nécessaire d'effectuer un prétraitement de l'eau de mer avant osmose inverse car les membranes d'OI sont très sensibles au colmatage et alors une bonne qualité de l'eau en entrée des modules d'OI est indispensable pour assurer des performances stables sur le long terme. L'objectif du prétraitement est de réduire le colmatage, l'augmentation de la durée de vie des membranes, l'amélioration de la qualité de l'eau produite et ainsi, la maintenance des performances de l'OI.

Les procédés de prétraitement sont physiques et chimiques :

- Les prétraitements physiques représentent les préfiltres mécaniques, la filtration à sable, les filtres à cartouche.
- Tandis que le prétraitement chimique consiste en l'addition d'inhibiteurs d'entartrage, de coagulants, de désinfectants et de poly-électrolytes.

Aujourd'hui, la majorité des usines d'OI utilisent un procédé de prétraitement conventionnel or, avec la baisse constante du prix des éléments membranaires et la mauvaise qualité des ressources en eau, ce prétraitement par procédé membranaire trouve de plus en plus sa place dans les étapes de prétraitement avant osmose inverse [14].

II.2.4. Le Prétraitement par les procédés membranaires

À cause des limitations du prétraitement conventionnel, un intérêt croissant se porte sur l'utilisation de procédés membranaires à basse pression tels que la microfiltration (MF), l'ultrafiltration (UF) et la nanofiltration (NF) ayant pour avantages : [35]

- Flux de l'osmose inverse significativement élevé ;
- Plus faible consommation de produit chimique ;
- Meilleur compacity (-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 [36].

Parmi les trois procédés UF, MF et NF, l'UF paraît le choix le plus courant dans les recherches à l'échelle pilote. En effet, à l'échelle industrielle, il y a des prétraitements par UF ou MF seulement. De nombreux essais pilotes ont été menés avec des membranes d'UF en prétraitement avant osmose inverse et des installations industrielles ont eu lieu depuis quelques années [37-40].

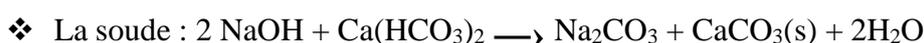
II.2.5. Le Poste de traitement

II.2.5.a. Les traitements de neutralisation ou de reminéralisation des eaux

Tous les procédés qui ont pour but réduire la concentration en dioxyde de carbone sont envisageables pour amener une eau à l'équilibre. En revanche, un traitement de ce type a des effets temporaires limités car le CO₂ est particulièrement labile et les changements de pression que subit l'eau lors de son transport dans le réseau peuvent provoquer sa disparition. En outre, toute hausse de température va raviver le phénomène de précipitation en déplaçant la courbe d'équilibre [14].

II.2.5.b. La décarbonatation

On a remarqué que des eaux trop dures ont un pH d'équilibre tellement bas qu'il ne permet pas de former du carbonate de plomb et qu'il ne serait pas possible de garantir le seuil prévu par la limite de qualité de 10 µg/L pour le plomb quand le réseau est composé de tuyauteries et accessoires comportant ce métal. Et donc, il faut effectuer une décarbonatation. Les réactifs utilisables sont :



Si l'eau est suffisamment dure (cette dureté liée aux chlorures ou aux sulfates), on peut utiliser le carbonate de soude (Na₂CO₃) : $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaSO}_4 \longrightarrow \text{CaCO}_3(\text{s}) + \text{Na}_2\text{SO}_4$

II.2.5.c. La désinfection

Il est nécessaire de désinfecter le perméat malgré qu'il soit d'une qualité bactériologique excellente afin de protéger l'eau contre toute pollution ultérieure au moment de son stockage et de sa distribution. La désinfection permet également :

- De pallier à toute fuite au niveau des membranes, qui pourrait apporter des éléments indésirables (bactéries, virus).
- D'oxyder les polluants qui peuvent être apportés par l'injection des solutions de produits de post-traitements. La désinfection est assurée par injection de chlore sous forme d'hypochlorite de sodium ou d'une solution d'hypochlorite de calcium [14].

II.2.5.d. L'aération

Le perméat peut diminuer la quantité d'oxygène, surtout si on utilise du bisulfate de sodium. Il faut donc l'aérer en ménageant une ou plusieurs chutes d'eau (la hauteur totale de chute pour atteindre la saturation est de 1,2 m) qui va s'effectuer à l'entrée du bassin de stockage de l'eau à distribuer. La chloration de l'eau devra s'effectuer en aval de cette chute, pour ne pas détruire le chlore [41].

II.3. Les procédés de dessalement

On trouve sur la pratique plusieurs méthodes de dessalement de l'eau de mer :

II.3.1. Les procédés de distillation

Les procédés de distillation consistent à chauffer l'eau de mer pour en vaporiser une partie. La vapeur obtenue ne contient pas de sels, et donc une condensation de cette vapeur sert à obtenir de l'eau douce liquide. Il s'agit en fait d'accélérer le cycle naturel de l'eau. Dans la nature l'eau s'évapore des océans, la vapeur s'accumule pour former les nuages puis l'eau douce retombe sur terre par les précipitations. Ce principe de dessalement a été utilisé dès l'Antiquité pour produire de très faibles quantités d'eau douce sur les bateaux [3].

Dans ce procédé on distingue :

II.3.1.1. Distillation à simple effet

Son principe est simple. Il reproduit le cycle naturel de l'eau (Voir la figure II.2) :

1. Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à ébullition l'eau de mer.
 2. La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide.
 3. Un groupe électropompe soutire l'eau condensée un deuxième l'eau de mer concentrée ou saumure.
- ou saumure.

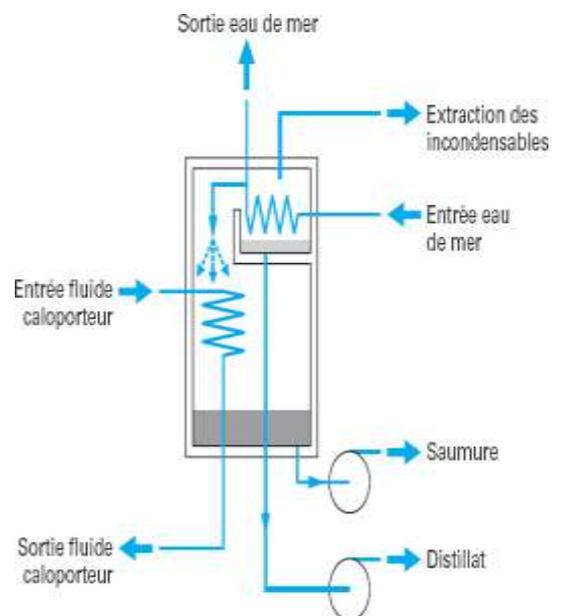


Figure II. 2 : Distillateur simple effet [3].

Cette première solution est simple à mettre en œuvre met n'offre qu'un rendement réduit, aussi elle n'est utilisée que dans les navires disposant d'une source d'énergie thermique [3].

II.3.1.2. Le procédé de distillation à multiples effets (Multi-Effet distillation MED)

Ce procédé repose sur le principe de l'évaporation, sous pression réduite, d'une partie de l'eau de mer préchauffée à une température qui varie entre 70 et 80°C. L'évaporation de l'eau se fait sur une surface d'échange, contrairement au cas du procédé précédent, où elle est assurée par détente au sein des étages successifs.

La chaleur transférée au travers de cette surface est apportée soit par une vapeur produite par une chaudière, soit par une eau chaude qui provient d'un récupérateur de chaleur. La vapeur ainsi obtenue dans le premier effet est condensée pour produire de l'eau douce tandis que dans le deuxième effet où il y a une pression inférieure, ainsi la chaleur de condensation qu'elle cède permet d'évaporer une partie de l'eau de mer contenue et ainsi de suite (voir la figure II.3).

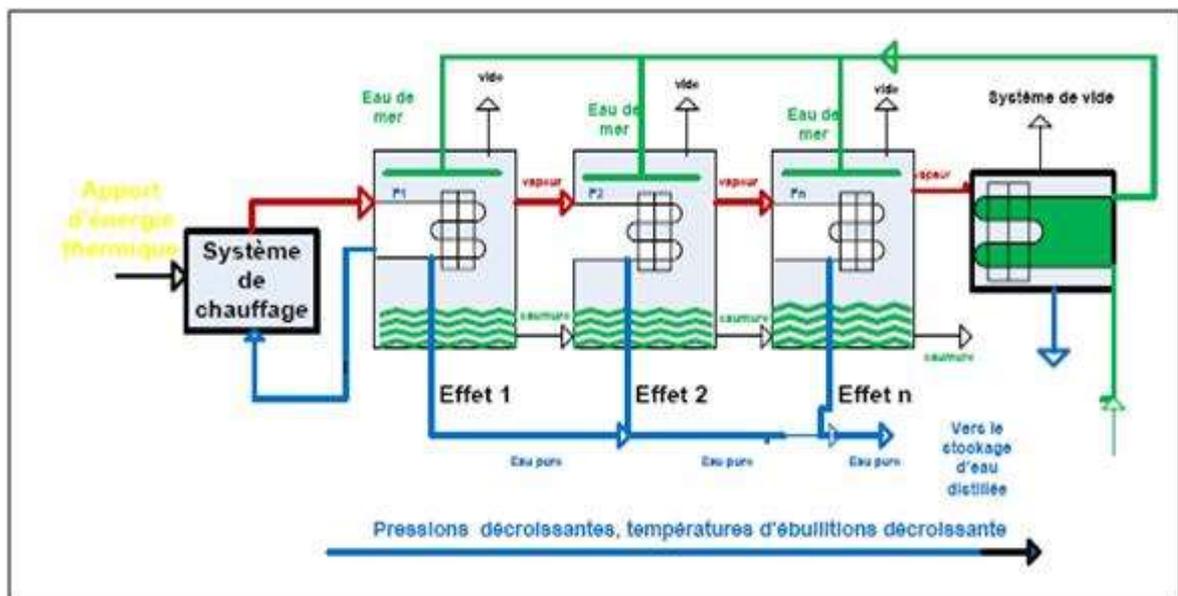


Figure II. 3 : Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED) [G].

La multiplication du nombre d'effets permet alors la réduction de la consommation spécifique d'énergie (énergie/m³ d'eau douce produite). Il existe plusieurs technologies d'évaporateurs à multiples effets [3].

II.3.1.3. Le procédé de distillation à détente étagées (Multi-Stage Flash distillation MSF)

Ce procédé appelé Flash maintient l'eau sous pression pendant toute la durée du chauffage, quand elle atteint une température d'environ 120°C, elle est introduite dans une enceinte (ou étage) où on trouve une pression réduite. Il en résulte une vaporisation instantanée par une détente appelée Flash. Une partie de l'eau s'évapore puis va se condenser sur les tubes

condenseurs placés en haut de l'enceinte, et l'eau liquide est recueillie dans des réceptacles en dessous des tubes. C'est alors l'eau de mer chaude qui se refroidit pour fournir la chaleur de vaporisation. L'ébullition s'arrête quand l'eau de mer atteint la température d'ébullition qui correspond à la pression qui se trouve dans l'étage considéré. Le phénomène de flash est reproduit ensuite dans un deuxième étage où règne une pression encore plus réduite. La vaporisation de l'eau est ainsi réalisée par détentes successives dans un ensemble d'étages où il y'a des pressions de plus en plus réduites. On peut trouver jusqu'à 40 étages successifs dans une unité MSF industrielle [3].

La figure II.4 ci-dessous schématise un distillateur par détentes successives

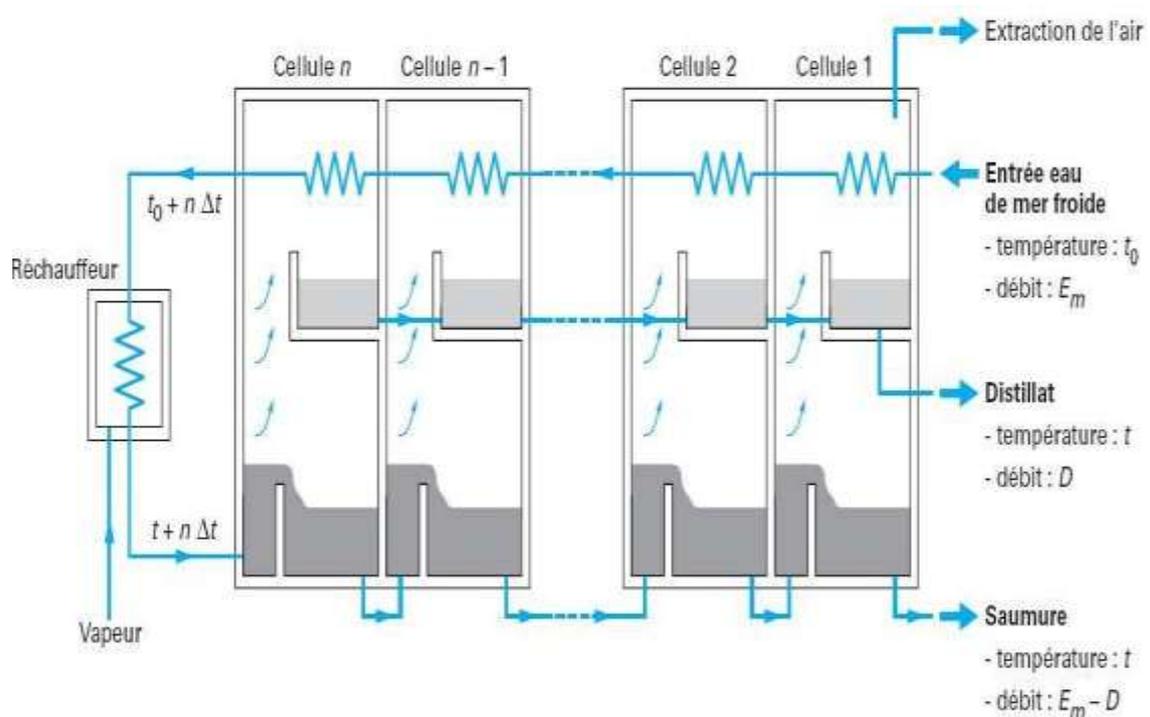


Figure II. 4 : Distillateur par détentes successives [3].

Pour la chauffer jusqu'à 120°C , l'eau de mer circule d'abord dans les tubes des condenseurs des différents étages en commençant par le dernier étage où la température est la plus faible, elle est ensuite préchauffée en récupérant la chaleur de condensation de la vapeur d'eau. Et finalement, elle est portée à 120°C grâce à la vapeur qui est à une température supérieure à 120°C produite par une chaudière ou qui provient d'une centrale de production d'électricité. 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 dévésiculateur constitué par une sorte de grillage qui limite le passage des gouttelettes et ensuite qui retombent alors au fond de l'enceinte.

L'avantage principal du procédé MSF est que l'évaporation de l'eau de mer ne se produit pas autour des tubes de chauffe puisque le liquide flash ceci limite les risques d'entartrage. 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. Il est nécessaire de fournir également 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 pour cette raison que ce procédé est surtout utilisé pour les très grandes capacités de plusieurs centaines de milliers de m³ d'eau dessalée par jour. Cette technologie est apparue en 1960 pour résoudre les problèmes d'entartrage que connaissaient les procédés de distillation à multiples effets [3].

II.3.1.4. La distillation solaire

Le distillateur solaire fut utilisé en 1872 dans les mines de nitrates du nord du Chili. Il a permis de fournir de l'eau potable aux animaux de trait à partir de l'eau salée de la mer, son fonctionnement repose essentiellement sur l'effet de serre. Il s'agit d'une enceinte fermée, composée d'un bac de surface noire et qui contient une lame d'eau et d'une couverture vitrée servant à obtenir l'effet de serre nécessaire au processus de l'évaporation/condensation [42].

Ci-dessous une figure d'un distillateur solaire (la figure II.5).

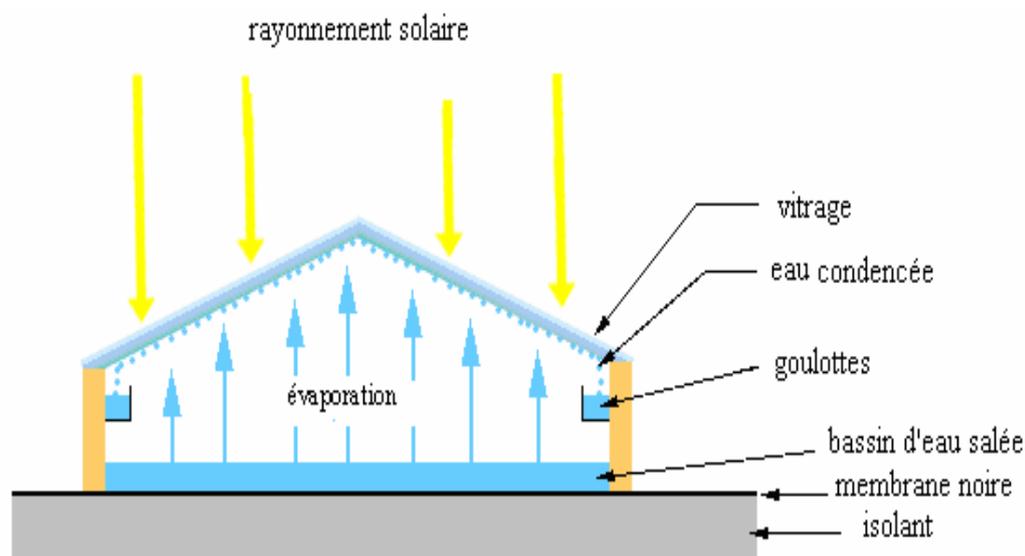


Figure II. 5 : Distillateur solaire à effet de serre [42].

Le rayonnement solaire chauffe la surface noire au fond du bassin. Le rayonnement ne pouvant s'échapper, va échauffer l'eau celle-ci s'évapore et se condense sur la vitre (gouttes d'eau). Le sel reste sur la surface noire. Les gouttes d'eau pures glissent ensuite dans les

goulottes. Son grand inconvénient est son faible rendement.

De tels systèmes sont actuellement utilisés pour faire face aux difficultés d'approvisionnement en eau douce, dans certains pays désertiques du Moyen-Orient et dans le bassin méditerranéen.

II.4. Dessalement par électrodialyse

II.4.1. Définition

C'est un procédé électrochimique qui permet d'extraire les ions qui se trouvent dans une solution grâce au passage d'un courant électrique, elle fait donc diminuer la concentration d'une solution.

II.4.2. Principe de fonctionnement

L'électrodialyse permet de transférer des ions de sels dissous à travers des membranes qui est imperméable à l'eau épurée, le mouvement des ions est provoqué par un champ électrique, l'électrode négative (cathode) attire les cations, alors que les anions se déplacent vers l'électrode positive (anode) (la figure II.6).

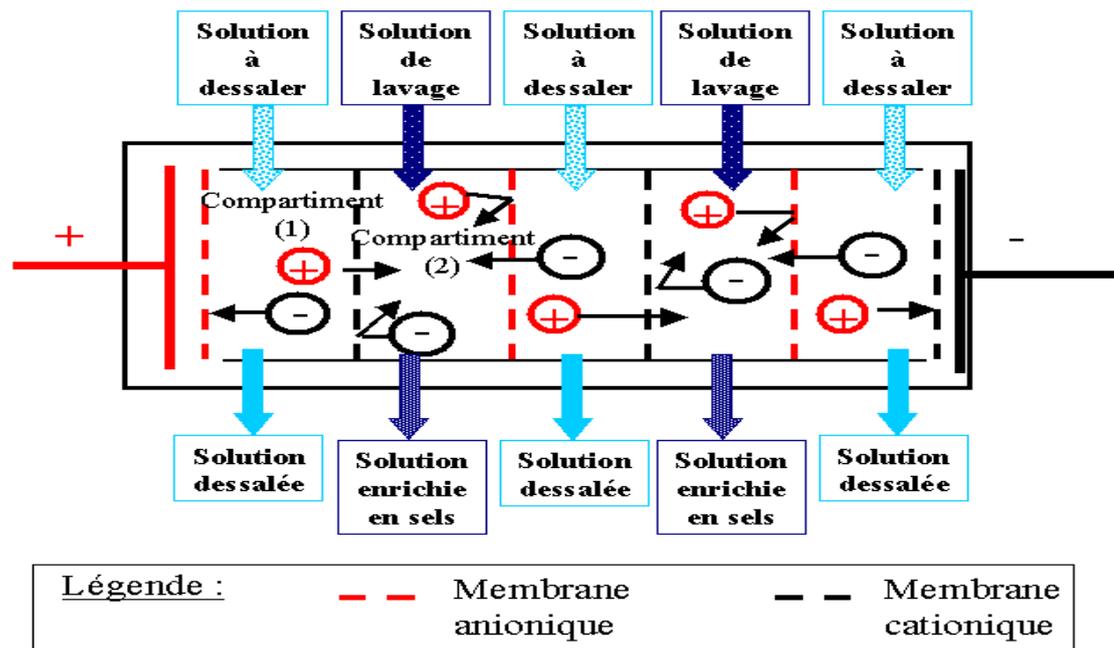


Figure II. 6 : Principe de dessalement par l'électrodialyse [H].

Les installations sont formées de compartiments d'empilements de membranes alternativement anionique et cationique, un compartiment sur deux renferme des saumures concentrées et l'autre du permet épurer [7].

II.4.3. Les membranes d'électrodialyse

Les membranes utilisées en électrodialyse sont des membranes échangeuses d'ions qui sont sous la forme de feuilles à une épaisseur entre 0.1 et 0.8mm. On distingue deux types de membranes selon les propriétés :

- Les membranes échangeuse de cations qui sont perméables uniquement aux cations et dont le groupement fonctionnel est en général un groupement acide sulfonique (SO_3^-).
- Les membranes échangeuse d'anions qui sont perméables uniquement aux anions et dont le groupement fonctionnel est en général un groupement ammonium quaternaire (NR_3^+) [4].

II.4.4. Avantages et inconvénients

- Ce procédé a pour avantage d'être très pratique et adapté au dessalement en laboratoire en petite quantité pour les eaux saumâtres, mélange d'eau douce et d'eau de mer qui se situent à l'embouchure des fleuves et qui sont moins salées que l'eau de mer.
- L'inconvénient est que cette technique c'est qu'elle consomme énormément d'énergie électrique et ne peut dessaler que ces eaux saumâtres dont la concentration totale de sels dissous est généralement comprise entre 1 et 10 g/l alors qu'elle est en moyenne de 35 g/l pour l'eau de mer.

II.5. Dessalement membranaire (Osmose Inverse)

Le procédé de traitement des eaux par membrane d'osmose inverse est une des techniques de filtration membranaire. On l'utilise en dessalement des eaux saumâtres, des eaux de mer et également pour la réutilisation des eaux usées urbaines et industrielles. Son objectif principal repose sur l'élimination des sels et des substances organiques se trouvant dans les eaux ainsi qu'une partie des bactéries et des virus. En dessalement des eaux de mer, l'osmose inverse reste en compétition avec les procédés thermiques (multi flash ou multi effet).

Le choix entre ces deux technologies dépend essentiellement des coûts énergétiques (électricité et vapeur), de la qualité de l'eau brute à traiter ou de l'eau dessalée à obtenir [10].

II.5.1. L'Osmose inverse (OI)

Principe

L'osmose est un phénomène naturel. Si l'on a deux solutions de concentrations salines différentes séparées par une membrane. L'eau se déplace spontanément de la solution la moins concentrée à la solution la plus concentrée. Si l'on applique une pression supérieure à la pression osmotique (pression d'équilibre) le solvant se déplace de la solution la plus concentrée à la moins concentrée c'est l'osmose inverse (voir la figure II.7 ci-dessous).

La pression osmotique w est exprimée par :

$$W = I.C.R.T$$

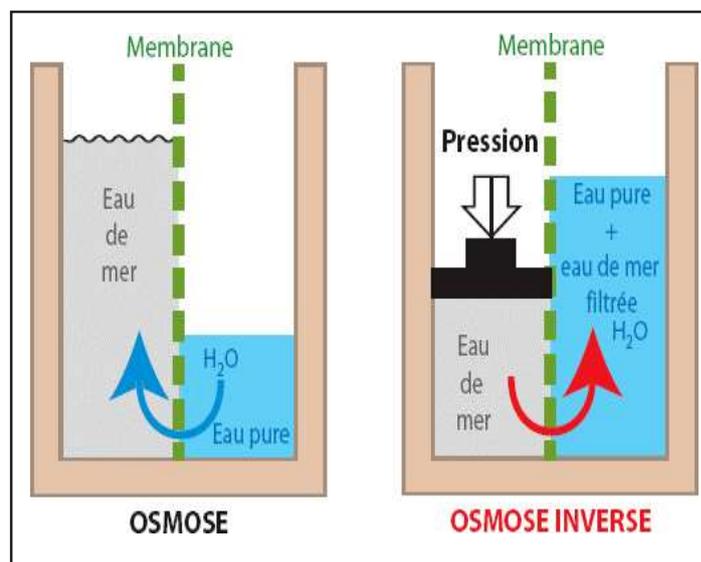


Figure II. 7 : Principe de l'osmose inverse

Avec :

- i : Nombre d'ion associé
- C : Concentration de l'eau saline (mol/L)
- R : Constante des gaz parfaits (0,081 L.atm/K/mol)
- T : Température de l'eau en °K (1atm = 1,013 bars)

L'osmose inverse est une technique de séparation en phase liquide par perméation à travers des membranes semi-sélectives sous l'effet d'un gradient de pression. Une membrane semi-sélective ou semi-perméable est une membrane imperméable aux corps dissout (ionique ou non) et perméable au solvant [I].

II.5.2. Schéma général d'une installation d'osmose inverse

Le système d'osmose inverse, est composé principalement de :

- Membrane proprement dite ;
- Le module contenant la membrane ;
- La pompe haute pression (Une pompe de mise à pression du liquide afin de lui donner la pression efficace de production qui doit être supérieure à la pression osmotique des modules) ;
- Le poste de traitement.

Ci-dessous (la figure II.8) une représentation d'une filière de traitement par osmose inverse OI.

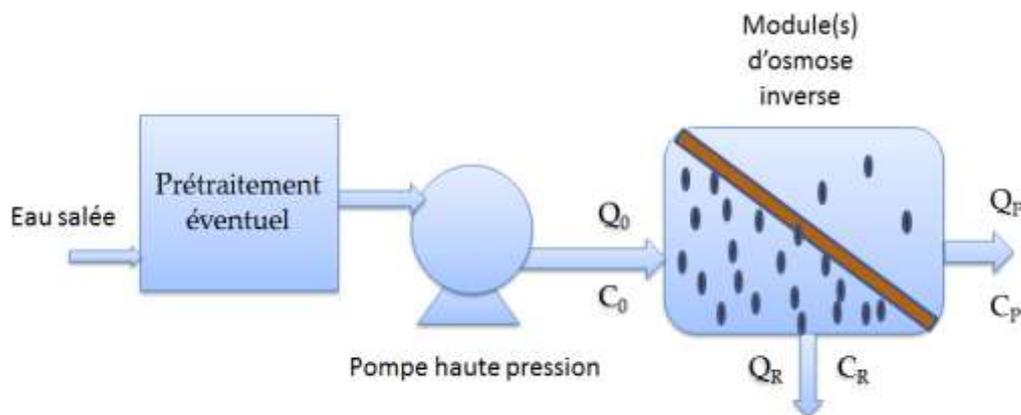


Figure II. 8 : Schéma de principe d'une unité d'osmose inverse [4].

L'écoulement du fluide sur la membrane est continu et tangentiel. Cet écoulement tangentiel limite l'accumulation sur la membrane de plusieurs espèces (particules, molécules, ions) retenues par cette dernière. Le débit d'entrée (Q_0) se divise au niveau de la membrane en deux parties de concentrations différentes. Une partie (débit Q_p) passe à travers la membrane (perméat) tandis que l'autre partie est retenue par la membrane (concentrat ou rétentat) [I].

II.5.3. Modules d'osmose inverse

Pour la mise en place, les membranes doivent être montées dans des supports appelés modules.

Actuellement, on distingue quatre types de modules commercialisés : modules tubulaires, modules fibres creuses, modules plans et modules spirales. Plusieurs critères sont à prendre en compte pour le choix d'un type de module tels que :

- Les conditions de transfert optimal ;

- La surface spécifique d'échange élevée ;
- L'investissement minimal et le coût de fabrication ;
- La simplicité de mise en œuvre et la durée de vie des membranes ;
- L'entretien aisé (nettoyage, démontage, remplacement des membranes).

II.5.3.1. Modules plans

Ils sont les modules les plus anciens et les plus simples. Ils sont sous la forme de plaques unitaires disposées parallèlement les unes aux autres et séparées par des grilles. Ci-joint une comparaison entre les avantages et les inconvénients de ces modules plans

Tableau II. 1 : Avantages et inconvénients des modules [4].

Avantages	Inconvénients
Système souple et modulable	Système peu compact (100 à 400 m ² /m ³)
Changement facile des membranes	Investissement relativement élevé
Visualisation du perméat	

II.5.3.2. Modules spiraux

Les membranes planes sont enroulées en spirale autour d'un tube creux et perforé qui va recueillir le perméat. Entre les membranes, un grillage plastique de 0,8 à 1,2 mm d'épaisseur est placé, et qui a pour but la création d'une turbulence dans la circulation du fluide. 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 (la figure II.9)

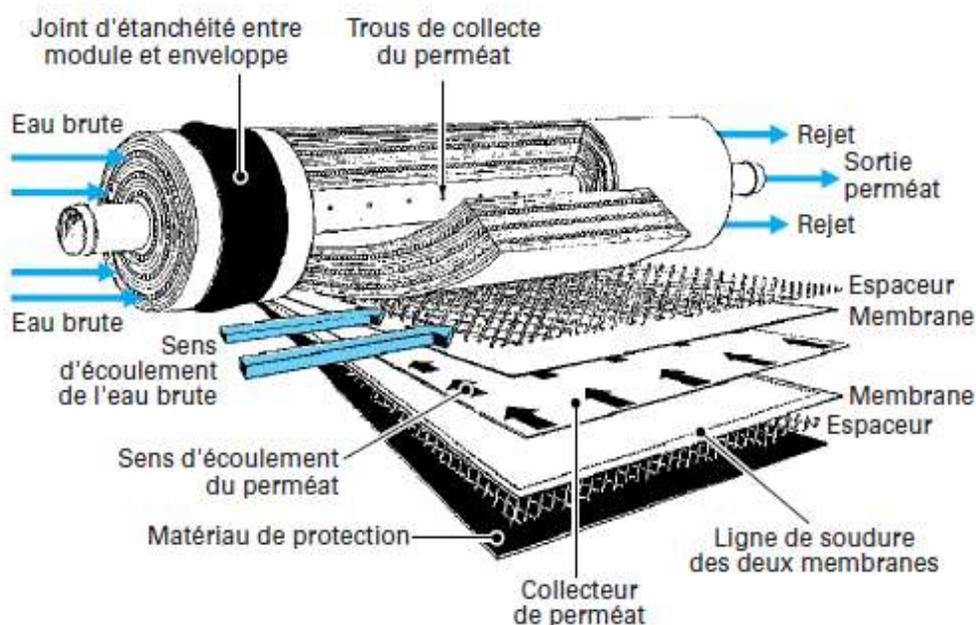


Figure II. 9 : Modules spirales [3].

Dans le tableau suivant (II.2) on dévoile les avantages et les inconvénients de ces modules.

Tableau II. 2 : Avantages et inconvénients des modules spirales [4].

Avantages	Inconvénients
Compacité élevée (300 à 1000 m ² /m ³)	Sensible au colmatage
Faible volume mort	Difficulté de nettoyage
Coût d'investissement relativement faible	

II.5.3.3. Modules tubulaires

Ce module est composé de tubes métalliques ou plastiques sur lesquels est fixée la membrane semi perméable. Le diamètre du tube varie entre 8 et 25 mm et le plus souvent 12,5 mm. L'eau à traiter circule à l'intérieur des tubes et le perméat est collecté à l'extérieur des tubes.

Le tube est soit poreux, soit perforé de trous ce qui va permettre l'évacuation du perméat. La figure II.10 représente des coupes transversale et longitudinale des modules tubulaires

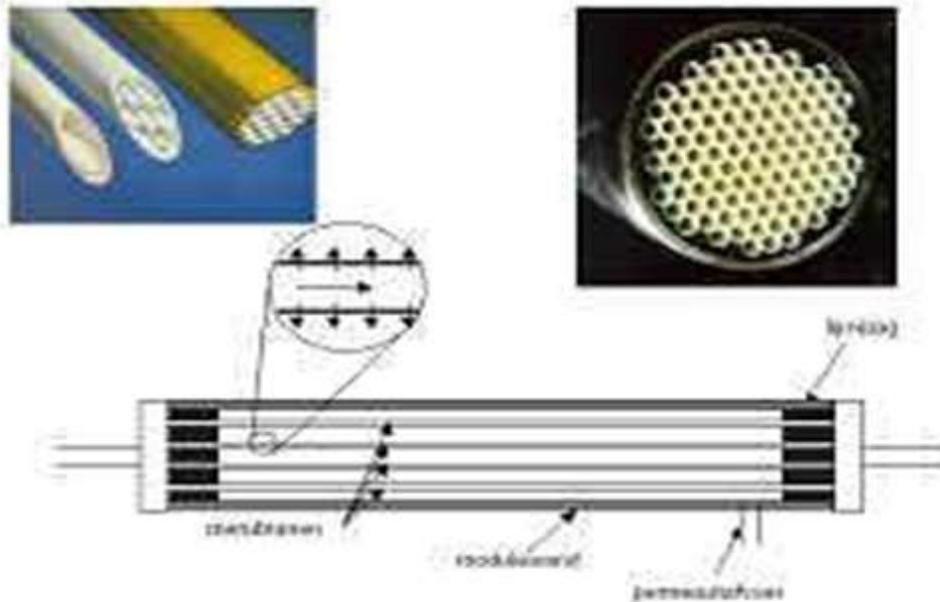


Figure II. 10 : Modules tubulaires [J].

Les avantages et les inconvénients des modules tubulaires sont représentés dans le tableau ci-joint

Tableau II. 3 : Avantages et inconvénients des modules tubulaires [4].

Avantages	Inconvénients
Technologie simple	Consommation d'énergie élevée
Peu traites tous types de fluides (charges, visqueux)	Faible compacité (10 et 300 m ² /m ³)
Facilite de nettoyage	Coût élevé

II.5.3.4. Modules fibres creuses

Les modules fibres creuses peuvent être considérés comme des modules tubulaires constitués de tubes de petits diamètres variant entre quelques dizaines de microns et quelques millimètres. Mais à la différence des modules tubulaires qui sont composés d'une membrane et d'un support inerte, les fibres creuses jouent le rôle de membrane et de support simultanément. Les schémas suivants (la figure II.11) représentent les modules fibres creuses.

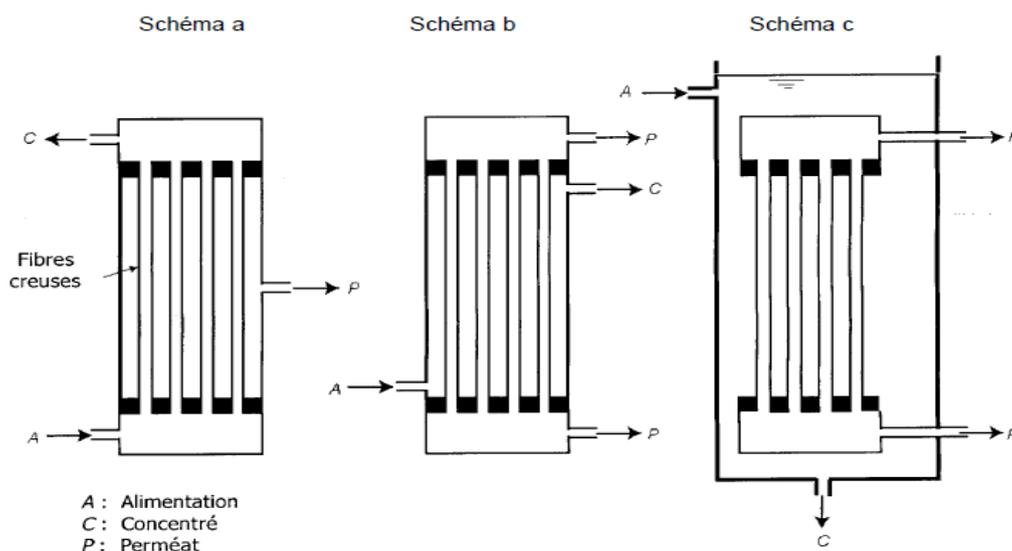


Figure II. 11 : Modules fibre creuses [43].

On distingue deux configurations :

- Int- Ext (schéma b) : L'eau à traiter circule à l'intérieur et le perméat est récupéré à l'extérieur des fibres.
- Ext-Int (schéma a et c) : L'eau circule à l'extérieur et le perméat est récupéré à l'intérieur des fibres.

Leurs avantages et inconvénients sont classés dans le tableau suivant :

Tableau II. 4 : Avantages et inconvénients des modules fibres creuses [4].

Avantages	Inconvénients
Compacité élevée ($15000 \text{ m}^2/\text{m}^3$)	Sensibilité de colmatage dû au faible diamètre des fibres
Faible volume mort	Fragiles (Canaux fins)
Faible consommation énergétique	
Possibilité de nettoyage à contre-courant	

II.5.4. Coût d'investissement et d'exploitation

Le coût du dessalement a diminué de moitié pendant la dernière décennie, avec cependant une hausse de prix récente, résultant de l'augmentation de coût des matières premières, dont l'acier inox. Sur le plan économique, les coûts d'investissement varient de 1000 à 1200 €/m³/j pour la distillation en thermique MED, et de 900 à 1000 €/m³/j pour l'Osmose Inverse. Le

coût de l'eau saumâtre dessalée est nettement moins cher à celui de l'eau de mer dessalée. Il est, pour de grandes unités, à 0,2 à 0,3 €/m³ en eau saumâtre contre 0,4 à 0,6€/m³ en eau de mer (Source Constructeurs, coûts vérifiés). L'effet de taille diminue le coût de l'eau douce obtenue, d'où l'intérêt de construire des installations de capacité importante, si la demande le justifie et en veillant aux impacts environnementaux. Il est également important de rappeler que le coût de mobilisation d'un mètre cube d'eau conventionnelle est compris entre 0,1 et 0,3 €/m³ et celui de la réutilisation des eaux usées entre 0,3 et 0,5 €/m³ 4. L'eau dessalée pour de grandes unités coûte donc environ 2 fois plus que l'eau conventionnelle et 1,5 fois plus que l'eau réutilisée, mais avec des grandes différences selon les situations de terrain. A capacité identique, le recyclage des eaux usées est nettement moins coûteux que le dessalement d'eau de mer (l'énergie dépensée est réduite au moins de moitié) [44].

II.5.5. Les Avantages et Les inconvénients de l'osmose inverse

II.5.5.a. Avantages

Le processus de l'osmose inverse procure l'obtention d'une eau pure possédant des mesures bio électroniques parfaites pour la santé, pratiquement identiques qu'à celles des eaux de sources les plus naturelles avec :

- Une acidité légèrement élevée avec un pH de 6.6 (idéal pour la digestion, l'assimilation des aliments et rééquilibre de pH du sang généralement trop toxique) ;
- Capacité d'élimination de toxines dans le corps par les reins grâce à sa résistivité qui s'élève de 20000 à 30000 ohms ;
- L'eau obtenue est antioxydante, tandis que l'eau en bouteille est plus oxydée à cause du délai souvent trop long entre la mise en bouteille et la consommation ;
- L'énergie de l'eau osmosée (7200 unités Bovis) est nettement supérieure à celle de l'eau en bouteille (5000) qui est en outre chargée de tous les rayonnements nocifs qu'elle subit pendant son transport et dans les lieux de stockage.

II.5.5.b. Inconvénients

- Les membranes sont de courte durée de vie environ 3 ans ;
- Une consommation énorme d'énergie ;
- Les pertes en eau : le rendement n'est que de 75% et ainsi 25% de saumure (solution aqueuse très concentrée en sel) restent à la fin et sont inutilisables ;
- L'eau osmosée n'est pas pure à 100% [K].

On peut procéder au dessalement avec plusieurs techniques et processus qui sont toujours en

évolution de plus en plus. Or, chaque technique est une épée à double tranchant offrant son lot de solutions et pouvant engendrer également différents inconvénients, du coup, le choix du procédé doit alors dépendre de plusieurs facteurs à la fois techniques et économiques, chercher le rapport qualité/prix est incontournable afin de tirer un résultat optimal et un meilleur parti du dessalement.

II.6. Conclusion

Le principal inconvénient de la distillation est le coût élevé de ce procédé. En effet, cette technique consomme énormément d'énergie (chauffer l'eau, faire venir du gaz, du pétrole ou encore de l'électricité jusqu'à l'usine). Et d'où l'augmentation du prix de l'eau chaque m³ d'eau. Si la station de distillation se trouve près d'une source d'énergie alors ce procédé devient très rentable. Cependant, même si le prix de ce procédé est vraiment coûteux, il demeure le moins cher de tous les procédés. Ainsi, l'avantage est qu'à une température de plus de 100°C, tous les microbes sont éradiqués.

La filtration membranaire est de plus en plus utilisée comme procédé de séparation dans de nombreux domaines notamment dans le cycle de l'eau (l'adoucissement, dessalement ...). La filtration membranaire est basée sur l'application d'une différence de pression qui transfère le solvant à travers une membrane dont la taille des pores assure la rétention de solutés. Ces processus, classés selon une taille des pores décroissante, sont : la microfiltration, l'ultrafiltration, la nanofiltration et l'osmose inverse. Ce sont des procédés matures technologiquement (une bonne part du développement technologique est déjà réalisé) mais encore en plein développement industriel. Par exemple, dans le domaine de la potabilisation de l'eau, la capacité de production des plus grosses usines est dix fois plus tous les 5 ans [45].



Chapitre III

Présentation ET

Description De

La Station De

Dessalement De

Honaine

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

III.1. Situation géographique

Le site de l'usine de dessalement d'eau de mer, est localisé au niveau de la Zone d'Extension Touristique Tafsout (ZET) de la commune de Honaine, Daïra de Honaine, à 64 km du chef-lieu de la wilaya de Tlemcen. La commune de Honaine, chef-lieu de daïra, s'étend sur une superficie de 57 Km², elle se situe au Nord-Ouest de la ville de Tlemcen. Elle est limitée :

- ❖ Au Nord par la mer méditerranée ;
- ❖ A l'Est par la commune de Beni Khellad ;
- ❖ A l'Ouest par la commune Dar Yaroumracen ;
- ❖ Au Sud par les communes de Nedroma et Beni Ouarsous



Figure III. 1 : Limites administratives de la Commune [46].

la moitié de ses actions dans MBH à l'ADE, et que GEIDA pourra aussi céder à COFIDES une part de ses actions dans le capital de MBH, tout en restant actionnaire majoritaire.

III.3. Structure du projet

Le projet consiste en une usine de dessalement d'eau de mer par osmose inverse (200.000 m³/j) qui est situé au bord de la côte méditerranéenne au niveau de la zone de TASEFOUT commune de Honaine. À environ 65 km du chef-lieu de la wilaya de Tlemcen.

Les prévisions pour la construction de cette station de dessalement sont de vingt quatre mois [46]. L'usine de dessalement de Honaine a été conçue sur la base des objectifs généraux suivants :

- Durée technique de 25 ans ;
- Concevoir, construire et exploiter une usine de dessalement d'eau de mer qui produira 200.000 m³/j d'eau potable ;
- Utiliser pour ce projet l'osmose inverse (OI) comme procédé de dessalement ;
- Produire une eau traitée répondant aux paramètres spécifiés dans le cahier des charges ;
- Réaliser une distribution correcte des divers éléments de l'installation en fonction de la séquence logique du procédé, des caractéristiques topographiques et géotechniques du terrain et de l'obtention des frais d'exploitation et de maintenance les plus réduits possible ;
- Pourvoir les installations d'une flexibilité suffisante pour faciliter les manœuvres d'opération et de maintenance ;
- Intégrer l'usine de dessalement dans les terrains disponibles de sorte à former un ensemble harmonieux, tant concernant les équipements mécaniques que concernant la finition et l'esthétique des bâtiments et du reste des installations et de génie civil ;
- Minimiser l'impact visuel des installations pour garantir leur pleine intégration dans le milieu ambiant dans les meilleures conditions ;
- Définir le plus précisément possible les travaux, équipements et installations ;
- Optimisation de la conception et de l'exploitation pour parvenir à un coût du mètre cube le plus économique possible ;
- Assurance de sécurité du personnel et des équipements ;
- Protection de l'environnement.

Les caractéristiques techniques de la station de dessalement d'eau de Honaine sont énumérées sur le tableau III.1 suivant :

Tableau III. 1: Caractéristiques techniques de Station de Dessalement d'eau de mer de Honaine [46].

Paramètre	Unité de mesure	Valeur
Production d'eau	m ³ /j	200 000
Superficie totale	m ²	58 485
Prise d'eau de mer	m ³ /h	17.729
Salinité de l'eau de mer	ppm	36.700
Volume d'eau rejetée	m ³ /h	9.663
Qualité de l'eau	ppm	484
Température de l'eau rejetée	°C	17
Taux de rendement de dessalement	%	45.49
Durée de la construction	Mois	24
Coût	Millions d'USD	230
Type de prise d'eau de mer : Emissaire sous-marin		
Type de décharge de saumure : Emissaire sous-marin		

- **Superficie totale** : 58,485 Ha ; Surface bâtie : 21,754 Ha.
- **Nature de la construction** : Bâtiment de production ; réservoir d'eau dessalée ; voirie et espace vert ; sous station électrique ; Institut de formation.

III.4. Installations principales :

Le projet de la SDEM de Honaine consiste en la réalisation de la station de dessalement de l'eau d'eau de mer et un institut de formation. La ligne de traitement élaborée pour la station comprend les étapes suivantes :

1. Captage de l'eau de mer/pompage à basse pression et acheminement vers l'Usine.
2. Dosage de l'hypochlorite de sodium.
3. Dosage de dioxyde de carbone.
4. Dosage de chlorure ferrique et de poly électrolyte.
5. Filtration ouverte.
6. Pompage intermédiaire.

7. Système de nettoyage des filtres.
8. Dosage de produit réactif inhibiteur « anti scalant ».
9. Filtrage de cartouches.
10. Dosage de bisulfite de sodium.
11. Pompage haute pression.
12. Modules d'osmose inverse.
13. Système de récupération de l'énergie de la saumure.
14. Système de déplacement et nettoyage chimique des membranes.
15. Système de post-traitement de l'eau produite.
16. Désinfection finale à l'aide d'hypochlorite de sodium.
17. Pompage de l'eau produite.

III.5. Description du process utilisés dans le traitement des eaux

III.5.1. Pompage de l'eau de mer

L'eau de mer de Honaine présente les caractéristiques indiquées dans le tableau III.2

Tableau III. 2 : Caractéristiques de l'eau de mer à traiter [46].

Paramètres	Unité	Minimum	Maximum	Conditions du site de référence (CSR)
Température	°C	17	24	24
Total des matières solides dissoutes (TDS)	mg/l	35 000	39 000	37 000
Total matières solides en suspension (TSS)	mg/l	1	10	-
Pétrole et hydrocarbures	mg/l	N/A	< 0,05	-
Chlorure	mg/l	19 000	22 000	-
Calcium	mg/l	N/A	490	-
Sulfate	mg/l	N/A	3200	-
Strontium	mg/l	N/A	10	-
Barium	mg/l	N/A	0,3	-
Magnesium	mg/l	N/A	1550	-
Bore	mg/l	N/A	5	-

Le captage de l'eau de mer de Honaine se fait directement de la mer au moyen de deux tuyauteries prenant appui sur le fond marin, d'un diamètre de 1 200 mm chacune.



Figure III. 3 : Tour de captage d'eau en cours de construction [46].

III.5.2. Le Prétraitement

Cette étape comporte deux types de pré-traitements : Physiques et chimiques qui sont faites en même temps :

III.5.2.1. Le pré-traitement physico-chimique

C'est un traitement destiné à éliminer fondamentalement les éléments solides, les algues et la matière organique, par le passage de l'eau de mer à travers des filtres à sable et anthracite et à travers des filtres à cartouches. Le mouvement de l'eau dans ces filtres est vertical, pénétrant par la partie supérieure du filtre et descendant à travers les couches filtrantes qui retiennent les matières solides dans sa partie inférieure. Des collecteurs munis de buses recueillent l'eau filtrée.

A- Filtration à sable et charbon

Une distribution de 80 filtres, bicouches sable anthracite avec une granulométrie différente, a été conçue (divisée en quatre lignes) d'une surface unitaire de filtration de 11 857 m². Ce

système élimine la plupart des particules en suspension, huile et graisses qui restent dans l'eau de mer et, produit une eau filtrée à basse turbidité prête pour l'étape d'osmose inverse (La Figure III.4).



Figure III. 4 : Filtres à sable et anthracite.

Le mouvement de l'eau dans ces filtres est vertical, pénétrant par la partie supérieure du filtre et descendant à travers les couches filtrantes qui retiennent les matières solides dans sa partie inférieure. Des collecteurs munis de buses recueillent l'eau filtrée.

Ce système de filtration comporte 80 filtres répartis en deux phases :

La première phase est constituée de 48 filtres contenant chacun :

- Une couche supérieure de 600 mm de hauteur de lit de l'anthracite et de charbon de 0.4 à 1.6 mm de taille effective ;
- Une couche intermédiaire de 400 mm de hauteur de lit de sable de 0.4 à 0.8 mm de taille effective ;
- Une couche inférieure comporte à la fois 100 mm de charbon de 1.4 à 2.5 mm et 100 mm de sable de lit 4 à 8 de taille effective.

- La deuxième phase est constituée de 32 filtres contenant :

- Une couche supérieure de 700 mm de hauteur d'anthracite de 0.4 à 0.8 mm de diamètre ;

- Une couche intermédiaire de 200 mm de hauteur de lit de sable de 0.55 mm de taille effective et de 1.4 de coefficient d'uniformité ;
- Une couche inférieure comprenant 100 mm de sable de 2 mm et de taille effective et de 1.4 de coefficient d'uniformité [47].

N.B : Les deux types de filtres sont soumis à un système de lavage.

B- Filtration à cartouches

Une fois que l'eau d'appoint a reçu les dosages des réactifs appropriés et qu'elle a été filtrée, elle est conduite vers le processus de microfiltration. Au total, il y aura 22 filtres avec 290 cartouches chacune, dont 10 seront ceux qui filtrent l'eau d'alimentation aux pompes de haute pression et 12 filtreront le courant d'alimentation aux récupérateurs d'énergie. Ces filtres sont renouvelés après une période moyenne de 171 jours d'utilisation.



Figure III. 5 : Filtres à cartouches.

L'eau filtrée produite est stockée dans un réservoir fermé. À partir de ce réservoir, cette eau est utilisée pour alimenter les unités d'osmose inverse ; une autre partie est utilisée pour le rinçage et le nettoyage des filtres à sable. Ces derniers subissent l'accumulation des matières solides qui provoquent une augmentation de la résistance à l'écoulement ainsi que la diminution de la production d'eau filtrée. Un barbotage avec l'air est introduit afin d'améliorer l'efficacité du lavage par inversion du flux de bas en haut.

- Il est réalisé en moyens d'addition de produits chimiques qui sont : Hypochlorite de sodium, chlorure ferrique, dioxyde de carbone (Acide sulfurique comme produit de remplacement éventuel du dioxyde de carbone), métabisulfite de sodium, Hydroxyde de sodium et inhibiteur Ci-dessous les étapes de prétraitement réalisées au niveau de la SDEM de Honaine :

➤ **Chloration**

Une chloration de l'eau brute est effectuée moyennant un dosage d'hypochlorite de sodium dans l'émissaire sous-marin et dans la chambre d'aspiration des pompes.

➤ **Coagulation-Floculation**

Pour l'étape de coagulation-floculation, les pompes d'eau de mer seront utilisées comme dispositif de mélange pour le coagulant (chlorure ferrique).

➤ **Dosage de dioxyde de carbone**

Il est installé un équipement doseur de dioxyde de carbone destiné à réduire le pH d'eau de mer et à éviter les précipitations de carbonates et de bicarbonates.

➤ **Dosage de bisulfite de sodium**

L'addition de ce produit a pour objet d'éliminer le chlore résiduel du dosage d'hypochlorite de sodium.

➤ **Dosage d'inhibiteur « anti-scalant »**

Afin d'éviter la précipitation des sels de sulfate de calcium et de strontium, d'hydroxyde ferrique et de fluorure de calcium, dans les membranes, on dosera un inhibiteur dont l'action est destinée à empêcher la formation des réseaux cristallins, en maintenant les ions dispersés et en permettant de dépasser la limite du produit de solubilité de ces sels.

➤ **Dosage d'hydroxyde de sodium**

L'addition de ce produit a pour objet la réduction du bore de telle manière qu'à la sortie de l'usine, la concentration de l'eau traitée en bore soit ≤ 1 mg/l.

III.5.3. L'étape d'osmose inverse

Le dessalement de l'eau de mer est réalisé par son passage à travers le système d'osmose inverse ; étape clé du processus suscitée. Cette étape est constituée de 10 unités (Racks) (la Figure III.6).



Figure III. 6 : Photo de l'étape d'osmose inverse (SDEM-Honaine).

Chaque unité est composée de :

- Un châssis à membrane ;
- Une pompe à haute pression ;
- Une pompe de recirculation ;
- Un système de récupération de pression (ERIS).

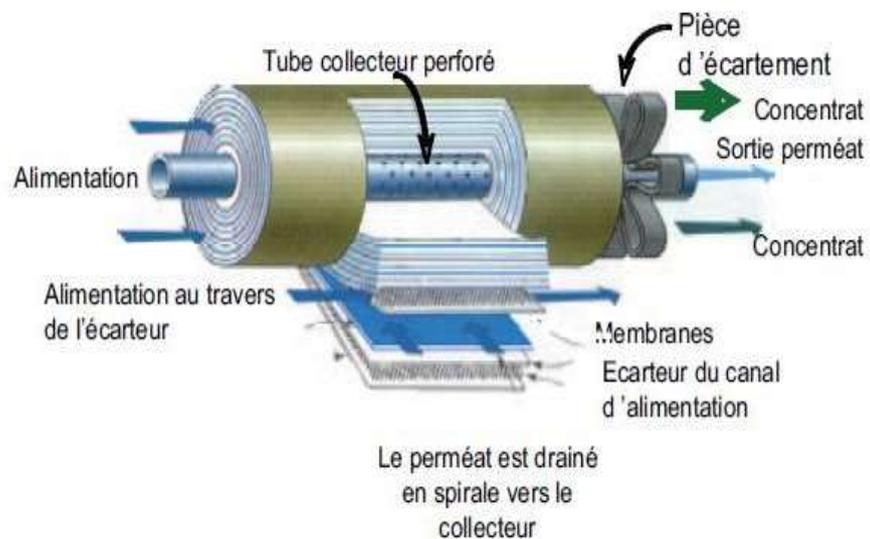
III.5.3.A. Le châssis à membrane

Un châssis à membrane (la figure III.7) se compose de 222 modules avec 7 membranes/module de type «SWC5 max, Hydranautics ». Ces membranes de type spiralé (la figure III.7) sont composées de :

- Une couche de polyamide à 0.15 μm ;
- Une couche de poly-sulfone à 40 μm pour supporter la couche polyamide ;
- Une couche de polyester qui donne une certaine résistance mécanique de la membrane à 100 μm .



Figure III. 7 : Un châssis à membrane (châssis n°05).



Description
d'un module spiralé
d'osmose inverse.

Figure III. 8 : La membrane spirale de l'osmose inverse [48].

III.5.3.B. La pompe à haute pression

Elle permet de fournir une pression jusqu'à 70 bars en vue d'alimenter l'osmose inverse. Cette dernière peut être de types « segmenté », « chambre partie », et autres, etc... [47].



Figure III. 9 : Photo d'une pompe à haute pression.

III.5.3.C. La pompe de recirculation

Dans le but de compenser les pertes de charge produites dans les membranes et la tuyauterie, la station doit être dotée d'une pompe de recirculation pour augmenter la pression de l'eau de mer provenant du système de récupération d'énergie (px) avant l'arrivée du flux d'eau de mer provenant de la pompe centrifuge à haute pression. [47].



Figure III. 10 : Pompe booster.

III.5.3.D. Le système de récupération de pression (ERIS)

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

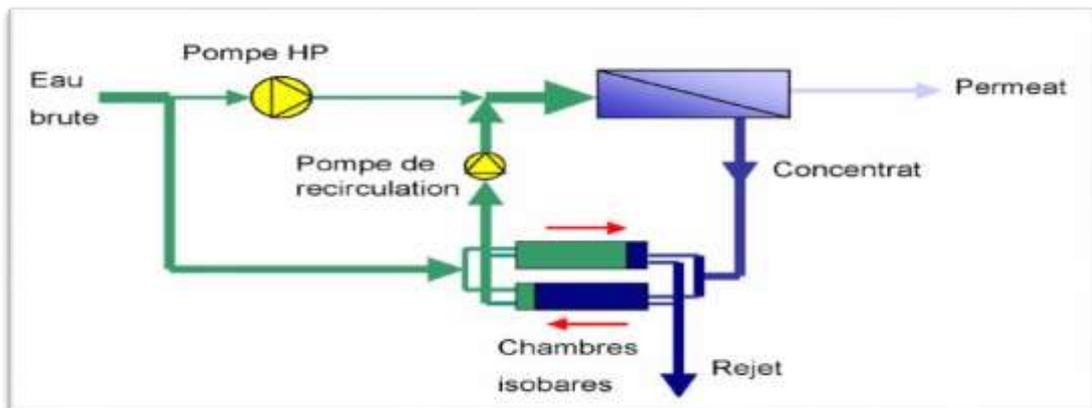


Figure III. 11 : Schéma de la récupération d'énergie [49].



Figure III. 12 : Les ERIS (système de récupération de pression).

III.5.4. Le Post-traitement

Cette étape comprend :

- Une reminéralisation de l'eau dessalée et
- Un stockage de l'eau traitée

a) Reminéralisation de l'eau dessalée :

La reminéralisation sera réalisée avec un lait de chaux sur deux lignes indépendantes, avec un apport de dioxyde de carbone. Ces deux produits seront dosés dans des chambres, à l'entrée du réservoir d'eau produite.

b) Réservoir d'eau traitée :

Pour le stockage de l'eau traitée, il est placé dans l'usine un réservoir de 20.000 m³ construit en béton armé. Ce dernier est destiné à accueillir l'eau déminéralisée issue de l'osmose inverse. Cette eau dessalée est utilisée aussi pour rincer les membranes d'osmose inverse en cas de colmatage. Le réservoir est divisé en deux compartiments qui peuvent être isolés l'un de l'autre à l'objet de pouvoir faire la maintenance.



Figure III. 13 : Photo du réservoir de stockage de l'eau produite.

III.6. Caractéristiques de l'eau traitée :

Les valeurs garanties pour l'eau de mer traitée doivent être conformes aux paramètres indiqués sur le tableau III.3 suivants :

Tableau III. 3 : Valeurs garanties pour l'eau de mer traitée par la SDEM de Honaine [46].

Paramètres	Valeurs limites
pH :	8,4
Indice de Langelier :	0 - 0,4
Alcalinité :	60,20 mg/l de CaCO ₃ (meq/l)
Dureté totale :	83,10 mg/l de CaCO ₃ (8,31 f°)
Matière totale Dissoute :	150 < MTD < 500 mg/l
Bore :	≤ 1 mg/l (valeur annuelle moyenne)

III.7. Equipements auxiliaires de la station sont :

- Equipement de nettoyage des membranes ;
- Equipement de nettoyage des filtres ;
- Système anti-incendie ;
- Système de communications ;
- Laboratoire ;
- Tuyauterie et accessoires ;
- Equipement de bureau ;
- Système de climatisation ;
- Système de contrôle ;
- L'éclairage ;
- Matériel électrique.

III.8. Traitement des rejets liquides :

Les différents rejets de l'usine seront traités comme suit :

- **Eaux résiduelles :** Il est prévu une station d'épuration monobloc.
- **Solution de nettoyage chimique :** La solution de nettoyage chimique sera neutralisée dans les mêmes réservoirs de préparation de la solution une fois que le cycle de nettoyage terminée.

- **La saumure :** Une partie de la saumure produite dans le processus de dessalement est utilisée pour le nettoyage des filtres à sable. La quantité de la saumure qui reste est versée dans la mer à travers de l'émissaire de saumure.



Figure III. 14 : la saumure au niveau de SDEM HONAINE.

- **Saumure de nettoyage des filtres :** La saumure utilisée pour le nettoyage des filtres est conduite jusqu'au réservoir de saumure où elle se mélange avec le reste de la saumure provenant de l'osmose inverse, en diminuant de cette façon sa concentration en solides dissoutes.

III.9. Institut de formation :

La station de dessalement de l'eau de mer de Honaine sera dotée d'un institut de formation qui est le premier sur le territoire national.



PARTIE 02

ETUDE EXPERIMENTALE





Chapitre IV :

Matériel ET

Méthodes

IV.1. Analyses physico-chimiques des eaux traitées

Des analyses physico-chimiques sont faites au niveau de la SDEM de Honaine. Nous commençons tout d'abord par l'analyse de l'eau de mer (eau brute), ensuite nous passerons à l'entrée de la production en effectuant le test anti scalant et un paramètre hydraulique (le SDI). L'eau du perméat sera contrôlée (surtout le pH et la conductivité) et les résultats vérifiés avec les normes de potabilité de l'eau, les sont faites horairement au niveau du laboratoire de cette station.

IV.1.1. Prélèvement et échantillonnage

IV.1.1.1. Sites de prélèvements

Il Ya différentes étapes de prélèvement dans la station de dessalement de l'eau de mer de Honaine :

- Au niveau de la prise d'eau de mer ;
- Avant la filtration à sable et anthracite ;
- A l'entrée production après la filtration à cartouche (Avant l'étape d'osmose inverse) ;
- Au niveau de réservoir de l'eau traitée ;

IV.1.1.2. Mode de prélèvement

Le prélèvement d'un échantillon d'eau pour l'analyse physico-chimique est soumis à la procédure suivante :

- Les flacons doivent être propre, mais n'est pas nécessairement stérilisés (sauf pour les analyses micro biologiques), on a utilisé des bouteilles en plastique de 500 ml, de 1litre, ou 1.5l et parfois des bouteilles en verre qui sont au préalable rincé avec de l'eau distillée au trois fois au minimum.
- Il faut laisser couler l'eau a un débit maximal pendant 4-8 secondes et ensuite 3-5 minute à débit moyen avant de prélever un échantillon.
- Ouvrir l'emballage, le remplir et le fermer instantanément.

Nous avons effectué quelques prélèvements au cours des mois de mars et avril 2019 pour effectuer des analyses des paramètres physico-chimiques tels que : température, pH, conductivité, calcium, salinité (TDS) ..., au niveau et avec le personnel du laboratoire de contrôle de la qualité de la station de dessalement de Honaine, qui est opérationnel quotidiennement pendant 12 heures à partir de 10h de matin.

IV.1.3. Paramètres physicochimiques :

IV.1.3.1. Mesure de la Température

La lecture de la température de l'eau de la station de dessalement se fait par un thermomètre numérique qui est introduit directement au niveau de la canalisation. Cette mesure est applicable sur eau brute, eau filtrée, eau d'osmose, eau traitée et l'eau de rejet. Et on peut faire aussi ces mesures sur les échantillons à l'aide d'un appareil multi-paramètres (HANNA, combo, waterproof) au niveau du laboratoire.



Figure IV. 1 : Thermomètre.

IV.1.3.2. Mesure du pH

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

Avantages du PH 25

- Très facile à utiliser.
- Résistant aux coups et aux chutes.
- Forme ergonomique.
- Longue durée des piles.
- Clavier pour utilisation industrielle.
- Prix très compétitif.

Matériels et réactifs :

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



Figure IV. 2 : Les solutions tampons de pH.

Fonctionnement :

Le logiciel du PH 25 est similaire à celui des autres appareils portables CRISON, et il a été conçu pour simplifier au maximum l'utilisation de la nouvelle gamme d'appareils.

Mode opératoire :

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



Figure IV. 3 : pH mètre (PH 25) au niveau de laboratoire de station de Honaine.

IV.1.3.3. Mesure de la Turbidité :

À l'aide d'un Turbidimètre (HANNA, Hi 93703) étalonné à trois points entre 0,10 et 500 NTU, on mesure de la turbidité de l'échantillon avec des cubes en verre bien nettoyés et bien séchés, remplis de l'eau à analyser et le résultat est affiché en NTU.



Figure IV. 4 : Turbidimètre.

IV.1.3.4. Mesure de la conductivité

Généralité :

La conductivité est mesurée par un conductimètre multi-paramètres (HANNA, HI 991300) à électrode constitué de deux lames carrées de platine de 1cm² de côté.

Matériels et réactifs :

- Un Becher.
- Conductimètre.
- Solution d'étalonnage.

Mode opératoire :

Après l'étalonnage le conductimètre ; mettre ensuite environ 100mL d'eau à analyser dans un bécher, dans lequel on plonge l'électrode du conductimètre pour mesurer la conductivité exprimée en $\mu\text{s}/\text{cm}$.

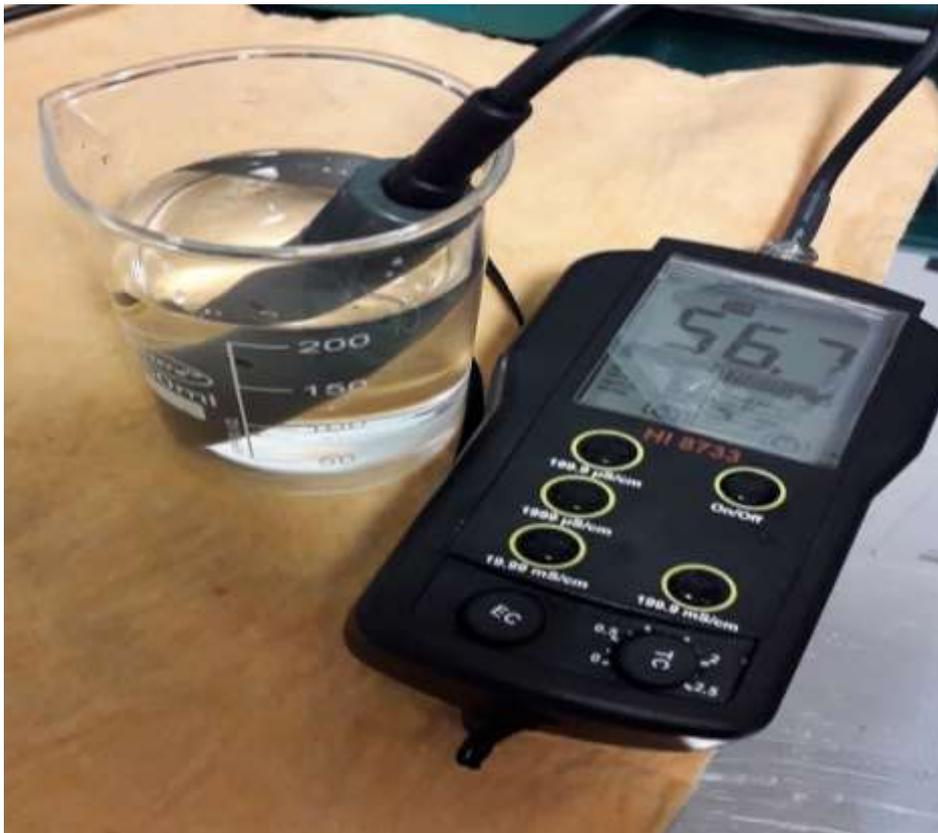


Figure IV. 5 : Conductimètre.



Figure IV. 6 : Les solutions tampons de conductivité.

IV.1.3.5. Mesure de l'Alcalinité

IV.1.3.5.1. Titre alcalimétrique simple :

Le titre alcalimétrique correspond à la somme des concentrations des ions carbonates (CO_3^{2-}) et des ions hydroxydes (OH^-). Le titre alcalimétrique d'une solution (noté T.A.) est égal au volume, exprimé en millilitres, de solution d'acide chlorhydrique à la concentration molaire $c = 0,020 \text{ mol.L}^{-1}$, nécessaire pour titrer un volume $V = 100 \text{ mL}$ de cette solution en présence de phénolphtaléine comme indicateur coloré de fin de réaction.

Matériels et Réactifs :

- Burette.
- Erlenmeyer.
- Solution d'HCL 0.02N.
- Solution de phénophtaléine 0.5%.

Mode opératoire :

Dans un Erlenmeyer de 250 mL, on prend un volume de 100 mL, et on ajoute 2 à 3 gouttes de solution phénophtaléine, on remarque une couleur rose révélée suite au changement du pH qui s'avère inférieur à 8.5. Titrer et agiter avec la solution de HCL de 0.02N jusqu'à décoloration complète de la solution, dans le cas contraire le TA est nul.

La formule pour calculer la dureté calcique est :

$$TA \text{ (meq/L)} = \frac{(N_{HCL} \times V_{HCL}) \times 1000}{V_0}$$

- N_{HCL} : normalité de HCL
- V_{HCL} : volume de HCL
- V_0 : volume de l'échantillon

IV.1.3.5.2. Titre alcalimétrique complet :

Le titre alcalimétrique complet d'une solution (noté T.A.C.) est égal au volume, exprimé en millilitres, de solution d'acide chlorhydrique à la concentration molaire $c = 0,020 \text{ mol.L}^{-1}$, nécessaire pour titrer un volume $V = 100 \text{ mL}$ de cette solution en présence de vert de bromocrésol comme indicateur coloré de fin de réaction.

Matériel et Réactif :

- Burette.
- Erlenmeyer.
- Solution d'HCL 0.02N.
- Solution de méthyle orange 0.2%.

Mode opératoire :

Dans un Erlenmeyer de 250 mL, on prend un volume de 100 mL, et on ajoute 2 à 3 gouttes de solution de méthyle orange, on remarque une couleur jaune. Titrer avec la solution de HCL de 0.02N à l'aide d'une burette, en agitant constamment, jusqu'au virage du jaune au jaune orange ($pH = 4.3$) de la solution.



Figure IV. 7 : L'essai de titrage de l'alcalinité.

La formule pour calculer la dureté calcique est :

$$\text{TAC (meq/l)} = \frac{(\text{N}_{\text{HCL}} \times \text{V}_{\text{HCL}}) \times 1000}{\text{V}_0}$$

- N_{HCL} : normalité de HCL
- V_{HCL} : volume de HCL
- V_0 : volume de l'échantillon.

IV.1.3.6. Mesure de la Dureté Total (TH) :

Généralité :

La dureté - ou titre hydrotimétrique - d'une eau est une grandeur reliée à la somme des concentrations en cations métalliques, à l'exception de ceux des métaux alcalins (Na^+ , K^+).

Rappels : Dans la plupart des cas, la dureté est surtout due aux ions calcium Ca^{2+} et magnésium Mg^{2+} (ions alcalino-terreux).

N.B : Un degré hydrotimétrique ($^{\circ}\text{TH}$) correspond à une concentration en ions Ca^{2+}

Ou Mg^{2+} égale à $\text{C} = 10^{-1} \text{ mmol. L}^{-1}$. Un degré hydrotimétrique correspond aussi à un degré Français (1°f).

Matériel et Réactif :

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

Mode opératoire :

On prend 50 mL d'eau et On ajoute 4 ml de la solution tampon de NaOH (pH = 9.5 à 10) et trois gouttes d'indicateur coloré Noir d'Eriochrome T (NET). On remarque une couleur rouge foncé ou violet. Dans cette étape on procède par agitation à une titration par la solution d'EDTA 0,02 N jusqu'au virage au bleu permet de mesurer la TH.

La formule qui exprime les résultats est :

$$TH (f^{\circ}) = \frac{((N_{EDTA} \times V_{EDTA}) \times 1000)}{V_0}$$

Avec :

- N_{EDTA} : normalité de EDTA,
- V_{EDTA} : volume de EDTA,
- V_0 : volume de l'échantillon.

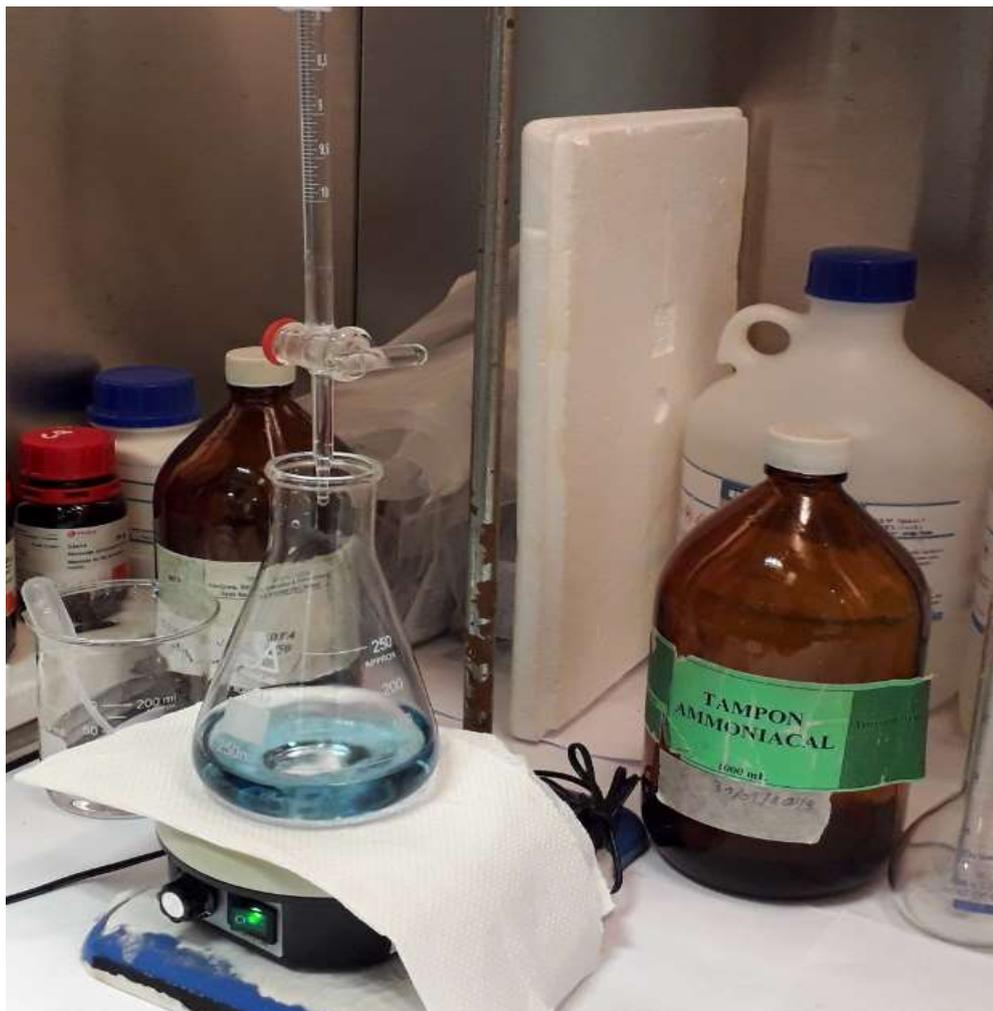


Figure IV. 8 : Titrage de la dureté.

IV.1.3.7. Mesure de calcium (Ca^{2+}) :

Pour déterminer la dureté calcique on utilise l'EDTA comme complexant, auparavant le dosage se fait à un pH élevé (12-14) où le magnésium est précipité sous forme $\text{Mg}(\text{OH})_2$ et n'intervient pas dans la réaction. Pour indiquer la présence de Ca^{2+} on utilise le calcione carboxylique ou le Murexide rouge [50].

Matériel et Réactif :

- Burette.
- Erlenmeyer.
- PH-mètre.
- Solution de NaOH.
- Murexide.
- Solution d'EDTA. 0.02 N.

Mode opératoire :

Dans un Erlenmeyer de 250 mL on prend 50 mL d'eau et on ajoute 3 ml de la solution NaOH (0.1N) et une pincée de Murexide, après on agite avec prudence pour homogénéiser la solution, on remarque un changement de couleur, du rose vers le mauve.

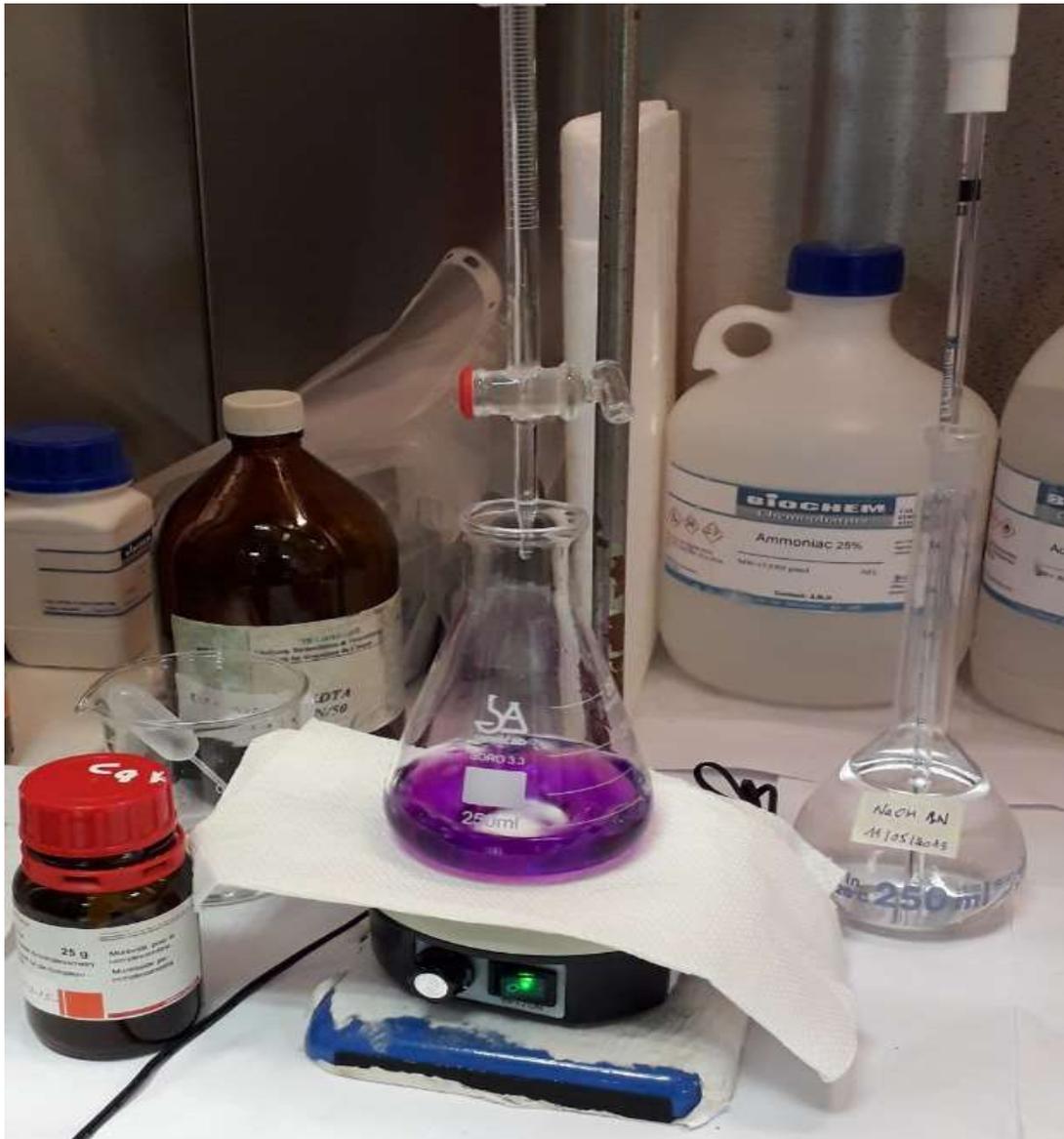


Figure IV. 9 : L'essai de Titrage de Ca^{++} .

La formule pour calculer la dureté calcique est :

$$\text{Ca}^{+2} \text{ (mg/l)} = \frac{((N_{\text{EDTA}} \times V_{\text{EDTA}}) \times 1000)}{V_0 \times 20}$$

Avec:

- N_{EDTA} : normalité de EDTA
- V_{EDTA} : volume de EDTA
- V_0 : volume de l'échantillon
- 20 : masse atomique de Calcium.

IV.1.3.8. Mesure de Magnésium (Mg^{2+}) :

Le magnésium estimé par la différence entre la dureté de l'eau et le calcium exprimé en $CaCO_3$ [50].

La formule pour calculer la dureté magnésienne est :

$$TH = D(Ca^{2+}) + D(Mg^{2+}) \quad \longrightarrow \quad D(Mg^{2+}) = TH - D(Ca^{2+})$$

IV.1.3.9. Mesure du chlore Cl^- :

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

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

Matériel et Réactif

- cuve propre.
- Colorimètre.
- Pipette graduée.
- Pastille DPD (chlore).

Mode opératoire (Méthode Colorimétrique)

On utilise un colorimètre, en on choisit la mesure du paramètre de chlore libre. Maitre 10 mL de l'échantillon dans une cuve propre et la mettre dans le colorimètre et étalonner ce dernier au 0mg/L, et 10 mL de l'échantillon dans une autre cuve propre et ajouter une pastille de DPD,

introduire la cuve dans le colorimètre et effectuer la lecture immédiatement. Le résultat (concentration du chlore libre) est exprimé en mg/L.



Figure IV. 10 : Mesure de chlore.



Figure IV. 11 : Chloromètre.

IV.1.3.10. Mesure des solides dissous totaux (TDS) :

La mesure de la concentration des solides dissous au niveau du laboratoire de la station de dessalement de Honaine se fait par le rapport entre conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et la concentration ionique (ppm), qui s'exprime par :

$$\text{Conductivité } (\mu\text{S}/\text{cm}) = K \times \text{TDS (ppm)}.$$

- Pour l'eau produite $K = 0,5$
- Pour l'eau de mer $K = 0,61$
- Pour la saumure $K = 0,7$

1 ppm = 1 mg/L correspond à la concentration en solide dissous. On peut trouver même valeur avec l'appareil multi-paramètre (HANNA, Hi 991300).

Matériels et réactifs :

- Un Becher.
- Conductimètre

Mode opératoire :

Dans un bécher on prend 100mL d'eau à analyser, et on introduit le conductimètre déjà étalonné, et on mesure Les TDS exprimée en mg/L.

IV.1.3.11. Mesure des matières en suspension (MES) :

Ce sont des particules solides très fines et généralement visibles à l'œil nu, théoriquement, elles ne sont ni solubilisées, ni à l'état colloïdale. Elles déterminent la turbidité de l'eau. Elles limitent la pénétration de la lumière dans l'eau, diminuent la teneur en oxygène dissous et nuisent au développement de la vie aquatique. Ces matières sont en relation avec la turbidité, leur mesure donne une première indication sur la teneur en matière colloïdale d'origine minérale ou organique.

Matériels et réactifs :

- Une membrane filtrante.
- L'étuve de 105⁰ C.
- Une balance sensible



Figure IV. 13 : Les membrane filtrantes.



Figure IV. 12 : L'étuve.

Mode opératoire :

On pèse le papier filtre soit (M1) mettre de dispositif de filtration en marche, le volume de la prise d'essai 100 ml. D'eau brute et on verse le tout sur le papier filtre mettre le papier filtre dans une étuve à 105 °C jusqu'à évaporation total de l'eau (pendant 2 heures).



Figure IV. 14 : Balance numérique.

Les concentrations de MES ont été au moyen de l'équation suivante :

$$\text{MES} = (M1-M2) 1000/V$$

Avec : M2 =la masse final (après le séchage)

M1= la masse initiale (avant le séchage)

V : Volume de l'eau filtrée (soit V= 100 ml)

IV.1.3.12. Mesure de l'indice de colmatage (SDI)

Pour cela, On procède par la mesure de l'encrassement d'une membrane d'acétate de cellulose de porosité 0,45 µm de préférence après 15 minutes de filtration de l'eau à analyser.

Matériels et Réactifs

- Manomètre de 0,5 bar ;
- Filtre de 0,45 µm (de diamètre 47 mm) ;
- Support pour filtre de diamètre 47 mm ;
- Vanne à aiguille pour régulation de pression.

Mode opératoire

On Place le filtre sur son support, l'humidifier et ajuster le joint torique. On Purge l'air du circuit et on fixe le support en position verticale par rapport à la membrane. On Ajuste la pression à 2,1 bars et mesurer le temps t nécessaire pour la filtration de 500 ml d'eau (ce temps doit être $>$ à 10 secondes). Si la pression varie de $\pm 5\%$ pendant la mesure, il faut recommencer la procédure. En Laissant le filtre en place et en fonctionnement, en réajustant la pression si nécessaire d'une façon régulière.

Après 15 minutes, on mesure par le chronomètre le temps t nécessaire pour filtrer 500 ml en contrôlant la pression de 2,1 bars.

Isoler le filtre et retirer la membrane qui est conservée en vue d'analyses complémentaires éventuelles. La formule pour calculer l'indice de colmatage est :

$$SDI = \frac{t_f - t_0}{15 \times t_f} \times 100 \quad \text{avec :}$$

t_0 : Le temps pour remplir 500ml d'échantillon.

t_f : Le temps pour remplir 500ml après 15 min d'essai.

15 : La durée de découlement.

Le SDI dans la station est toujours entre : $0 < \text{SDI} < 3$

Donc c'est une eau non comatante et par conséquence elle peut être utilisée directement dans l'étape suivante qu'est l'osmose inverse.

IV.2. Paramètres hydrauliques

Les différents paramètres hydrauliques (pression, débit...) sont suivis dans la salle de contrôle de la station de Honaine à par des ingénieurs et des techniciens, cette salle donne des commandes et des équations à la salle d'osmose inverse qui contient 10 racks et nous avons choisi comme exemple le rack n°05 pour plus d'exactitude car les membranes de ces racks ont été rénovées récemment, et le prélèvement des paramètres (débit, pression...) Sont tenues quotidiennement à partir de 7h du matin.



Figure IV. 15 : le rack n°05

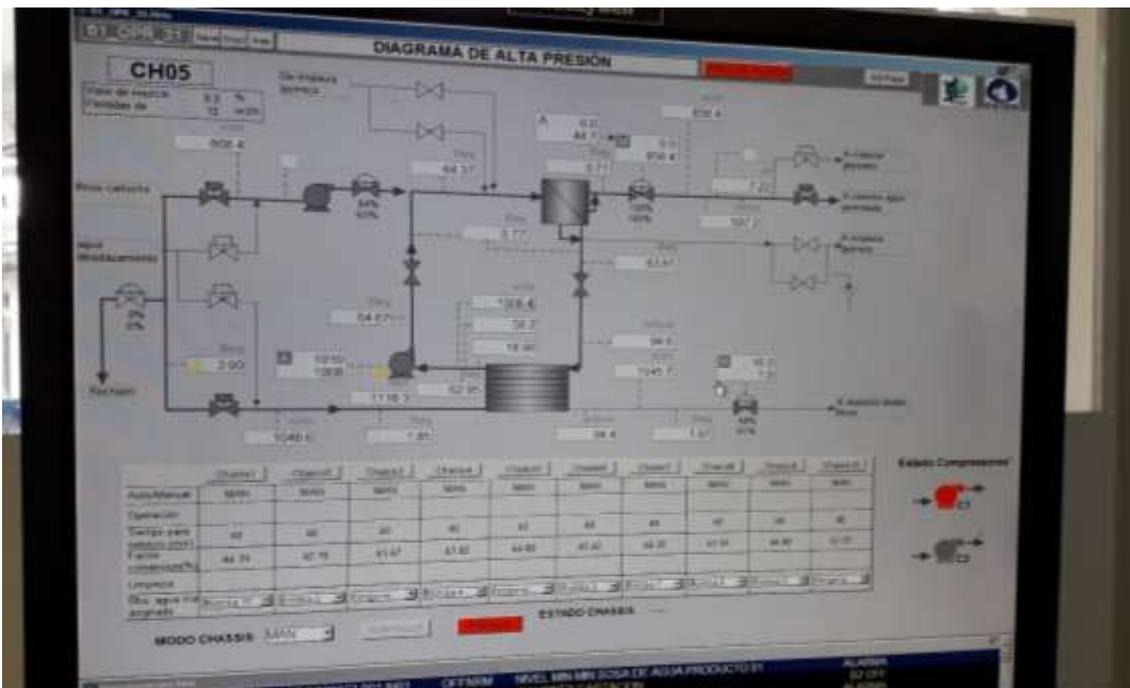
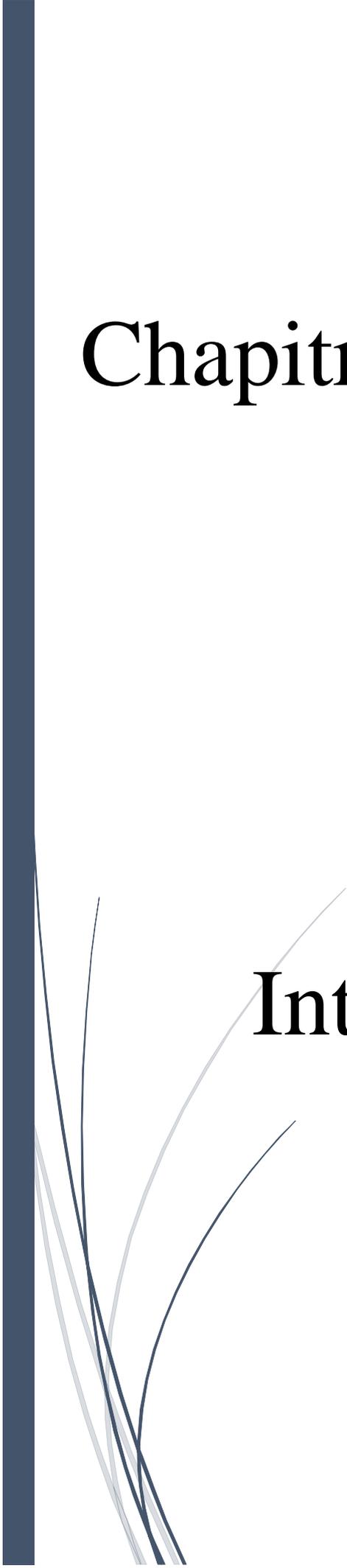


Figure IV. 16 : schéma de contrôle du rack n°05.

IV.2.1. Sites de contrôle

Il Ya deux étapes de contrôle nécessaires dans la station de dessalement de l'eau de mer de Honaine :

- A l'entrée de production après la filtration à cartouche (Avant l'étape d'osmose inverse).
- Avant l'étape d'osmose inverse.



Chapitre V :

Résultats

Et

Interprétations

V.1. Introduction

Dans le but d'évaluer les performances de fonctionnement de la SDEM de Honaine, une série de suivi de mesures ont été effectuées au niveau de cette station. Le travail expérimental a été réalisé sur une période d'environ 41 jours allant du 20/03/2019 jusqu'au 30/04/2019.

Les performances de fonctionnement de la SDEM ont été analysées sous deux aspects :

- Performances de fonctionnement hydraulique.
- Performances de traitement et qualité de l'eau.

La SDEM de Honaine compte au total 10 racks. Dans cette étude, certaines mesures ont été faites au niveau du rack n°05 dont les membranes ont été remplacées récemment.

V.2. Performances de fonctionnement hydraulique

Les paramètres hydrauliques suivis sont :

- Les principales caractéristiques des membranes (taux de conversion, taux de rejet, débit spécifique, ...)
- Les pressions exercées au niveau de la station (pression de la pompe haute pression, pression de la pompe booster, pression d'eau du perméat, pression du concentrat...) et
- Les débits (débit de refoulement de la pompe HP, débit total du perméat de la SDEM, débit d'alimentation de la station, débit du perméat du rack n°05...).

V.2.1. Taux de conversion totale de la station

Le taux de conversion (Y) est le quotient du débit de l'eau produit sur le débit de l'eau d'alimentation. Il est donné par la formule suivante. :

$$Y (\%) = \frac{Q_{\text{perméat}}}{Q_{\text{alimentation}}} \quad (1)$$

La figure V.1 présente les variations du taux de conversion au niveau de la SDEM de Honaine. Il est également représenté sur la même figure les variations du débit d'alimentation et celui du perméat.

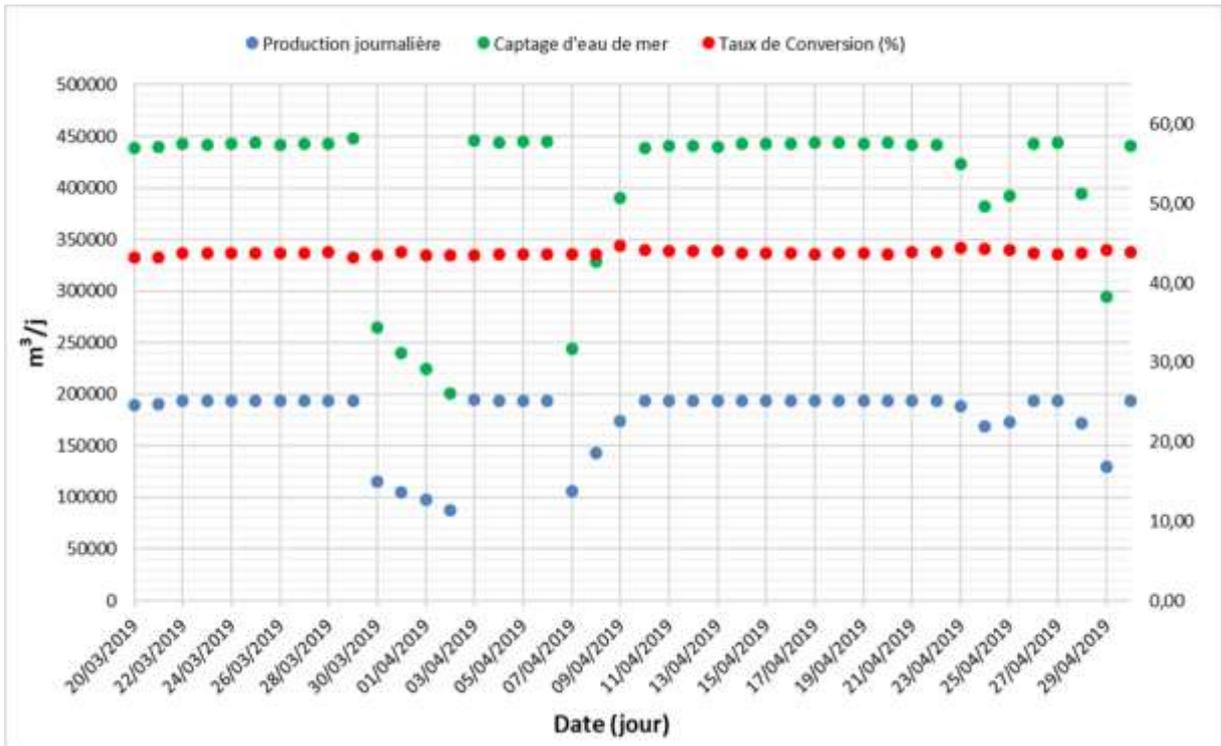


Figure V. 1 : Variation journalière du débit d'alimentation, débit produit et du taux de conversion dans la station (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

La SDEM de Honaine a été conçue pour assurer un taux de conversion de 45 % dans son état de fonctionnement normal. En examinant la figure V.1, on remarque que le débit de l'eau produite est proportionnel au débit de captage. Néanmoins, une chute de l'eau produite jusqu'à 87272 m³/j a été constatée du 29/03 au 04/04 et du 06/04 au 10/04, en raison des travaux de maintenance dans la ligne d'adduction et parfois à cause de la diminution de la demande par l'ADE.

V.2.2. Taux de rejet total de la station

Le taux de rejet des ions est défini comme étant le rapport de la concentration en sels du perméat C_p sur celle de l'eau d'alimentation (C_0). Il est exprimé par la relation ci-dessous :

$$R (\%) = \left(1 - \frac{C_p}{C_0}\right) \times 100 \quad (2)$$

La figure V.2 présente le taux de rejet total de la SDEM.

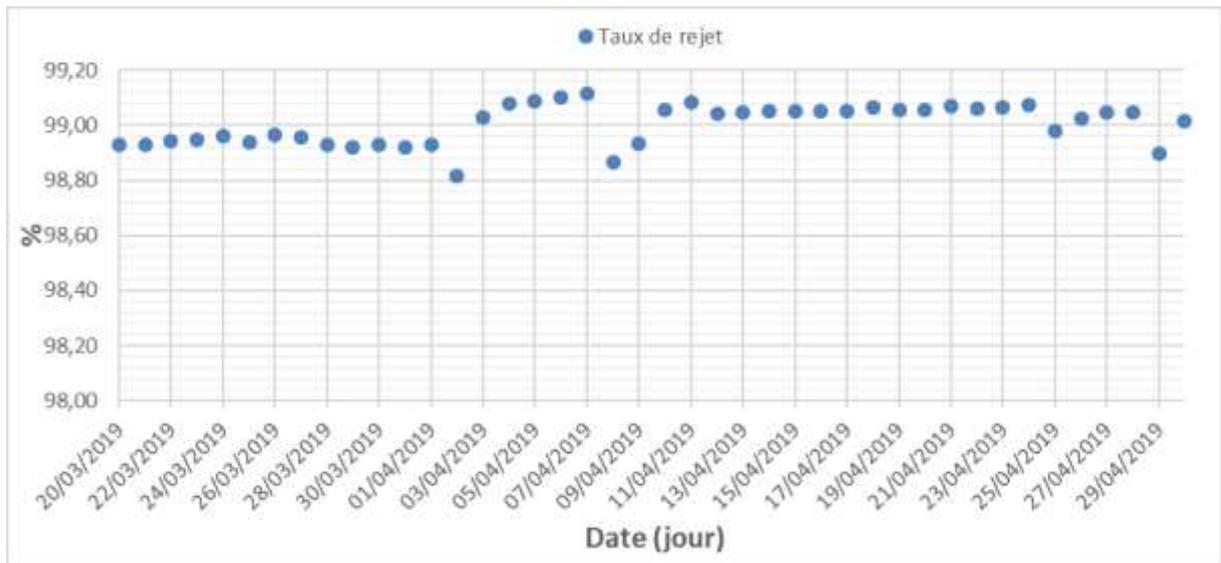


Figure V. 2 : Variation journalière de taux de rejet total de la SDEM (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

Selon les résultats obtenus (la figure V.2), on remarque que le taux de rejet en sel au niveau de la station de Honaine est au voisinage de 99 %. Cette valeur reste dans la gamme souhaitée par le personnel d'exploitation.

V.2.3. L'indice de colmatage (SDI)

Le colmatage est le phénomène par lequel un système poreux ou filtrant se retrouve obstrué, jointés, bouché, empêchant le passage du fluide qui pouvait le traverser.

La figure V.3 montre la variation de SDI

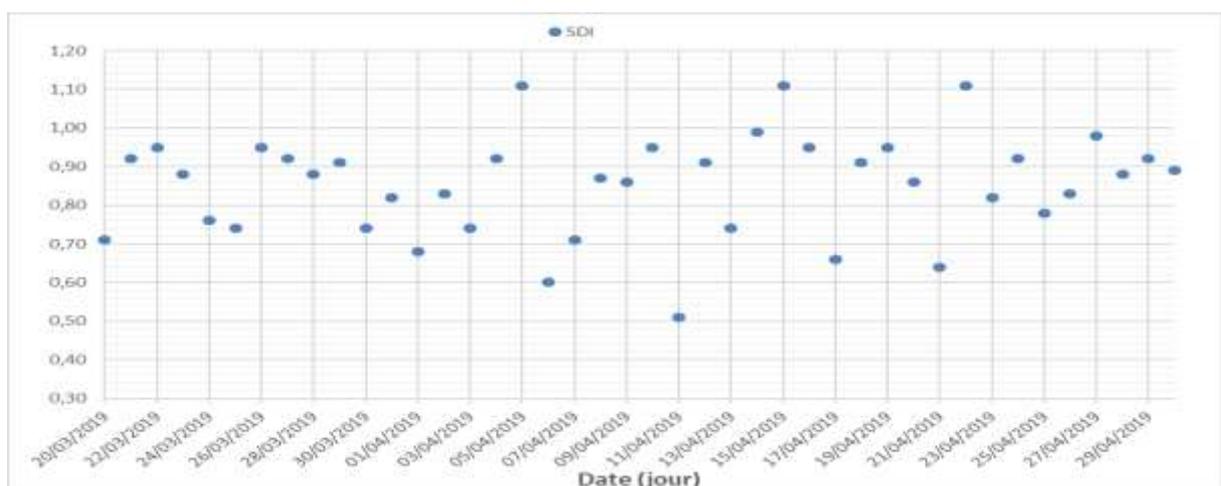


Figure V. 3 : Variation journalière de l'indice de colmatage au niveau de la station (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

Selon les résultats indiqués sur la figure V.3, on constate que les valeurs de l'indice de colmatage des membranes varient entre 0,6 et 1,1 et sont toujours inférieures à 2 ($SDI < 2$). Ce qui signifie que les membranes vont fonctionner dans les meilleures conditions et sont loin d'être colmatées. Lorsque le SDI varie entre 2 à 5, il faut procéder aux lavages des filtres (sable et cartouche). Au-delà d'un $SDI > 5$, il faut arrêter le fonctionnement du rack et procéder à un lavage (ou changement) des membranes.

V.2.4. Le débit spécifique

Le débit spécifique Q_{sp} ($l/h.m^2$) est le rapport du débit du perméat Q_{sp} sur la surface membranaire active. Il est donné par la relation suivante :

$$Q_{sp} (l/h.m^2) = \frac{Q_{perméat}}{S_{active}} \quad (3)$$

La figure V.4 représente la variation du débit spécifique observé au niveau du rack N°5 de la SDEM de Honaine.

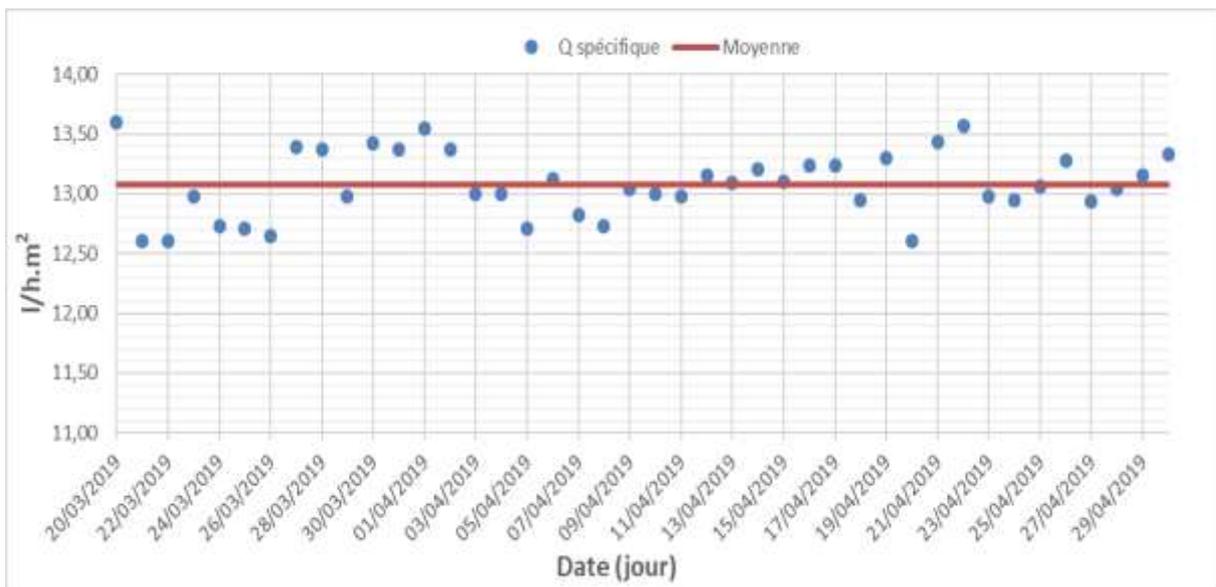


Figure V. 4 : Variation journalière du débit spécifique de rack N°05 de la SDEM Honaine (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019)

Selon la figure V.4, on remarque que le débit spécifique varie entre 12,7 et 13,7 $l/h.m^2$ (soit une moyenne de 13,1 $l/h.m^2$). Ce résultat indique que les membranes de ce rack sont en bon état de service. Selon les déclarations du personnel exploitant de la SDEM, au-dessous de 11 $l/h.m^2$, une diminution de la production en eau sera constatée.

V.2.5. Taux de conversion du rack N°05

La figure V.5 présente la conversion du rack N°05 au niveau de la station :

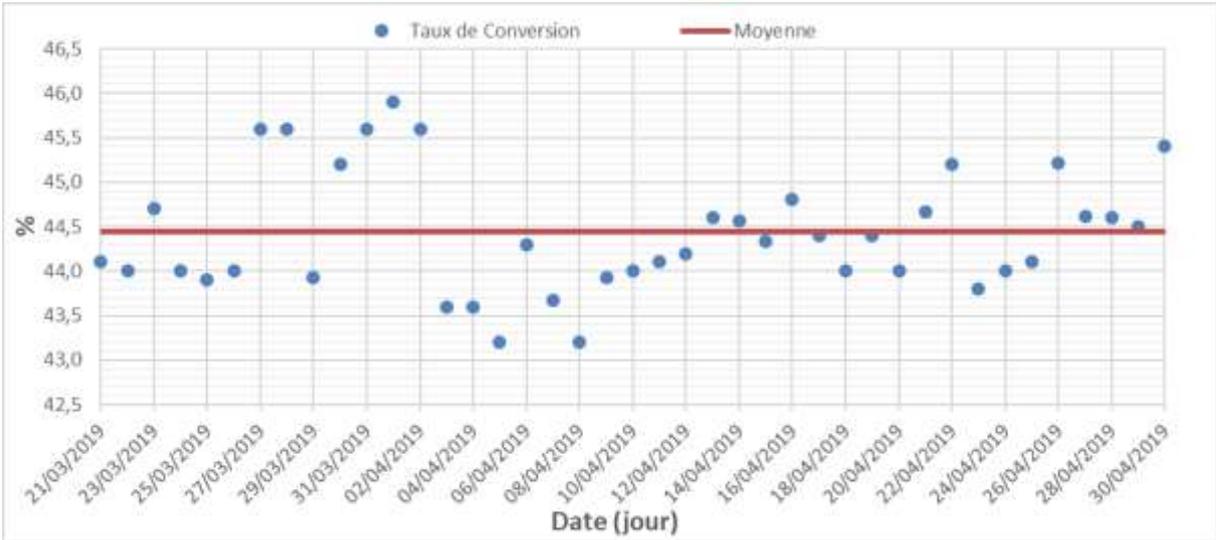


Figure V. 5 : Variation journalière de taux de conversion de rack N°05 de la SDEM Honaine (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

La figure V.5 reflète d’une façon identique l’allure des courbes présentées dans les figures V.1 et V.2. Le taux de conversion dans le rack étudié varie entre 43 % et 46 % (soit une moyenne d’environ 44,5 %).

V.2.6. Le débit du perméat produit par le rack N°5 :

La figure V.6 montre la variation du débit de perméat produit par le rack N°5 :

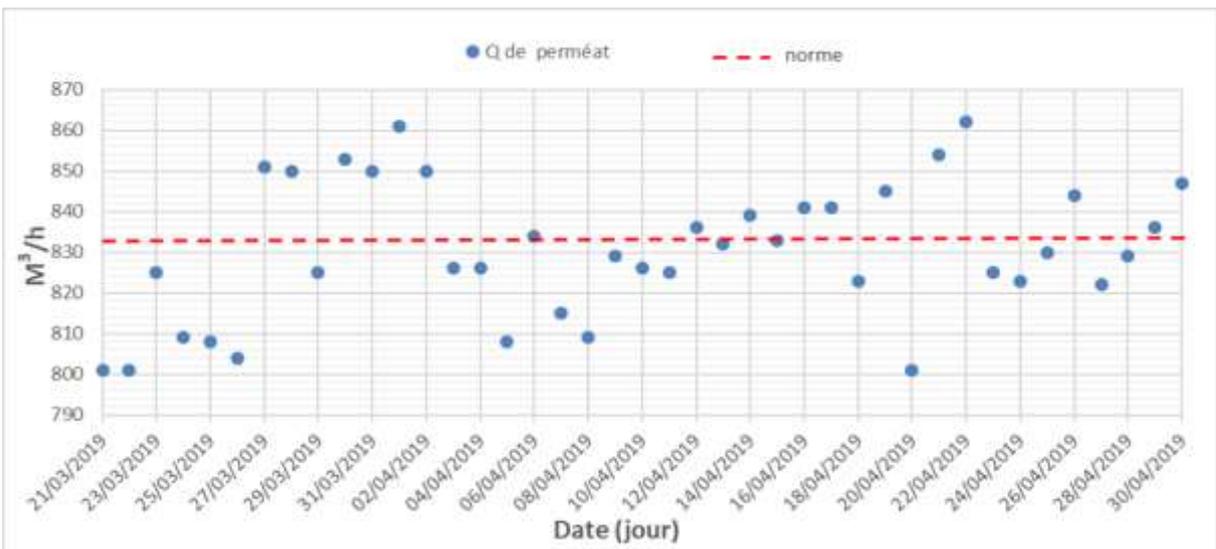


Figure V. 6 : Variation journalière du débit de perméat produit par le rack N° 05 (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

Le débit total produit par la station est de 200000 m³/j à partir de 10 racks, donc chaque train doit produire 20000 m³/j équivalent de 833,33 m³/h, mais selon les résultats indiqués sur la figure V.6, on remarque que les valeurs du débit du rack N°05 varie entre 805 et 864 m³/h, ceci est dû à plusieurs facteurs : premièrement, la température, par exemple quand elle est moins de 18 degrés cela nuit au travail du rack, le deuxième facteur est la demande de l'acheteur (l'ADE), cette demande varie en fonction des saisons de l'année et le troisième facteur est la diminution de la pression du collecteur (colmatage des filtres).

Un autre paramètre qui contribue à cette variation, c'est l'état des châssis (racks) qui se diffèrent parce que le processus de renouvellement des membranes se fait par partie en commençant d'abord par les châssis les plus colmatés, alors en augmentant le rendement des nouveaux racks pour équilibrer entre les racks afin d'atteindre la demande journalière de l'acheteur.

V.2.7. Variation du débit spécifique en fonction de la pression :

La figure V.7 donne la variation du débit spécifique du rack N°05 en fonction de la pression appliquée.

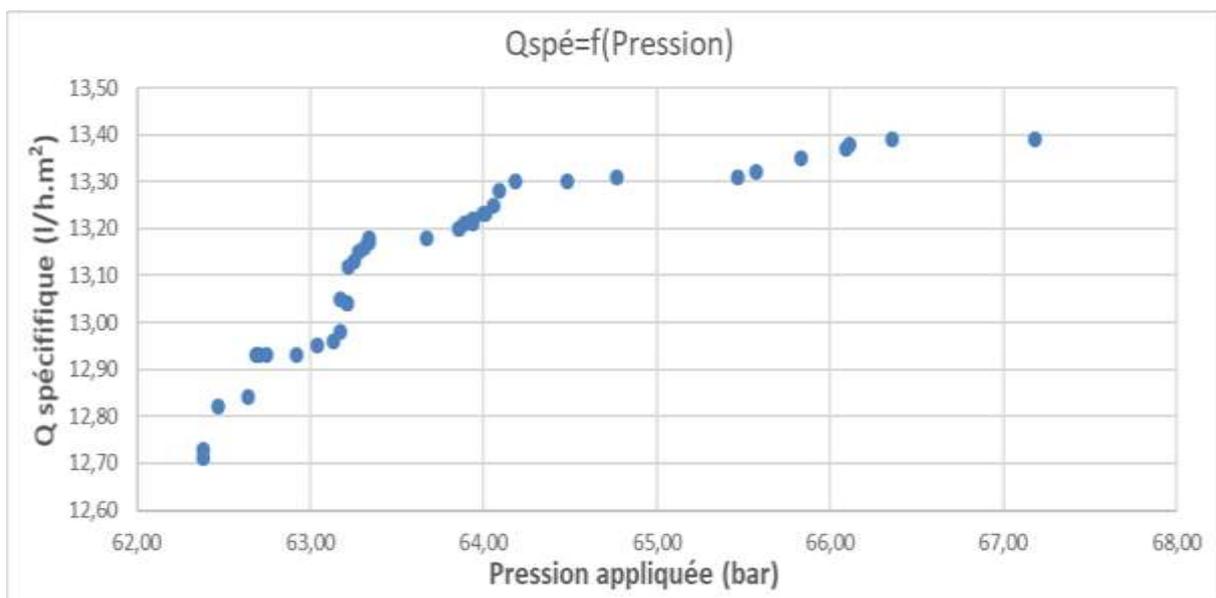


Figure V. 7 : Variation de débit spécifique journalier en fonction de la pression (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

D'après les résultats indiqués sur la figure V.7, on constate que lorsqu'on augmente la pression appliquée (pression d'attaque sur la membrane), le débit spécifique membranaire augmente en parallèle. Plus on augmente la pression, plus la production en eau dessalée croit.

V.2.8. Pression de la pompe HP et pression de sortie du concentrat

La figure V.8 montre les variations des pressions au niveau de la pompe HP et celle du concentrat.

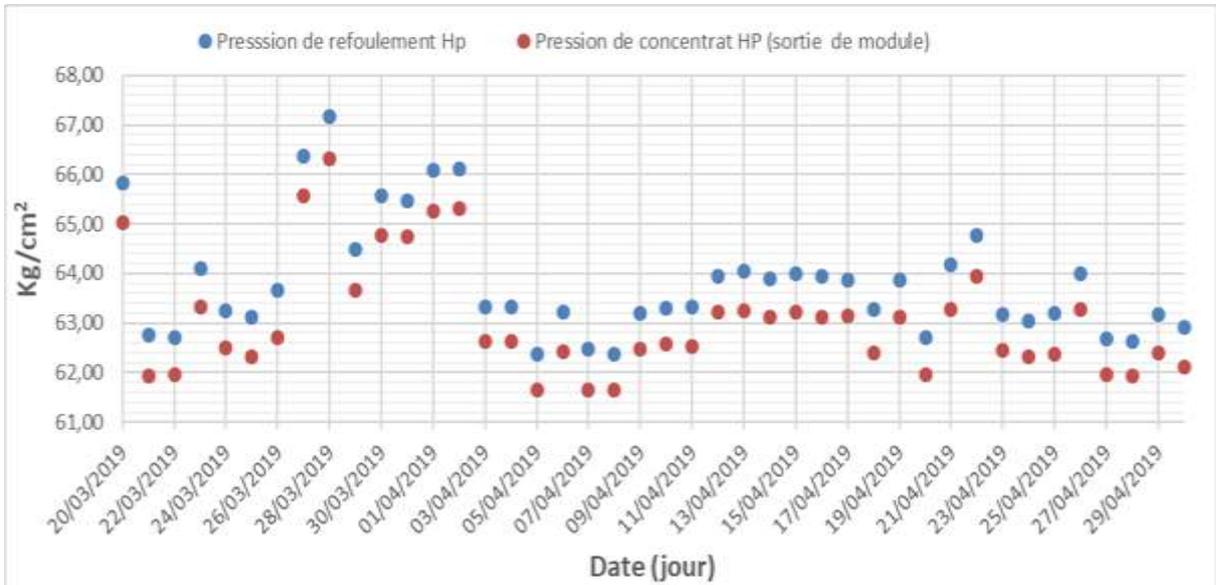


Figure V. 8 : Variation des pressions de la pompe haute pression (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

En outre, la figure V.9 donne la variation de la pression dissipée (ΔP) au niveau des modules lors de l’opération du dessalement. ΔP représente la différence entre la pression de la pompe Hp et celle du concentrat ($\Delta P = P$ de refoulement de la pompe HP – P du concentrat).

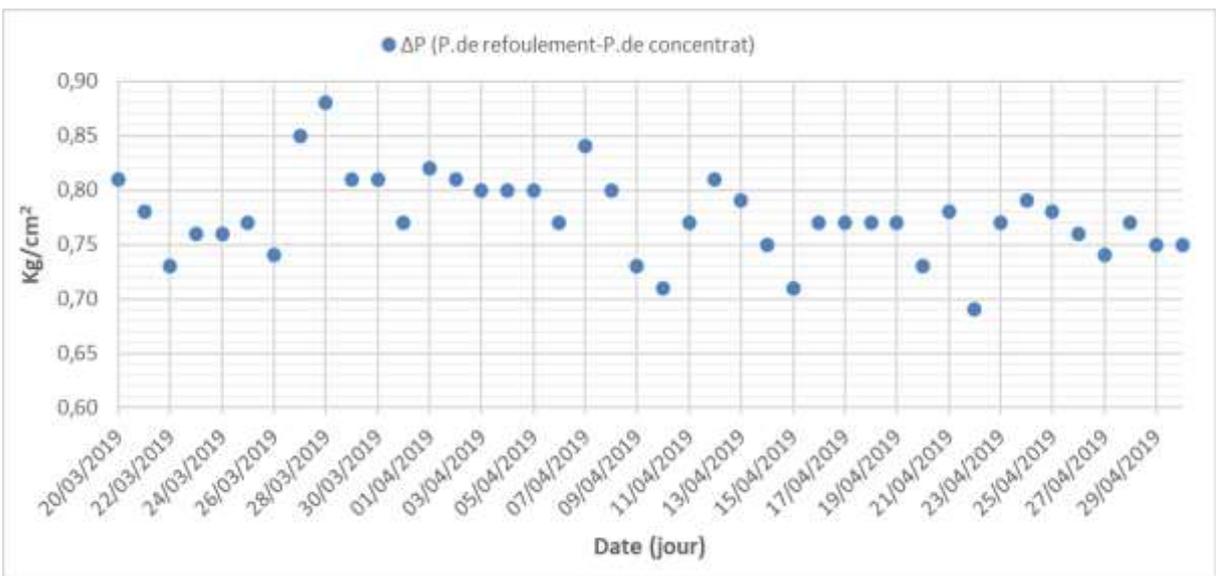


Figure V. 9 : Variation journalière de la différence entre les pressions de la pompe HP (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

D'après la figure V.8, la pression assurée par la pompe HP varie de 62 à 67.3 bars (soit une moyenne d'environ 65 bars). Cette pression est toujours inférieure à 70 bars (le maximum de pression fixée pour la pompe). La figure V.9 qui présente la pression dissipée au niveau des modules d'osmose inverse, montre que la perte en pression dans les modules est légère (autour de 0.78 bars) et ne dépasse pas le 1 bar.

V.2.9. Pression d'entrée et de sortie de la pompe booster

La figure V.10 présente la variation des pressions d'aspiration et de refoulement de la pompe booster :

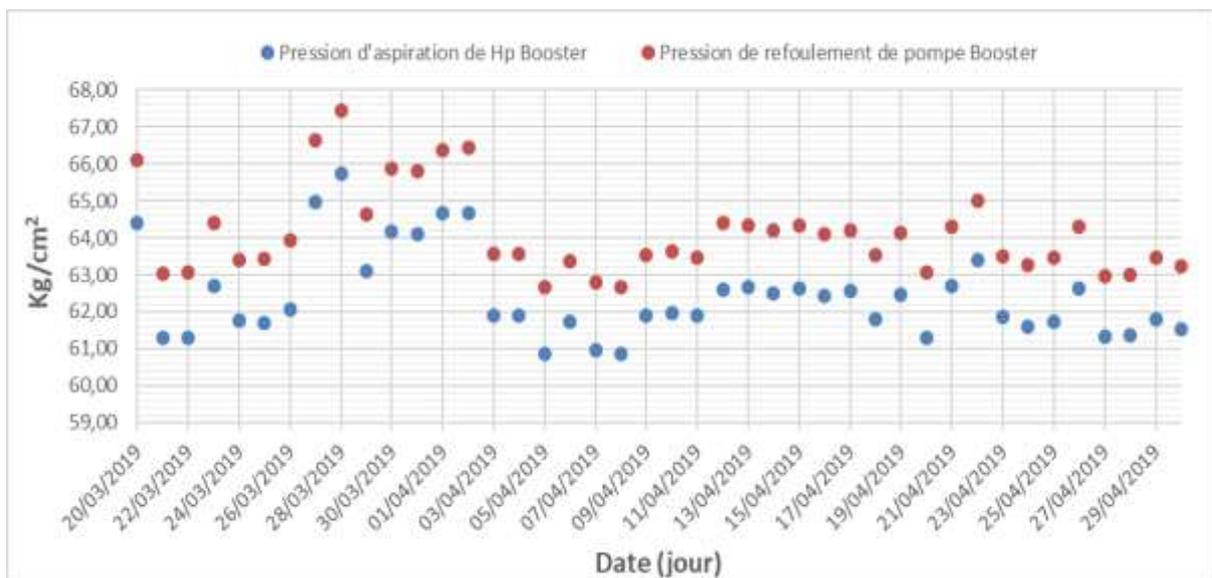


Figure V. 10 : Variation journalière des pressions de la pompe booster

(Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

Selon les résultats indiqués sur la figure V.10, on constate que la pression dans la pompe booster évolue en synchronisme avec la pression dans la pompe HP car elle récupère le maximum de pression perdue de la pompe HP donc la variation est proportionnelle.

V.2.10. Pression de l'eau perméat et de l'eau concentrat

La figure V.11 donne la variation de la pression de l'eau perméat et celle du concentrat au cours du fonctionnement de la station :

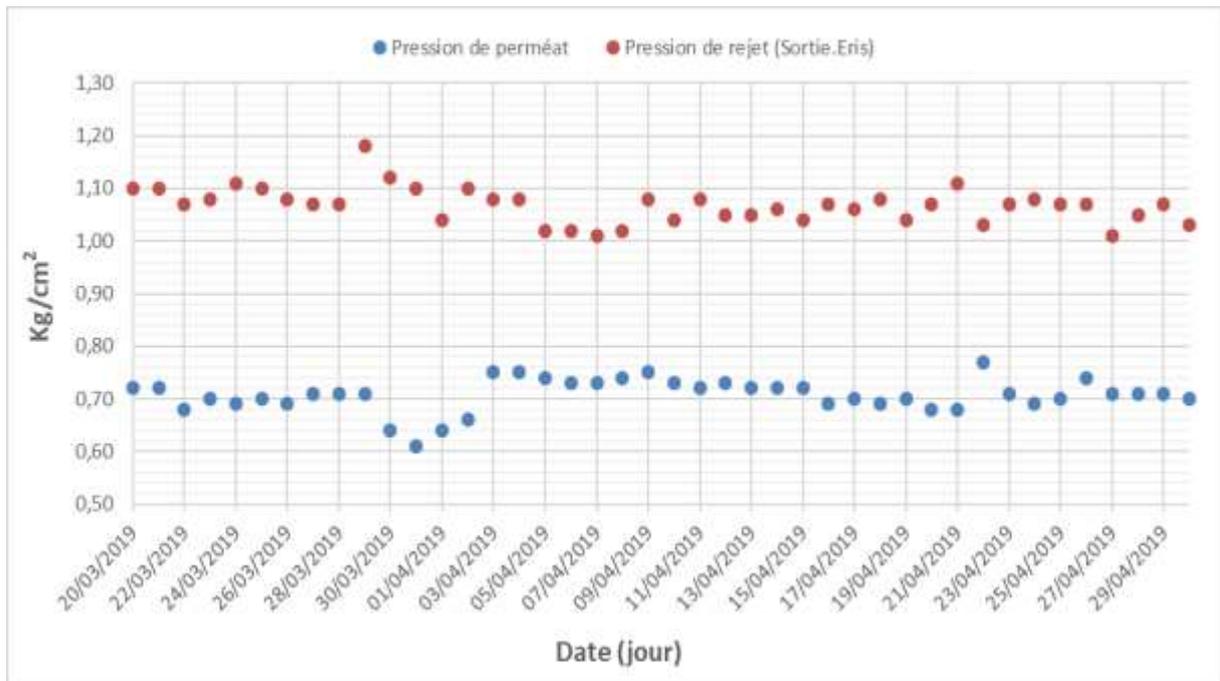


Figure V. 11 : Variation de la pression de l'eau perméat et de l'eau concentrat

(Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

D'après la figure V.11, on distingue que la pression de l'eau perméat oscille autour de 0.7 bars (pression perméat < 1 bar), cela indique que les membranes sont en bon état de fonctionnement. Au-delà de 1 bar, le début de colmatage des membranes sera constaté. De l'autre côté, nous observons que la pression de rejet est autour de 1.05 bar. Les deux courbes de pression présentent relativement la même allure ce qui signifie un fonctionnement normal du rack.

V.3. Performances de traitement et qualité de l'eau

Les paramètres physico-chimiques de l'eau analysés sont : la température de l'eau mer et celle de l'eau traitée, le pH, les matières en suspension (MES) de l'eau de mer, la dureté et l'alcalinité de l'eau traitée, la conductivité de l'eau de mer et celle de l'eau traitée,

V.3.1. La température :

La température de l'eau est un paramètre de confort pour les usagers. La figure V.12 montre la variation de ce paramètre dans l'eau de mer, l'eau produite (traitée) et l'eau dans le rack N°05

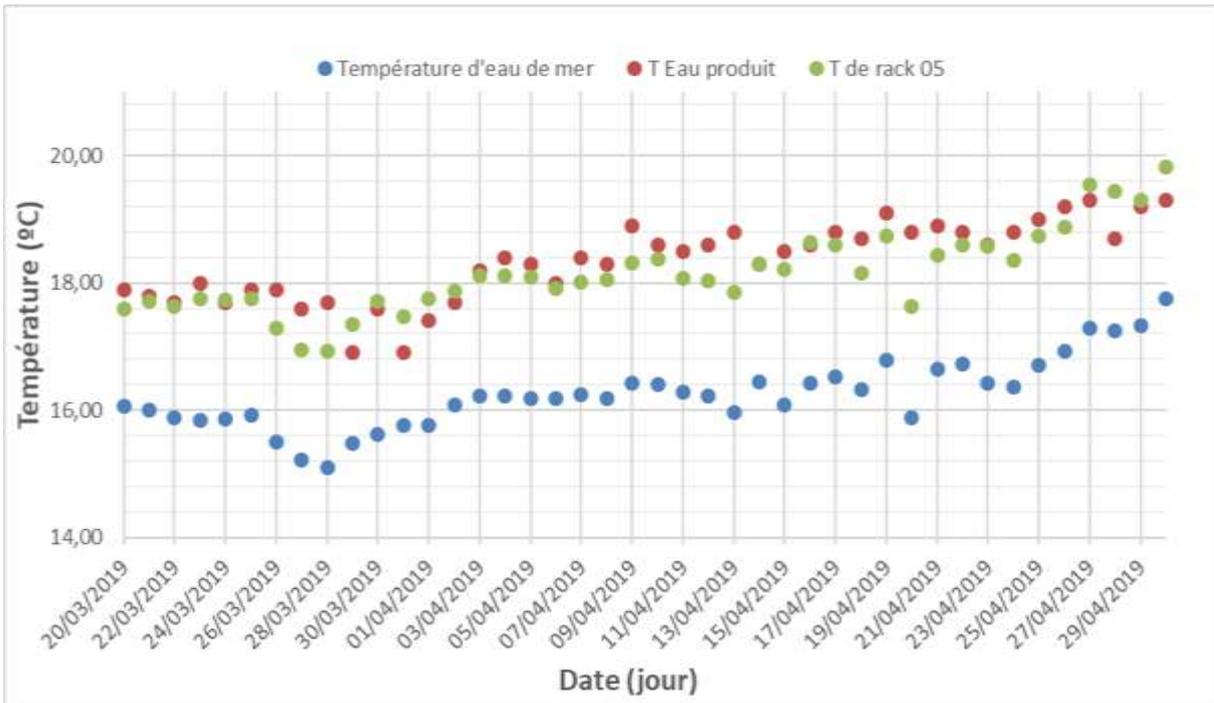


Figure V. 12 : Variation journalière de la température d'eau de mer, d'eau produite et d'eau dans le rack n°05 (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

La température est un facteur important à contrôler dans un processus de dessalement. D'après les résultats obtenus (la figure V.12), on remarque que la température de l'eau de mer est dans une plage 15 à 18°C. Cette légère variation est due au climat. La température de l'eau est influencée par la température de l'air. Par ailleurs, on remarque une augmentation d'environ 2°C dans la température de l'eau produite par la station ou par celle du rack N°05.

V.3.2. Le pH

Le pH (ou potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14. La figure V.13 donne la variation du pH de l'eau de mer, du perméat et de l'eau produite au niveau de la SDEM de Honaine durant la période d'étude.

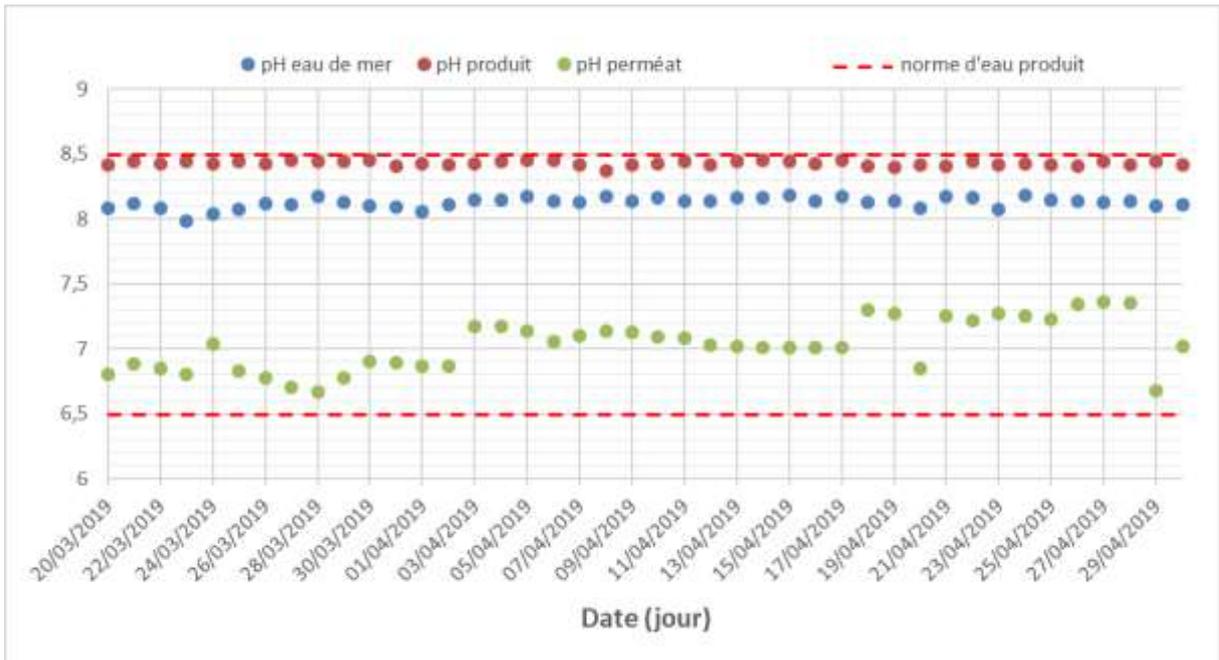


Figure V. 13 : Variation journalière du pH d'eau de mer, du perméat et de l'eau produite (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

En examinant les résultats obtenus (figure V.13), on constate que le pH d'eau de mer qui alimente la station est presque stable (environ 8.12). Les valeurs du pH du perméat sont proches de la neutralité ($\text{pH} = 7$). Cependant, une augmentation dans les valeurs du pH de l'eau produite (eau traitée) a été observée (environ 8.4) et demeure presque stable durant toute la période de service de la station. Cette augmentation est due à la libération d'ion OH^- en solution après l'étape de reminéralisation de l'eau. Néanmoins, les valeurs du pH de l'eau traitée sont conformes à la norme de l'OMS et à la norme algérienne dont les valeurs sont fixées de 6,5 à 8,5.

V.3.3. La conductivité

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La mesure de ce paramètre permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau. La figure V.15 donne la variation de la conductivité de l'eau perméat (osmosé) et de celui de l'eau produite (traitée) durant la période de service de la station.

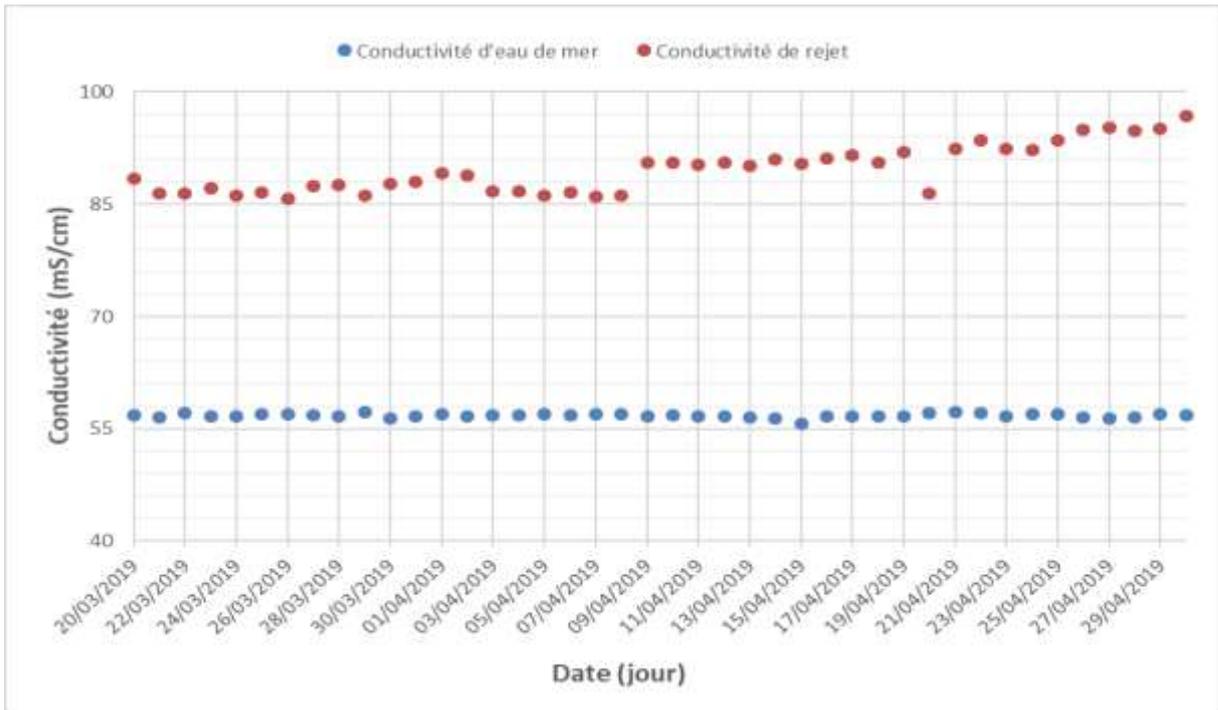


Figure V. 14 : Variation journalière de la conductivité d’eau de mer et d’eau de rejet (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

La figure V.15 présente de son côté la variation de la conductivité d’eau de mer et du rejet.

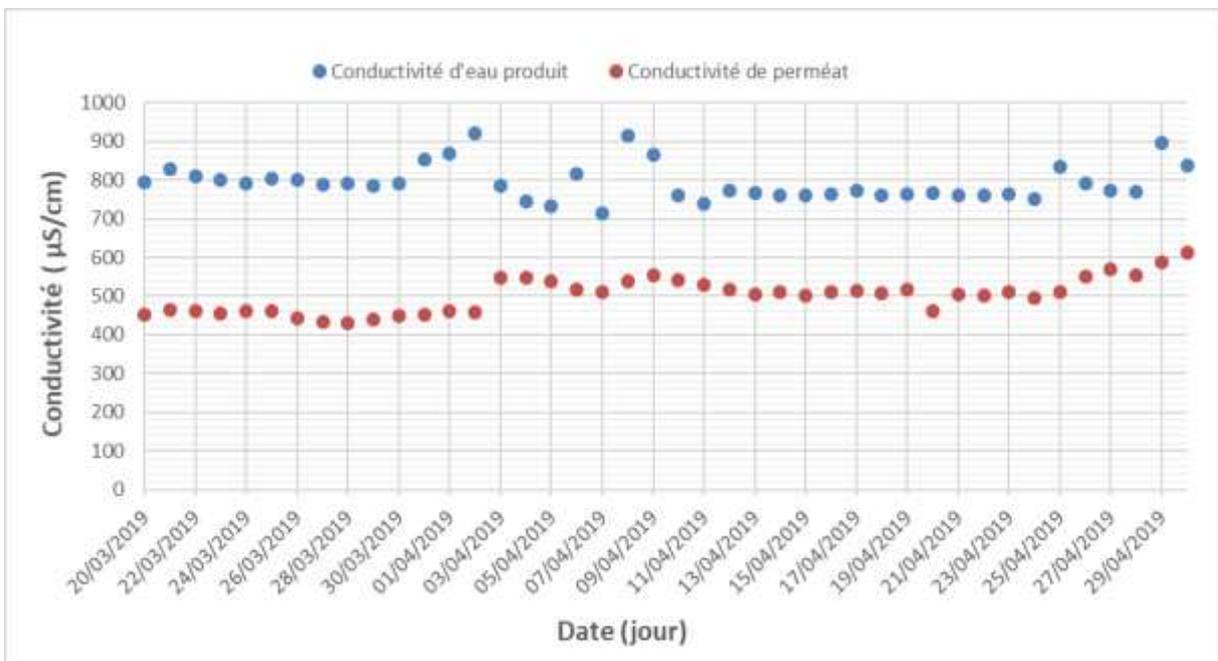


Figure V. 15 : Variation journalière de la conductivité d’eau produite et d’eau de perméat (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

Dans la figure V.15, on remarque que la conductivité d'eau perméat est variable entre 420 et 620 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Une élévation brusque de la conductivité (620 $\mu\text{S}/\text{cm}$) a été relevée le 29/04/2019. Selon le personnel exploitant de la station, cette augmentation a nécessité une opération immédiate de nettoyage acide et basique des membranes ainsi qu'un lavage par l'eau osmosée, cependant les concentrations de la conductivité d'eau produit restent comprises entre 700 et 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ce qui reflète une bonne reminéralisation de l'eau après l'étape d'osmose inverse, en effet, ce résultat est bien meilleur en comparant aux résultats obtenus par le chercheur D.Zouini [51]. Les valeurs de la conductivité pour l'eau produite (eau traitée) sont conformes à la norme de l'OMS et à la norme algérienne (< à 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

La figure V.14 indique que la conductivité de l'eau de mer est presque stable dans le temps ; cependant, la conductivité du rejet (ou concentrat) varie légèrement.

V.3.4. Le TDS

Le TDS exprime le total des sels dissous contenus dans l'eau. Les figures V.16 et V.17 présentent respectivement la variation des concentrations de ce paramètre dans l'eau de mer et dans l'eau produite (l'eau traitée).

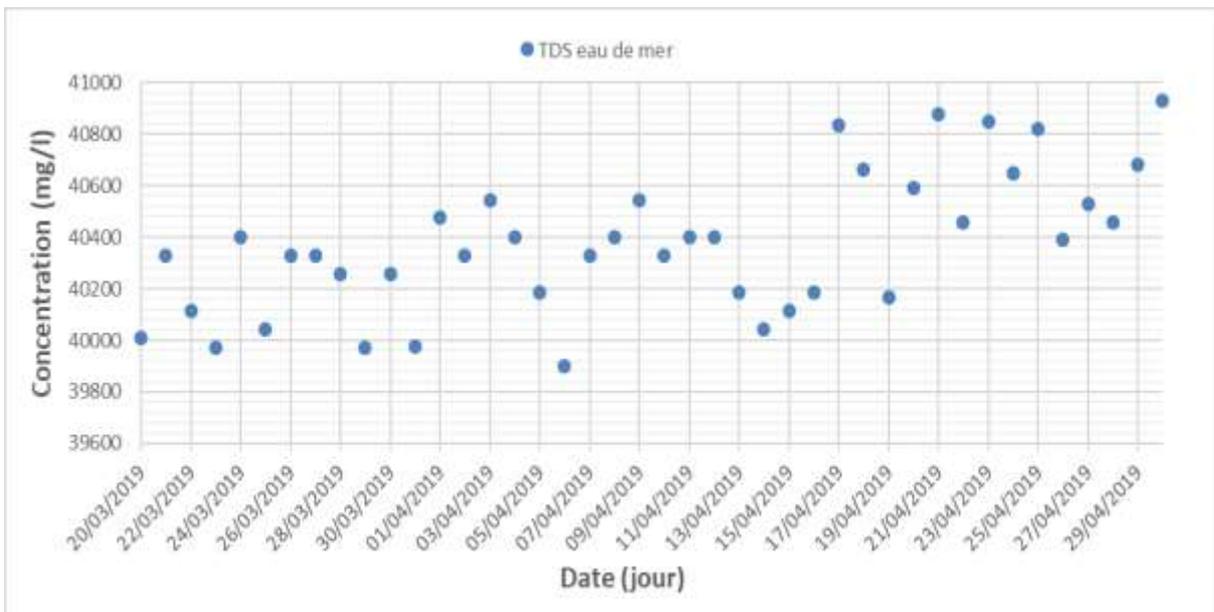


Figure V. 16 : Variation journalière des concentrations de TDS à l'eau de mer au niveau de la station (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

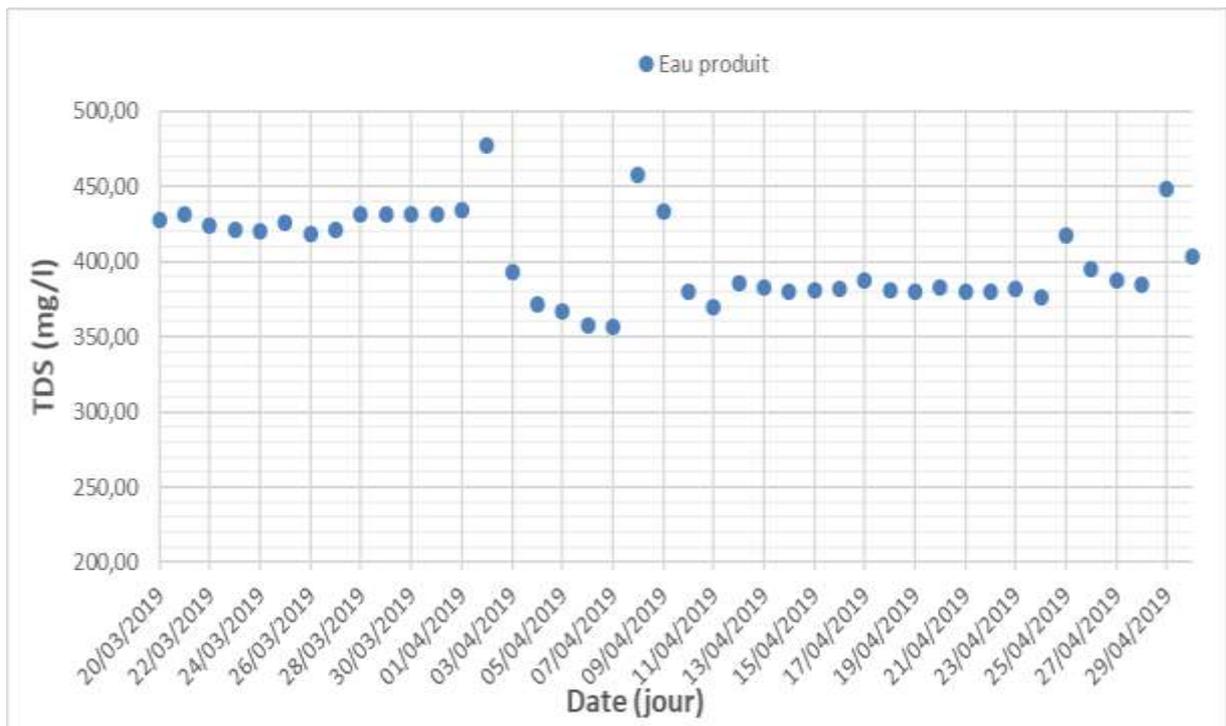


Figure V. 17 : Variation journalière des concentrations de TDS dans l'eau produite au niveau de la station (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

Les résultats indiqués sur la figure V.16, montre que les valeurs de la salinité au niveau de l'eau de mer est presque stable environ (40 g/l). Cette valeur est reconnue comme une moyenne dans la mer méditerranée. Cependant pour l'eau produite, les valeurs du TDS (la figure V.17) oscillent de 350 à 480 mg/l et sont toujours conformes aux normes préconisées par l'OMS qui sont de 150 à 500 mg/l dans les eaux traitées par dessalement.

V.3.5. Matières en suspension (MES)

Les matières en suspension représentent les matières ni solubilisés ni colloïdales contenus dans l'eau. La figure V.18 présentent les résultats des mesures de MES de l'eau de mer alimentant la SDEM de Honaine.

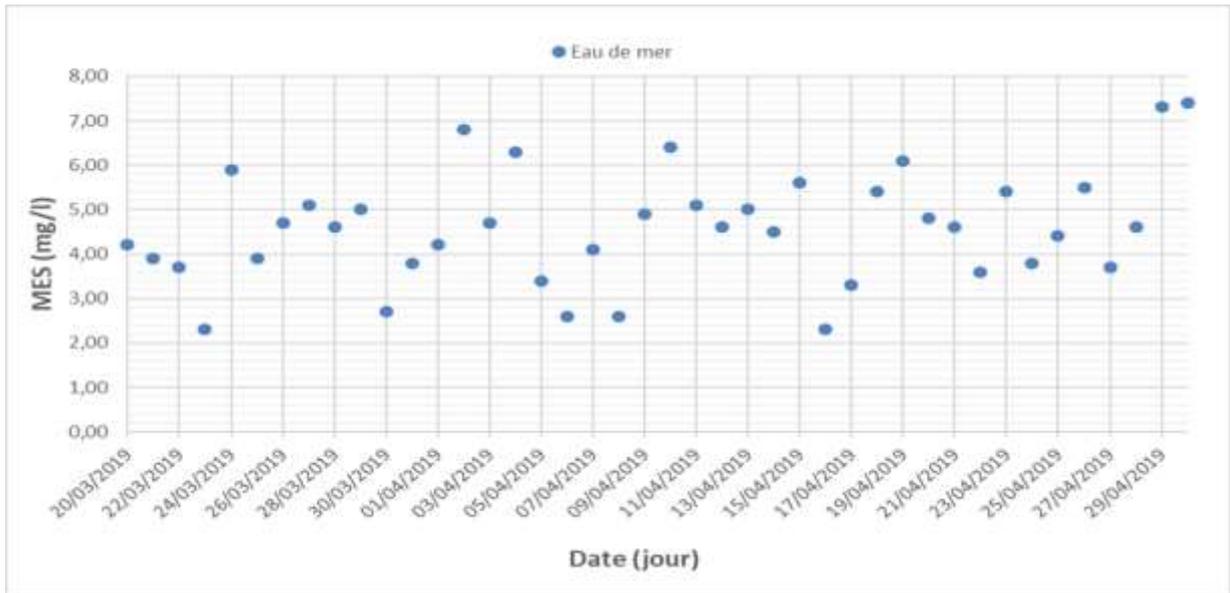
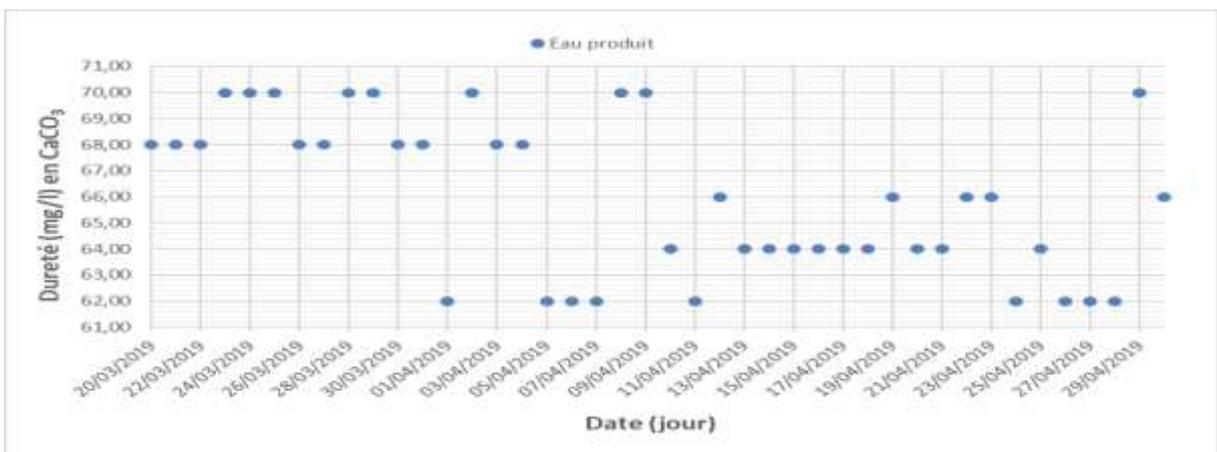


Figure V. 18 : Variation journalière des concentrations de MES d'eau de mer alimentant la SDEM de Honaine (période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

En se référant aux résultats indiqués sur la figure V.20, on constate de légères instabilités dans les concentrations de MES (entre 2.2 et 7.2 mg/l) de l'eau de mer de Honaine. Cependant, ces valeurs sont trop faibles car l'endroit de captage présente une formation rocheuse qui ne génère pas la production des particules solides. Les faibles teneurs en MES sont arrêtés dans le système de filtration, d'où une protection sûre contre le colmatage des membranes d'osmose inverse.

V.3.6. Dureté

La figure V.19 donne la variation de la dureté de l'eau produite par la station durant sa période de service.



De plus, la figure V.20 montre la variation des concentrations de Ca^{2+} et de Mg^{2+} de l'eau traitée.

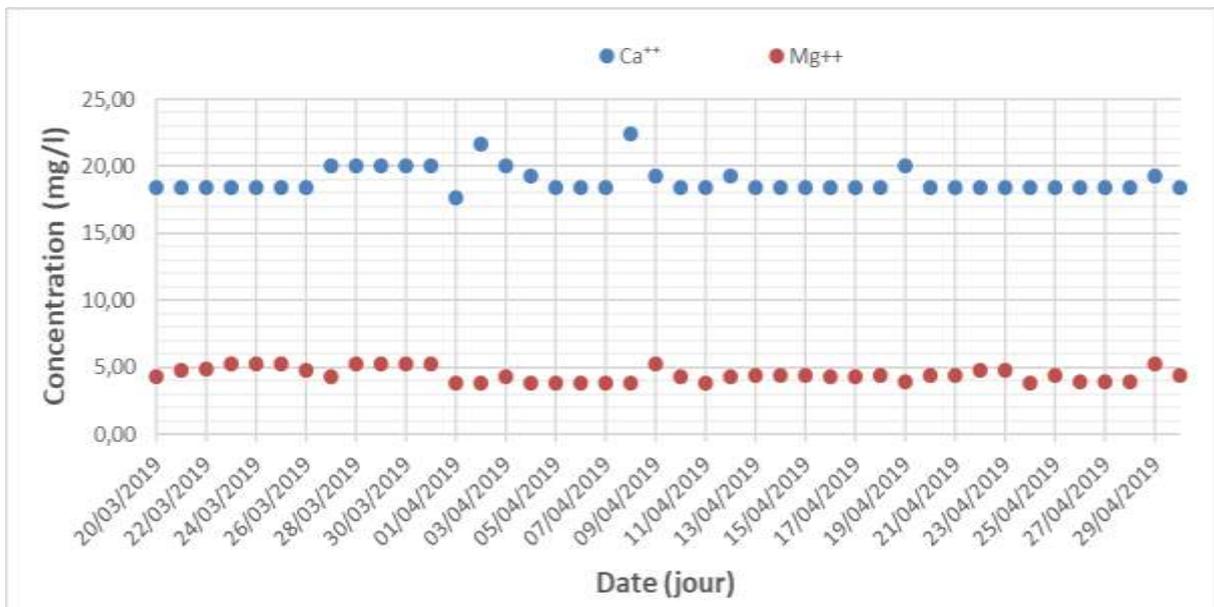


Figure V. 20 : Variation journalière des concentrations de Ca^{2+} et de Mg^{2+} de l'eau traitée par la station (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

D'après les résultats obtenus (la figure V.19), la dureté de l'eau produite varie de 62 à 70 mg/l ce qui signifie que l'eau est de nature douce (dureté entre 50 et 80 mg/l). Une eau trop dure peut avoir des effets sur le fonctionnement et la durée de vie d'un système de plomberie et des appareils ménagers.

Le magnésium est présent dans toutes les eaux naturelles. Il s'agit d'un élément indispensable, en petites quantités, à tous les organismes vivants. Le magnésium contribue de façon importante à la dureté de l'eau. Les valeurs du magnésium enregistrées durant la campagne d'analyses oscillent entre 17 et 23 mg/l en CaCO_3 (la Figure V.20), soit une moyenne de 18 mg/l en CaCO_3 . Les valeurs de la dureté pour l'eau traitée sont conformes à la norme de l'OMS et à la norme algérienne (dureté < à 150 mg/l en CaCO_3).

V.3.7. L'alcalinité totale

L'alcalinité de l'eau peut être définie comme la capacité de l'eau à neutraliser un acide. La figure V.21 présente la variation de la concentration de l'alcalinité de l'eau traitée.

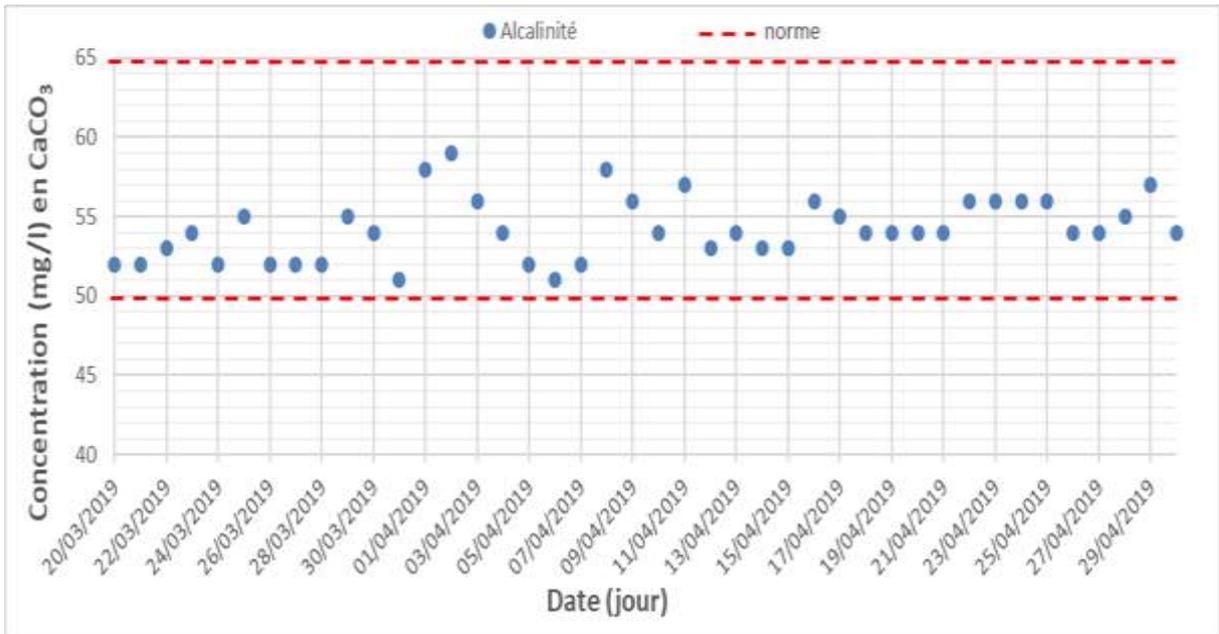


Figure V. 21 : Variation journalière des concentrations de l'alcalinité totale de l'eau produite au niveau de la station (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

L'examen des résultats indiqués sur la figure V.21 montre que les valeurs de l'alcalinité se rapprochent et varient de 52 à 56 mg/l à l'exception de deux valeurs enregistrées, le 01 et le 03/04/2019, dû à un arrêt de maintenance entrepris par l'ADE. Néanmoins, toutes les valeurs de l'alcalinité sont conformes aux normes de l'OMS et à la norme algérienne qui limitent la concentration de l'alcalinité (ou titre alcalimétrique complet (TAC)) des eaux de consommation de 50 à 65 mg/l en CaCO₃.

V.3.8. L'indice de Langelier

L'indice de Langelier (LSI) est une évaluation globale de la qualité de l'eau pour déterminer si l'eau est corrosive ou si elle est entartrant (tendance à précipiter le carbonate de calcium). La figure V.22 présente les valeurs de l'indice de Langelier (LSI) observés sur l'eau produite par la station.

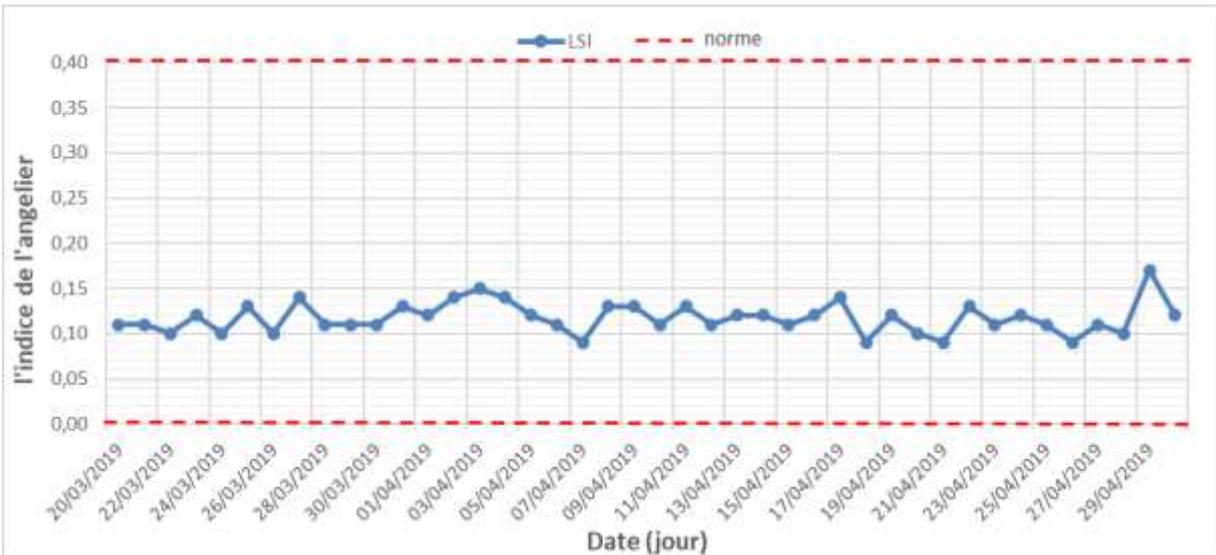


Figure V. 22 : Variation journalière de de l’indice de Langelier (LSI) au niveau de la SDEM Honaine (Période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

En examinant les résultats obtenus dans la figure V.22, on remarque que les valeurs de l’indice de Langelier oscillent entre 0.07 et 0.15 et sont toujours dans les normes fixées par la station (entre 0 et 0.4).

V.3.9. Le chlore

L’eau destinée à la consommation humaine peut être polluée suite à une contamination bactérienne. Pour ce fait, cette eau doit être désinfectée en utilisant du chlore avant sa consommation. La figure V.23 présente la concentration du chlore dans l’eau traitée

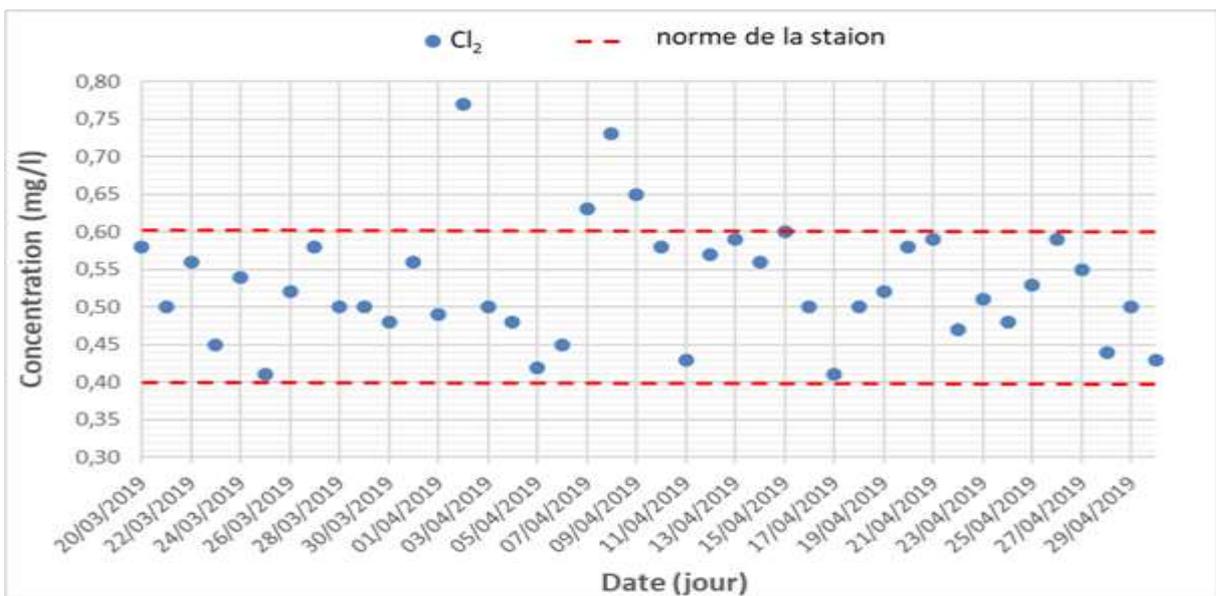


Figure V. 23 : Variation journalière de la concentration de Cl₂ au réservoir d’eau traitée (période entre le 20 Mars et le 30 Avril 2019).

Selon les résultats indiqués, les concentrations du chlore sont variables de 0.4 à 0.6 et sont dans les normes préconisées par la station. Un pic de 0.78 mg/l a été enregistré le 02 et le 08/04/2019 dû à un arrêt de maintenance au niveau de l'ADE.

Conclusion générale

Pendant ces dernières années, la technique de dessalement de l'eau de mer par osmose inverse a nettement évolué du fait qu'elle soit relativement simple et plus performante du point de vue énergétique (soit 2 kW/ h/m³).

En Algérie, plusieurs projets de stations de dessalement ont été réalisés durant ces deux dernières décennies. Avec une capacité de production de 200000 m³/jour, la station de dessalement de Honaine, fait partie de ces projets et destinée à alimenter 23 communes de la wilaya de Tlemcen en eau potable, soit une population d'environ 600000 habitants. La station est équipée de plusieurs filtres à sables et anthracite dans son étape de prétraitement ainsi qu'une récupération d'énergie d'environ 97 % du concentrât.

A l'issue de cette étude, les conclusions suivantes ont pu être tirées :

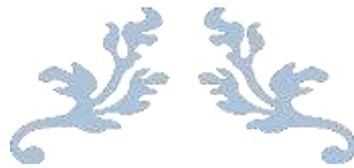
- L'eau dessalée par la station est incolore, inodore et de saveur agréable. Ses paramètres organoleptiques sont en accord avec les normes de consommation (algérienne et mondiale) ;
- Les résultats des analyses physico-chimiques effectuées sur l'eau montrent que :
 - Le pH de l'eau de mer est presque stable environ (8.12). Les valeurs du pH du perméat sont proches de 7. Cependant, une augmentation environ (8.4) dans les valeurs du pH de l'eau traitée a été observée suite à une reminéralisation ;
 - Les teneurs des matières en suspension (MES) dans l'eau de mer sont trop faible (entre 2.2 et 7.2 mg/l). Ces faibles concentrations sont arrêtés par le système de filtration d'où une protection sûre des membranes contre le colmatage ;
 - Les valeurs du TDS de l'eau produite oscillent entre 350 à 480 mg/l et sont conformes aux normes préconisées par l'OMS qui sont de 150 à 500 mg/l dans les eaux traitées par dessalement ;
 - La dureté de l'eau produite varie de 62 à 70 mg/l de CaCO₃ ce qui signifie que l'eau est de nature douce ;
 - Les valeurs de l'indice de Langelier trouvés oscillent entre 0.07 et 0.15 et sont toujours en rapport avec les valeurs fixées par la station (entre 0 et 0.4) ;
 - Les concentrations du chlore résiduels dans l'eau sont variables de 0.4 à 0.6 et sont en bon accord avec les chiffres préconisés par la station ;

Conclusion Générale

- Les résultats de suivi sur les paramètres de fonctionnement hydrauliques montrent que :
 - Le taux de conversion et le taux de rejet sont respectivement de 45 % et 99 %. Ces valeurs préconisées dans ce projet sont pratiquement garanties par la station ;
 - L'indice de colmatage des membranes varient entre 0.6 et 1.1 et reste toujours inférieur à 2 ($SDI < 2$). Ces chiffres signifient que les membranes fonctionnent correctement et sont loin d'être colmatées ;
 - La pression assurée par la pompe HP varie de 62 à 67.3 bars (soit une moyenne d'environ 65 bars). Cette pression est toujours inférieure à 70 bars (le maximum de pression fixée pour la pompe).

Les résultats obtenus de cette étude montrent bien l'efficacité de la station de dessalement de Honaine en matière de production d'eau douce. Ses performances hydrauliques ainsi que physico-chimiques sur la qualité de l'eau ont été bien en exergue et confirment la fiabilité de cette structure et l'intérêt de son implantation dans la région de Tlemcen pour résoudre les problèmes de pénurie d'eau dans la région.

Enfin et comme recommandation, on propose que des études sur les rejets de saumure de cette station soient entreprises dans le futur. Comparée à l'eau de mer, la saumure présente une salinité beaucoup plus élevée ce qui peut engendrer des impacts négatifs sur le milieu récepteur.



BIBLIOGRAPHIE



BIBLIOGRAPHIE

- [1] Morel J., 2007 : « Les ressources en eau sur terre : origine, utilisation et perspectives dans le contexte du changement climatique – un tour d’horizon de la littérature », 2007, P 04.
- [2] Dunglas J., 2014 : « Le dessalement de l'eau de mer Une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau ».
- [3] Danis P., 2003 : « Dessalement de l'eau de mer. Techniques de l'Ingénieur », J 2700. Numéro spécial de Science et Vie sur l'eau, N°211, Juin 2000.
- [4] Maurel A., 2006 : « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres », 2^{ème} Ed. Tec&Doc Lavoisier.
- [5] Salomon J., 2012 : « Le dessalement de l’eau de mer est-il une voie d’avenir ? », Revista de Geografia e Ordenamento do Território, N°1 (Junho). Centro de Estudos de Geografia e Ordenamento do Território. P 237 à P 262.
- [6] Boye H., 2008 : « Eau, énergie dessalement et changement climatique en méditerrané. Plan bleu centre d’activité régional, conseil général de l’environnement et du développement durable ».
- [7] Amitouche M., 2016 : « Impacts des rejets des stations de dessalement sur le milieu récepteur », Thèse de Doctorat en sciences en Hydraulique, P 30.
- [8] Algerian of Water, 2012 : « Desalination of seawater », Algiers.
- [9] Journal El Watan, 13 février 2019, « Ressources en eau ».
- [10] PNUE, 2001 : Dessalement de l’eau de mer dans les pays méditerranéens : « évaluation des impacts sur l’environnement et lignes directrices proposées pour la gestion de la saumure », UNEP (DEC)/ MED WG.183/Inf.6, Athènes.
- [11] Dawoud M. et Al Mulla Mohamed M., 2012 : « Environmental Impacts of Seawater Desalination: Arabian Gulf Case Study, International Journal of Environment and Sustainability », Vol. 1 No. 3, P 22 à P 37.
- [12] Khaldi A., 2018 : « Dessalement de l’eau de Mer et Impacts Environnementaux: Cas de la Station d’El-Mactaâ », Département d’hydraulique, Université des Sciences et Technologie Mohamed Boudiaf El Mnaouer.

Références Bibliographiques

- [13] l'ONU, 2019 : « l'ONU alerte sur les quantités de saumure déversées », Dessalement de l'eau.
- [14] Benabadji A. et Saidi I., 2016 : « Etude sur le Dessalement de l'Eau Saumâtre préparée à partir des Eaux de Mer issues du prétraitement de la station de Souk-Tlata », Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Département Hydraulique.
- [15] Henry M., 1991 : « Les eaux naturelles et les eaux de consommation », Saint Laurent.
- [16] Celleric J., 2002 : « La dégradation de la qualité de l'eau dans le réseau », Paris.
- [17] Savary P., 2010 : « Guide des analyses de la qualité de l'eau », Edition territorial, P75.
- [18] Rodier J., 2005 : « l'analyse de l'eau : Eaux naturelles, Eaux résiduaires, Eau de mer », 8^{ème} édition : Dunod, Paris.
- [19] OMS, 1994 : « Protection et amélioration de la qualité de l'eau. » 2eme édition. Vol. 1. Genève.
- [20] Satin M. et Selmi B., 1999 : « Guide technique de l'assainissement » 2eme édition : Moniteur, P 75.
- [21] Degremont G., 2005 : « Mémento technique de l'eau Tome 1 », édition 10eme : Tec et doc, P3 P 38.
- [22] Sari H., 2014 : « Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau de la source « Attar » (Tlemcen) », Diplôme de master, Sciences des aliments, P 14, P 19.
- [23] Mens et Derouane, 2000 : « État des nappes de l'eau souterraine de Wallonie ».
- [24] Gaujour D., 1995 : « La pollution des milieux aquatiques : Aide-mémoire », 2eme édition : Lavoisier, P 49.
- [25] Guilbert L. : « Analyse de la dureté de l'eau », Projets d'Intégration des Sciences et des Technologies en Enseignement au Secondaire.
- [26] Rodier J., 2009 : « l'analyse de l'eau : Eaux naturelles, Eaux résiduaires, Eau de mer », 9^{ème} édition, Dunod, Paris.
- [27] Patel S. et Romain L., 2013 : « Sampling and Analysis of Natural Water», université de Genève, P 11.

Références Bibliographiques

- [28] Kemmer F. N., 1984 : « Manuel de l'eau, Technique & Documentation » Lavoisier, ISBN 2-85206-220-8.
- [29] Groupe scientifique sur l'eau, 2003 : « Fiche Nitrates/Nitrites », P 1.
- [30] Di Benedetto M., 1997 : « Méthodes spectrométrique d'analyse et de caractérisation, les métaux lourds », Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, P 4.
- [31] Leclerc H. et Haslay C., 1993 : « Microbiologie des eaux d'alimentation : technique et documentation », Lavoisier édition, Paris.
- [32] Atallah A., 2014 : « Procédé de dessalement et qualité physico-chimique de l'eau dessalée par la station de dessalement de l'eau de mer de Honaine », P 19.
- [33] Akretche J., 2004 : « les prétraitements par membranes en dessalement » journée de formation, Gabés, Tunisie.
- [34] Maurel A., 2006 : « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres », 2^{ème} Ed. Tec&Doc Lavoisier, P 22.
- [35] Pearce G. et Talo S. et Chida K. et Basha A. et Gulamhusein A. 2004 : « Pretreatment options for large scale SWRO plants: case studies of UF trials at Kindasa Saudi Arabia, and conventional pretreatment in Spain », Desalination Vol. 167 , P 175 à P 189.
- [36] Wolf P. et Siverns S. et Monti S., 2005 : « UF membranes for RO desalination pretreatment », Desalination Vol. 182, P 293 à P 300.
- [37] Al-Amoudi A.S. et Farooque Q.M., 2005: « Performance restoration and autopsy of NF membranes used in seawater pretreatment », Desalination Vol. 178, P 261 à P 271.
- [38] Teuler A. et Glucina K. et Laine J.M., 1999 : « Assessment of UF pretreatment prior RO membranes for seawater desalination », Desalination, Vol. 125, P 89 à P 96.
- [39] Xu J. et Ruan G. et Chu X. et Yao Y. et Baowei S. et Gao C., 2007: « A pilot study of UF pretreatment without any chemicals for SWRO desalination in China », Desalination, Vol. 207 P216 à P 226.
- [40] Cheryan M., 1998 : « Ultrafiltration and microfiltration Handbook ».
- [41] Dégréement, 1989 : « Mémento technique de l'eau », Lavoisier-Lexique technique de l'eau.

Références Bibliographiques

- [42] Sadi A., 2000 : « Le dessalement solaire : considérations techniques ». Centre de Développement des Energies Renouvelables, Bouzareah, Alger.
- [43] Berland J., 2002 : « les procédés membranaires pour le traitement de l'eau », nouvelle version P 19.
- [44] Antipolis S., 2008 : « dessalement et changement climatique en méditerranée », Centre d'activités régionales d'eau et d'énergie P 10.
- [45] Bacchin P. 2008 : « Principes De Bases De La Filtration Membranaire », 2ème Ecole d'Eté Franco-Maghrébine, Sciences et Technologies à Membranes, 2005, Monastir, Tunisie.
- [46] Etude de danger de la SDEM Honaine élaborée par : bureau d'étude NEE délivré en 2014. Approuvée par le ministère de l'environnement.
- [47] Allam I., 2012 : « La mise en exploitation de la station de dessalement de Honaine », mémoire pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'état en hydraulique option hydraulique urbaine. Université de Tlemcen.
- [48] Rovel J. M., 2012 : « Dessalement de l'eau de mer, Technique de l'Ingénieur ».
- [49] Maurel A., 2006 : « dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres », 2^{ème} édition, Lavoisier Tec & Doc, P 21 à P 22, P 133 à P 135, P 286.
- [50] Rodier J., 2009 : « L'analyse de l'eau », 9^{ème} édition Dunod, Paris, ISBN 978-2-10-054179-9.
- [51] Zouini D., 2009 : « Le Dessalement De L'eau De Mer Par Osmose Inverse : Une Solution Pour L'alimentation En Eau Des Villes Côtières D'Algérie », P 82.

WEBOGRAPHIE

[A] Ministry of Energy ; 2012 : « Projets Dessalement d'Eau de Mer ».[En ligne].Disponible sur :<http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?mact=News,cntnt01,detail,0&cntnt01articleid=4&cntnt01origid=1291&cntnt01returnid=1209>. [Consulté le 12/06/2019].

[B] Aquaportail, 2018 : « Définition d'eau de mer date ». [En ligne]. Disponible sur :
<https://www.aquaportail.com/definition-6142-eau-de-mer.html>. [Consulté le 15/03/2019].

[C] Dictionnaire environnement,;« Dessalement ».[Enligne].Disponible sur :https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/dessalement.php4. [Consulté le 25/03/19].

[D] Blanchon D., 2010 : « Les capacités de dessalement dans le monde ». [En ligne].Disponible sur :<https://www.ladocumentationfrancaise.fr/cartes/eau-ressources-et-infrastructures/c001259-les-capacites-de-dessalement-dans-le-monde>. [Consulté le 27/05/2019].

[E] Hakmi A., 2006 : « traitement de de l'eau de source bousfer ORAN », mémoire pour l'obtention du diplôme de licence traitement des eaux université des sciences et de la technologie-Oran,
[Enligne].Disponiblesur :<https://www.memoireonline.com/02/09/1994/traitement-des-eaux-quot-traitement-de-de-leau-de-source-bousfer-ORAN.html>. [consulté le 12/04/19].

[F] Larousse, 2006 : « Ions, cations et anions », L'Encyclopédie. [En ligne]. Disponible sur :https://www.larousse.fr/encyclopedie/animations/Ions_cations_et_anions/1102427
[Consulté le 28/04/19].

[G] BEI ERE, 2009-2010 :« Procédé de dessalement par distillation à multiples effets MED».
[Enligne].-Disponible-sur : <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0910/bei/beiere/groupe2/node/75.html>

[H] Anonyme, 2012 :« L'électrodialyse première technique membranaire ». [En ligne].
Disponible sur : <http://tpebdmw.e-monsite.com/pages/ii-les-atouts-et-les-limites/b-l-hydrolyse.html>.
[Consulté le 12/04/19].

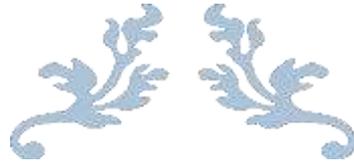
[I] Anonyme : « L'osmose-inverse ». [En ligne]. Disponible sur :
<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/1281>. [Consulté le 10/03/19]

Références Bibliographiques

[J] Technologie des membranes, « Membranes à formes tubulaires ». [En ligne] Disponible sur : <https://www.lenntech.fr/francais/membranes-tubulaires.htm>

[K] Anonyme, 2014: « Inconvénients et avantages d'osmose inverse ». [En ligne] Disponible sur : <https://dessaleaumer.weebly.com/avantages-et-inconveacutenients.html> . [Consulté le 10/06/19]

[L] Bacchin P, 2008 : « Principes de bases de la filtration membranaire ». [En ligne] Disponible sur : <http://patricebacchin.fr/> Université Paul Sabatier Laboratoire de génie Chimique 31 062 Toulouse Cedex 9, consulté le 20/02/19.



Annexes



Annexe 01 :

14 JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 13 7 Joumada El Oula 1435.

9 mars 2014

« Art. 4. . Les données et résultats visés à l'article 2 ci-dessus, ainsi que leurs interprétations peuvent être utilisés par l'agence nationale pour la valorisation des ressources en hydrocarbures (ALNAFT) pour la promotion du domaine minier national relatif aux hydrocarbures ».

Art. 4. . Les dispositions de l'article 6 du décret exécutif n° 07- 311 du 25 Ramadhan 1428 correspondant au 7 octobre 2007, susvisé, sont modifiées, complétées et rédigées comme suit :

« Art. 6. . Dans le cadre de la promotion du domaine minier national relatif aux hydrocarbures, l'agence nationale pour la valorisation des ressources en hydrocarbures (ALNAFT), peut demander au titulaire de l'autorisation de prospection des hydrocarbures ou toute autre personne disposant des qualifications requises, de procéder à la commercialisation de ces données et résultats ainsi que leurs interprétations pour le compte de l'agence nationale pour la valorisation des ressources en hydrocarbures (ALNAFT), dans le cadre d'un contrat fixant les conditions de commercialisation et notamment la répartition des produits de la commercialisation ».

Art. 5. . Le présent décret sera publié au Journal

Décète :

Article 1er. . Le présent décret a pour objet de modifier et de compléter certaines dispositions du décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

Art. 2. . Les dispositions de l'alinéa 2 de l'article 3 du décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011, susvisé, sont modifiées comme suit :

« Art. 3. . Au sens du présent décret, il est entendu par :

Valeurs limites :(sans changement).....

Valeurs indicatives : valeurs de référence fixées pour certains paramètres organoleptiques et physico-chimiques à des fins de contrôle du fonctionnement des installations de production, de traitement et de distribution d'eau ».

Art. 3. . Les dispositions de l'article 7 du décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011, susvisé, sont modifiées comme suit :

« Art. 7. . Lorsqu'il est constaté que l'eau de consommation humaine a cessé d'être conforme aux valeurs limites fixées par le présent décret.....

(le reste sans changement)..... »

Art. 4. . Les dispositions des tableaux 1 et 2 annexés au décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432

Annexes

<p>officiel de la République algérienne démocratique et populaire. Fait à Alger, le 2 Joumada El Oula 1435 correspondant au 4 mars 2014. Abdelmalek SELLAL.</p> <p>....★....</p> <p>Décret exécutif n°14-96 du 2 Joumada El Oula 1435 correspondant au 4 mars 2014 modifiant et complétant le décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.</p> <p>....</p> <p>Le Premier ministre, Sur le rapport du ministre des ressources en eau, Vu la constitution, notamment ses articles 85-3° et 125 (alinéa 2) ; Vu le décret présidentiel n° 13-312 du 5 Dhou El Kaada 1434 correspondant au 11 septembre 2013 portant nomination des membres du Gouvernement ; Vu le décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine ; Après approbation du président de la République ;</p>	<p>correspondant au 22 mars 2011, susvisé, sont modifiées conformément à l'annexe du présent décret.</p> <p>Art. 5. . Les dispositions du décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011, susvisé, sont complétées par un article 4 bis rédigé comme suit :</p> <p>« Art. 4 bis . La concentration minimale de chlore résiduel libre de l'eau fournie aux usagers par le réseau de distribution est fixée à 0,1 mg/l ».</p> <p>Art. 6. . Le présent décret sera publié au Journal officiel de la République algérienne démocratique et populaire. Fait à Alger, le 2 Joumada El Oula 1435 correspondant au 4 mars 2014. Abdelmalek SELLAL.</p>
--	---

Annexes

Annexe 02 : Les normes Algérienne de consommation en eau potable

7 Jomada El Oula 1435 9 mars 2014	JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 13	15	
ANNEXE Paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine Tableau 1 : paramètres avec valeurs limites			
GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS LIMITES
Paramètres chimiques	Aluminium	mg/l	0,2
	Ammonium	mg/l	0,5
	Baryum	mg/l	0,7
	Bore	mg/l	- Eaux conventionnelles : 1 - Eaux désalées ou déméralisées : 1,3
	Fluorures	mg/l	1,5
	Nitrates	mg/l	50
	Nitrites	mg/l	0,2
	Oxydabilité	mg/l O ₂	5
	Acrylamide	µg/l	0,5
	Antimoine	µg/l	20
	Argent	µg/l	100
	Arsenic	µg/l	10
	Cadmium	µg/l	3
	Chrome total	µg/l	50
	Cuivre	mg/l	2
	Cyanures	µg/l	70
	Mercure	µg/l	6
	Nickel	µg/l	70
	Plomb	µg/l	10
	Sélénium	µg/l	10
Zinc	mg/l	5	
Hydrocarbures polycycliques aromatiques (H.P.A) totaux	µg/l	0,2	
Fluoranthène, benzo (3,4) fluoranthène, benzo (11,12) fluoranthène, benzo (3,4) pyrène, benzo (1,12) pérylène, indéno (1,2,3-cd) pyrène, benzo (3,4) pyrène	µg/l	0,01	
Benzène	µg/l	10	
Toluène	µg/l	700	
Ethylbenzène	µg/l	300	

Annexes

16	JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 13		7 Joumada El Oula 1435 9 mars 2014
ANNEXE (suite)			
GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS LIMITES
Paramètres chimiques (suite)	Xylènes	µg/l	500
	Styrène	µg/l	100
	Agents de surface régissant au bleu de méthylène	mg/l	0,2
	Epychlorehydrine	µg/l	0,4
	Microcystine LR	µg/l	1
	Pesticides par substance individualisée		
	- Insecticides organochlorés persistants	µg/l	0,1
	- Insecticides organophosphorés et carbamates	µg/l	0,1
	- Herbicides	µg/l	0,1
	- Fongicides	µg/l	0,1
	- P.C.B	µg/l	0,1
	- P.C.T	µg/l	0,1
	- Aldrine	µg/l	0,03
	- Dieldrine	µg/l	0,03
	- Heptachlore	µg/l	0,03
	- Heptachlorépoxyde	µg/l	0,03
	Pesticides (Totaux)	µg/l	0,5
	Bromates	µg/l	10
	Chlorite	µg/l	0,07
	Trihalométhanes par substance individualisée :	- Chloroforme	µg/l
- Bromoforme		µg/l	100
- Dibromochlorométhane		µg/l	100
- Bromodichlorométhane		µg/l	60
Chlorure de vinyle		µg/l	0,3
1,2-Dichloroéthane		µg/l	30
1,2-Dichlorobenzène		µg/l	1000
1,4-Dichlorobenzène		µg/l	300
Trichloroéthylène		µg/l	20
Tetrachloroéthylène		µg/l	40
Radionucléides	Particules alpha	Picocurie/l	15
	Particules bêta	Millirems/an	4
	Tritium	Bequerel/l	100
	Uranium	µg/l	30
	Dose totale indicative (DTI)	mSv/an	0,15
paramètres microbiologiques	Escherichia Coli	n/100ml	0
	Entérocoques	n/100ml	0
	Bactéries sulfitoréductrices y compris les spores	n/20ml	0

Annexe : Paramètres avec valeurs indicatives.

7 Joumada El Oula 1435
9 mars 2014

JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 13

17

Tableau 2
Paramètres avec valeurs indicatives

GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS INDICATIVES
Paramètres Organoleptiques	couleur	mg/l platine	15
	Turbidité	NTU	5
	Odeur à 25 °C	Taux dilution	4
	Saveur à 25 °C	Taux dilution	4
Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux	Alcalinité	mg/l CaCO ₃	65 pour les eaux déssalées ou déminéralisées (valeur minimale)
	Calcium	mg/l	200
	Chlorure	mg/l	500
	Concentration en ions hydrogène	Unité pH	≥ 6,5 et ≤ 9
	Conductivité à 20 °C	µS/cm	2800
	Dureté (TH)	mg/l en CaCO ₃	500
	Fer total	mg/l	0,3
	Phosphore	mg/l	5
	Potassium	mg/l	12
	Sodium	mg/l	200
	Sulfates	mg/l	400
	Température	°C	25

Décret exécutif n° 14-97 du 2 Joumada El Oula 1435 correspondant au 4 mars 2014 portant dissolution de l'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun.

Le Premier Ministre,

Sur le rapport du ministre des ressources en eau,

Vu la Constitution, notamment ses articles 85-3° et 125 (alinéa 2),

Vu le décret présidentiel n° 13-312 du 5 Dhou El Kaâda 1434 correspondant au 11 septembre 2013 portant nomination des membres du Gouvernement ;

Vu le décret exécutif n° 94-294 du 19 Rabie Ethani 1415 correspondant au 25 septembre 1994 relatif aux modalités de dissolution et de liquidation des entreprises publiques non autonomes et des établissements publics à caractère industriel et commercial ;

Vu le décret exécutif n° 07-337 du 19 Chaoual 1428 correspondant au 31 octobre 2007 portant création de l'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun ;

Après approbation du Président de la République ;

Décrète :

Article 1er. — L'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun, créée par les dispositions du décret exécutif n° 07-337 du 19 Chaoual 1428 correspondant au 31 octobre 2007 portant création de l'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun est dissoute.

Art. 2. — La dissolution de l'agence prévue à l'article 1er ci-dessus, donne lieu à l'établissement d'un inventaire quantitatif, qualitatif et estimatif dressé conformément aux lois et règlements en vigueur par une commission dont les membres sont désignés conjointement par le ministre des finances et le ministre chargé des ressources en eau.

Art. 3. — Le présent décret sera publié au *Journal Officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger le 2 Joumada El Oula 1435 Correspondant au 4 mars 2014.

Abdelmalek SELLAL.

Annexes

Annexe 03 : fiche technique de la membrane utilisée.

Nitto

SWC5 MAX



Specified Performance

Permeate Flow:

9,900 gpd (37.5 m³/d)

Salt Rejection:

99.8% (99.7% minimum)

Test Conditions:

32000 ppm NaCl solution
800 psi (5.5 MPa) Applied Pressure
77 °F (25 °C) Operating Temperature
10% Permeate Recovery
6.5 - 7.0 pH Range

*The Specified Performance is based on data taken after approximately 30 minutes of operation. Actual testing of elements may be done at conditions which vary from these exact values; in which case, the performance is normalized back to these standard conditions. Permeate flow for individual elements may vary ±15 percent from the value specified.

General Product Description

Configuration:

Spiral Wound

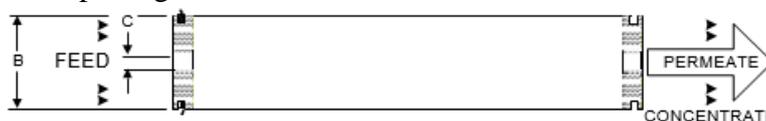
Membrane Polymer:

Composite Polyamide

Membrane Active Area**:

440 ft² (40.9 m²)

Packaging: All membrane elements are supplied with a brine seal, interconnector, and O-rings. Elements are enclosed in a sealed polyethylene bag containing less than 1.0% sodium metabisulfite solution, and then packaged in a cardboard box.



Element Details**

A, inches (mm)	B, inches (mm)	C, inches (mm)	Weight, lbs. (kg)
40.0 (1016)	7.89 (200)	1.125 (28.6)	32.0 ± 2 (14.5 ± 1)

**Values listed are indicative, not specified. For more detailed specifications, see our Technical Service Bulletin documents or contact Hydranautics, Technical Department. Element weight values are as shipped from factory. Elements that are used and then gravity drained may still contain at least an additional 2 lbs. (1 kg) of liquid.

Product Use and Restrictions[^]

Maximum Applied Pressure: 1200 psig (8.27 MPa)
Maximum Chlorine Concentration: < 0.1 ppm
Maximum Operating Temperature: 113 °F (45 °C)
pH Range, Continuous (Cleaning): 2-11 (1-13)
Maximum Feedwater Turbidity: 1.0 NTU
Maximum Feedwater SDI (15 mins): 5.0
Maximum Feed Flow: 75 gpm (17.0 m³/h)
Maximum Pressure Drop for Each Element: 15 psi (0.10MPa)

[^] The limitations shown here are for general use. For specified projects, operation at more conservative values may ensure the best performance and longest life of the membrane. See Hydranautics Technical Bulletins for more details.

Disclaimer: The information and data are presented in good faith and in lieu of all warranties. All express or implied warranties, including the warranties of merchantability and fitness for a particular purpose, are hereby disclaimed and excluded. Conditions and methods of use of our products are beyond our control. Hydranautics assumes no liability for results obtained or damages incurred through the application of the presented information and data. It is the user's responsibility to determine the appropriateness of Hydranautics products for the user's specific end uses. 2/21/2018

Hydranautics Corporate office
 401 Jones Road, Oceanside, CA 92058, USA Toll Free: +1-800-CPA-PURE Tel: +1-760-901-2500 Fax: +1-760-901-2578

 Web: www.membranes.com Email: hy-info@nitto.com

Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier expérimentalement les performances de fonctionnement de la station de dessalement d'eau de mer de Honaine située au niveau de la Wilaya de Tlemcen à travers une série de mesures effectuées sur des paramètres hydrauliques et physico-chimiques du process par un suivi de la qualité de l'eau dessalée (ou produite). L'expérimentation a été réalisée sur une période de 41 jours allant de la mi-mars à la fin Avril 2019. Les résultats obtenus ont montré que les paramètres hydrauliques étudiés sont en accord avec les objectifs fixés par la station : Taux de conversion moyen de 45 %, Taux de rejet d'environ 99 %, indice de colmatage SDI < 2, un débit spécifique Qsp autour de 13 l/h.m² et une pression de refoulement de la pompe HP < 70 bars. Les résultats obtenus sur les paramètres physico-chimiques de l'eau dessalée sont conformes aux normes de l'OMS ainsi qu'aux normes Algériennes : un pH compris entre 6,6 et 7,4, une dureté < 70 mg/l de CaCO₃ et une concentration en TDS oscillant entre 350 et 480 mg/l.

Abstract

The objective of this work is to study experimentally the operating performance of Honaine seawater desalination plant located at the Wilaya of Tlemcen through a series of measurements carried out on hydraulic and physical-chemical process parameters by monitoring the quality of the desalinated (or produced) water. The experiment was conducted over a 41-day period from mid-March to the end of April 2019. The results obtained showed that the hydraulic parameters studied are in good agreement with the objectives set by the station: average conversion rate of 45%, rejection rate of about 99%, clogging index SDI < 2, a specific flow Qsp around 13 l/h/m² and a repression pressure of the HP pump < 70 bar. The results obtained on the physico-chemical parameters of desalinated water comply with OMS standards and Algerian standards: pH between 6.6 and 7.4, a hardness < 70 mg/l of CaCO₃ and a TDS concentration between 350 and 480 mg/l.

الخلاصة

الهدف من هذا العمل هو دراسة مخبرية للأداء التشغيلي لمحطة تحلية مياه البحر في هنين الواقعة في ولاية تلمسان من خلال سلسلة من القياسات التي أجريت على المؤشرات الهيدروليكية والفيزيائية-الكيميائية للعملية من خلال مراقبة جودة المياه المحلاة (أو المنتجة). تم إجراء التجربة على مدار 41 يومًا من منتصف شهر مارس إلى نهاية أبريل 2019. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن المؤشرات الهيدروليكية التي تمت دراستها تتفق جيدًا مع الأهداف التي حددتها المحطة: معدل تحويل 45 % ، ومعدل رفض حوالي 99 % ، ومؤشر انسداد SDI < 2 ، ومعدل تدفق معين Qsp حوالي 13 لتر / ساعة / م² وضغط تصريف المضخة HP < 70 bar. تتوافق النتائج التي تم الحصول عليها مع المؤشرات الفيزيائية والكيميائية للمياه المحلاة المحددة من طرف منظمة الصحة العالمية والمعايير الجزائرية، درجة الحموضة بين 6.6 و 7.4 ، الصلابة أقل من 70 ملغ / لتر من CaCO₃ و تركيز TDS يتأرجح بين 350 و 480 ملغم / لتر.