



## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Hydraulique*

**Option :** Réutilisation des eaux non conventionnelles

**THEME :**

**ETUDE DE LA POSSIBILITE D'AMELIORATOION DES  
PERFORMANCES DE LA STATION DE DESSALEMENT EL  
MARSA wilaya d'Alger**

**Présenté par :**

**GAHDOUNI Sid Ali**

**Devant les membres du jury**

| Nom et Prénoms        | Grade      | Qualité   |
|-----------------------|------------|-----------|
| DJELLAB Mohamed       | Professeur | Président |
| BETATACHE Hayet       | M.C.B      | Membre    |
| MEDJDOUB LEULMI Sonia | M.C.B      | Membre    |
| KOLIAI Djaffar        | Associé    | Membre    |
| Touil Youcef          | M.C.B      | Promoteur |

# **REMERCIEMENTS**

Avant tout, nous remercions Allah, le Tout-Puissant, de nous avoir donné la force, la patience et la volonté d'atteindre notre objectif et de mener à bien ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur Touil Youcef, mon encadreur, pour son accompagnement, ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Mes sincères remerciements s'adressent également à Monsieur Hafid Toulmit, directeur de la station de dessalement d'El Marsa, ainsi qu'à l'ensemble des ingénieurs et du personnel de la station, en particulier Kardache Imen et Monsieur Djouahra Abdelhalim, dont l'aide, le soutien et les explications ont été d'une grande utilité.

Je tiens aussi à remercier chaleureusement Monsieur DHAHBI et Monsieur MELBOUCI Abdelmalek et Monsieur HACHEMI Abdelkader pour leur aide et leur appui

Je remercie également les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en évaluant ce mémoire et pour l'intérêt porté à ce travail.

Mes remerciements les plus profonds vont à mes chers parents, pour leurs sacrifices, leur soutien inconditionnel et leurs prières qui m'ont toujours accompagné, ainsi qu'à toute ma famille, pour leur encouragement constant et leur présence bienveillante tout au long de mon parcours académique et personnel.

Enfin, j'adresse toute ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont apporté leur aide dans la réalisation de ce projet et dans l'accomplissement de ce travail.

## ملخص :

تُعدّ مسألة مياه الشرب في الجزائر من أبرز التحديات التي تواجه التنمية الاقتصادية والاجتماعية في البلاد. تواجه ولاية الجزائر، شأنها شأن العديد من المناطق الأخرى، ضغطًا متزايدًا نتيجة ندرة الموارد المائية وازدياد الطلب المستمر عليها. وفي هذا السياق، يُعتبر تحلية مياه البحر موردًا استراتيجيًا ومستدامًا وضروريًا لضمان الأمن المائي الوطني.

يركّز هذا البحث على محطة تحلية مياه البحر بالمرسى، التي تلعب دورًا أساسيًا في تزويد عدد من بلديات شرق العاصمة بالمياه الصالحة للشرب. يتمثل الهدف الرئيسي من هذا العمل في تحسين أداء المحطة بما يضمن إنتاجًا مستمرًا وفعّالًا ومستدامًا. كما تهدف الدراسة إلى رفع كفاءة النظام ككل من أجل تلبية الاحتياجات المستقبلية من المياه، مع الأخذ في الاعتبار النمو السكاني والتغيرات المناخية.

وعلى الصعيد غير التقني، يُبرز هذا العمل أهمية التخطيط والتحديث وضمان موثوقية البنى التحتية في إطار استراتيجية وطنية لإدارة المياه بشكل متكامل ومستدام.

**الكلمات المفتاحية:** مياه الشرب، التحلية، الموارد غير التقليدية، الأمن المائي، الجزائر

## Résumé :

La question de l'eau potable en Algérie constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour le développement économique et social du pays. La wilaya d'Alger, à l'instar de nombreuses autres régions, fait face à une pression croissante due à la rareté des ressources hydriques et à l'augmentation constante de la demande. Dans ce contexte, le recours aux ressources non conventionnelles, notamment le dessalement de l'eau de mer, s'impose comme une solution stratégique, durable et indispensable pour garantir la sécurité hydrique nationale.

Ce mémoire s'intéresse particulièrement à la station de dessalement d'El Marsa, qui joue un rôle essentiel dans l'alimentation en eau potable de plusieurs communes de l'Est de la capitale. L'objectif principal de ce travail est d'optimiser la performance de la station afin d'assurer une production durable, fiable et efficace. L'étude vise également à améliorer la performance globale du système pour répondre aux besoins futurs en eau potable, dans un contexte de croissance démographique et de changement climatique.

Au-delà de l'aspect technique, ce travail met en évidence l'importance de la planification, de la modernisation et de la fiabilité des infrastructures dans le cadre d'une stratégie nationale de gestion intégrée et durable de l'eau.

**Mots-clés :** Eau potable, Dessalement, Ressources non conventionnelles, Sécurité hydrique, Alger.

## Abstract

The issue of drinking water in Algeria represents a major challenge for the country's economic and social development. The Wilaya of Algiers, like many other regions, is facing increasing pressure due to the scarcity of water resources and the continuous growth in demand. In this context, the use of non-conventional resources, particularly seawater desalination, stands out as a strategic, sustainable, and essential solution to ensure national water security.

This dissertation focuses on the El Marsa desalination plant, which plays a key role in supplying drinking water to several communes in the eastern part of the capital. The main objective of this work is to optimize the performance of the plant in order to ensure reliable, efficient, and sustainable production. The study also aims to improve the overall performance of the system to meet future water demands, considering population growth and climate change.

Beyond the technical aspect, this work highlights the importance of planning, modernization, and reliability of infrastructure within the framework of a national strategy for integrated and sustainable water management.

**Keywords:** Drinking water, Desalination, Non-conventional resources, Water security, Algiers.

# Sommaire

Remerciements

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale.....1

## **CHAPITRE I : LES RESSOURCES HYDRIQUES EN ALGÉRIE**

|       |                                                   |    |
|-------|---------------------------------------------------|----|
| 1     | Introduction :                                    | 3  |
| 2     | Répartition Mondiale des Ressources Hydriques     | 3  |
| 3     | Équilibre entre Offre et Demande Hydrique         | 4  |
| 3.1   | Consommations Domestiques                         | 4  |
| 3.2   | Usages Agricoles                                  | 4  |
| 3.3   | Usages au Secteur Industriel                      | 4  |
| 3.4   | Indicateurs de Stress Hydrique                    | 5  |
| 4     | Situation Hydrique Algérienne                     | 5  |
| 5     | Mobilisation des Ressources Hydriques             | 6  |
| 5.1   | Eaux Superficielles                               | 6  |
| 5.2   | Eaux Souterraines                                 | 6  |
| 5.3   | Ressources Non-Conventionnelles                   | 7  |
| 6     | Développement du Dessalement en Algérie           | 7  |
| 6.1   | Historique et Technologies                        | 7  |
| 6.2   | Programme National de Dessalement                 | 8  |
| 6.3   | Installations par Secteur                         | 8  |
| 6.4   | Programme d'Urgence (2002-2003)                   | 9  |
| 6.4.1 | Urgence climatique                                | 9  |
| 6.4.2 | Évolution vers les stations mobiles modernes [24] | 9  |
| 6.5   | Grandes Installations en Cours                    | 9  |
| 7     | Conclusion :                                      | 12 |

## **CHAPITRE II : Les principales technologies du dessalement**

|     |                                                      |    |
|-----|------------------------------------------------------|----|
| 1   | Introduction :                                       | 14 |
| 2   | Généralités :                                        | 14 |
| 3   | Procédés de distillation :                           | 15 |
| 3.1 | Distillation à simple effet :                        | 15 |
| 3.2 | Distillation à effets multiples (MED)                | 15 |
| 3.3 | Distillation à détente instantanée multi-étage (MSF) | 16 |

|       |                                                                                   |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.4   | Compression de vapeur (VC) : .....                                                | 17 |
| 3.5   | Les Avantages et les Inconvénients de procédés de distillation : .....            | 18 |
| 4     | Procédés à membranes : .....                                                      | 19 |
| 4.1   | L'électrodialyse : .....                                                          | 19 |
| 4.1.1 | Les Avantages et les Inconvénients de L'électrodialyse : .....                    | 20 |
| 4.2   | L'osmose inverse : .....                                                          | 20 |
| 4.2.1 | Les Avantages et les Inconvénients de L'osmose inverse : .....                    | 21 |
| 5     | Impact du Dessalement par Osmose Inverse sur l'Environnement .....                | 23 |
| 6     | Conséquences Potentielles des Déversements de Saumures sur l'Écosystème Marin.... | 23 |
| 7     | Sources et Typologie des Émissions et Rejets : .....                              | 24 |
| 7.1   | La Saumure Concentrée : .....                                                     | 24 |
| 7.2   | Les Déversements Chimiques.....                                                   | 24 |
| 7.3   | Rejet des Eaux de Nettoyage à Contre-courant des Membranes .....                  | 26 |
| 7.4   | Les Émissions Atmosphériques.....                                                 | 27 |
| 8     | Nuisances Sonores .....                                                           | 28 |
| 9     | Les Défis Techniques.....                                                         | 28 |
| 10    | L'Aspect Économique .....                                                         | 28 |
| 11    | Effets dus au Prélèvement d'Eau Marine : .....                                    | 30 |
| 12    | Conclusion : .....                                                                | 30 |

### **Chapitre III : Description de la station de dessalement AL MARSA**

|       |                                                             |    |
|-------|-------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Introduction : .....                                        | 32 |
| 2     | Situation géographique de la station : .....                | 32 |
| 3     | Processus du dessalement dans la station d'El Marsa : ..... | 34 |
| 3.1   | Le captage.....                                             | 35 |
| 3.1.1 | La tour de captage : .....                                  | 35 |
| 3.1.2 | La conduite d'amenée: .....                                 | 35 |
| 3.1.3 | Le pré chloration .....                                     | 36 |
| 3.1.4 | L'acidification .....                                       | 36 |
| 3.1.5 | Le dégrilleur : .....                                       | 36 |
| 3.1.6 | Le tamis rotatif [9] : .....                                | 37 |
| 3.1.7 | Le réservoir de captage : .....                             | 38 |
| 3.1.8 | Pompes de relevage d'eau de mer [9] : .....                 | 38 |

|       |                                                       |    |
|-------|-------------------------------------------------------|----|
| 3.2   | Prétraitement .....                                   | 39 |
| 3.2.1 | Coagulation/Floculation : .....                       | 39 |
| 3.2.2 | Les Décanteurs lamellaires : .....                    | 40 |
| 3.2.3 | Filtre à multicouche : .....                          | 41 |
| 3.2.4 | Filtre à cartouche : .....                            | 42 |
| 3.2.5 | La dé chloration : .....                              | 44 |
| 3.2.6 | Pompes de filtrat : .....                             | 44 |
| 3.2.7 | Systèmes de dosage d'antitartre et de biocide : ..... | 45 |
| 3.3   | ETAPE D'OSMOSE INVERSE : .....                        | 45 |
| 3.3.1 | Le processus d'OI et l'équipement principal : .....   | 45 |
| 3.3.2 | Pompes à haute pression d'osmose inverse : .....      | 46 |
| 3.3.3 | Échangeurs de pression (ERI) : .....                  | 47 |
| 3.3.4 | Unité CIP : .....                                     | 47 |
| 3.4   | Reminéralisations : .....                             | 47 |
| 4     | Conclusion : .....                                    | 48 |

## **CHAPITRE IV : Estimation de l'évolution des besoins en eau**

|       |                                                                         |    |
|-------|-------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Introduction .....                                                      | 50 |
| 2     | Estimation et évolution des besoins futurs (Horizons de calcul) : ..... | 50 |
| 2.1   | Evaluation de la population : .....                                     | 50 |
| 2.2   | Dotation : .....                                                        | 51 |
| 2.3   | Estimation des besoins journaliers.....                                 | 51 |
| 2.3.1 | Besoins domestiques : .....                                             | 52 |
| 2.3.2 | Besoins des équipements : .....                                         | 52 |
| 3     | Critères de potabilité d'une eau destinée à la consommation.....        | 53 |
| 3.1   | Paramètres organoleptiques : .....                                      | 54 |
| 3.2   | Les paramètres physico-chimiques : .....                                | 54 |
| 3.3   | Les paramètres bactériologiques : .....                                 | 54 |
| 3.4   | Matières en suspension : .....                                          | 54 |
| 3.5   | La conductivité électrique : .....                                      | 54 |
| 3.6   | Les normes de potabilité .....                                          | 54 |
| 4     | Conclusion : .....                                                      | 55 |

## **CHAPITRE V : OPTIMISATION de la performance de la station de dessalement EL MARSA**

|       |                                                                       |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Introduction :                                                        | 57 |
| 2     | Analyse des Performances de Production de la Station de Dessalement : | 57 |
| 3     | Impact des microcoupures électriques sur l'exploitation               | 58 |
| 3.1   | Coups de bélier dus aux microcoupures électriques                     | 58 |
| 3.2   | Détériorations des joints toriques causée par les microcoupures       | 59 |
| 4     | Présentation des Données de Production                                | 60 |
| 4.1   | Configuration de la Station                                           | 60 |
| 4.2   | Analyse Statistique des Performances                                  | 60 |
| 4.2.1 | Les débits moyens de production                                       | 60 |
| 4.2.2 | Production Journalière :                                              | 61 |
| 4.3   | Analyse des Incidents et Maintenance :                                | 61 |
| 5     | IDENTIFICATION DES PRINCIPALES DÉFAILLANCES                           | 62 |
| 5.1   | DÉFAILLANCES ÉLECTRIQUES                                              | 62 |
| 5.1.1 | Arrêts dus aux perturbations électriques (Sonelgaz)                   | 62 |
| 5.1.2 | Défaut de variateur de fréquence                                      | 62 |
| 5.2   | DÉFAILLANCES MÉCANIQUES                                               | 63 |
| 5.2.1 | Dégradation des joints toriques                                       | 63 |
| 5.2.2 | Problèmes d'amorçage de pompe :                                       | 63 |
| 5.2.3 | Fuite sur la conduite de distribution                                 | 64 |
| 5.3   | DÉFAILLANCES INSTRUMENTALES                                           | 64 |
| 5.3.1 | Conductimètre                                                         | 64 |
| 5.3.2 | Les débitmètres d'expédition                                          | 64 |
| 6     | SOLUTIONS PROPOSÉES ET RECOMMANDATIONS                                | 64 |
| 6.1   | OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE                                        | 64 |
| 6.1.1 | Joints toriques                                                       | 64 |
| 6.1.2 | Systèmes de pompage                                                   | 65 |
| 6.2   | AMÉLIORATION DE LA FIABILITÉ :                                        | 65 |
| 6.2.1 | Alimentation électrique :                                             | 65 |
| 6.2.2 | Variateurs et contrôle :                                              | 65 |
| 6.3   | AMÉLIORATION DE L'INSTRUMENTATION :                                   | 65 |
| 6.3.1 | Systèmes de mesure :                                                  | 65 |
| 6.3.2 | Détection et surveillance :                                           | 65 |
| 6.4   | OPTIMISATION DU PROCÉDÉ :                                             | 65 |

|       |                                        |    |
|-------|----------------------------------------|----|
| 6.4.1 | Gestion des membranes : .....          | 65 |
| 6.4.2 | Protection des infrastructures : ..... | 65 |
| 7     | PLAN D'ACTION PRIORITAIRE.....         | 66 |
| 7.1   | Phase 1 : Actions Immédiates.....      | 66 |
| 7.2   | Phase 2 : Amélioration Continue .....  | 66 |
| 7.3   | Phase 3 : Modernisation .....          | 66 |
| 8     | Conclusion : .....                     | 66 |

## **CHAPITRE VI : amélioration de performance du la station d'El MARSA avec la simulation**

|       |                                                                      |    |
|-------|----------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Introduction : .....                                                 | 68 |
| 2     | Présentation du logiciel LG Q+ .....                                 | 68 |
| 3     | Fonctionnalités principales .....                                    | 68 |
| 4     | Résultats fournis .....                                              | 68 |
| 5     | Avantages techniques .....                                           | 68 |
| 6     | L'utilisation de logiciel LG Q+ : .....                              | 69 |
| 6.1   | L'information de projet : .....                                      | 69 |
| 6.2   | Les données de l'eau : .....                                         | 70 |
| 6.3   | Configuration du profil chimique de l'eau d'alimentation : .....     | 70 |
| 6.4   | Configuration des débits et du taux de conversion du système : ..... | 71 |
| 6.5   | Configuration des membranes et dimensionnement du système : .....    | 72 |
| 7     | Caractérisation de la ressource hydrique : .....                     | 72 |
| 7.1   | Paramètres de Comparaison et Méthodologie .....                      | 73 |
| 7.1.1 | Conditions d'Essai Normalisées.....                                  | 73 |
| 7.1.2 | Paramètres Constants : .....                                         | 73 |
| 7.2   | Optimisation du Taux de Récupération.....                            | 74 |
| 7.3   | Stratégies de Récupération par Typologie d'Installation .....        | 74 |
| 7.4   | Calcul du Dimensionnement Membranaire : .....                        | 75 |
| 7.4.1 | Détermination du Nombre d'Éléments.....                              | 75 |
| 7.4.2 | Dimensionnement des Tubes de Pression .....                          | 75 |
| 8     | Méthodologie de simulation.....                                      | 76 |
| 8.1   | Outil de simulation utilisé.....                                     | 76 |
| 8.2   | Paramètres d'étude .....                                             | 76 |
| 8.3   | Paramètres analysés.....                                             | 76 |

|      |                                                                        |    |
|------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 9    | Résultats finaux de la simulation .....                                | 77 |
| 9.1  | Configuration Standard – Taux de récupération $Y = 44.6\%$ .....       | 78 |
| 9.2  | Configuration Intermédiaire – Taux de récupération $Y = 48\%$ .....    | 79 |
| 9.3  | Configuration Optimisée – Taux de récupération $Y = 50\%$ .....        | 80 |
| 9.4  | Configuration Maximale – Taux de récupération $Y = 52\%$ .....         | 81 |
| 9.5  | Configuration Étendue – Taux de récupération $Y = 54\%$ .....          | 82 |
| 9.6  | Analyse comparative globale .....                                      | 82 |
| 9.7  | La qualité d’eaux de production .....                                  | 84 |
| 9.8  | Efficacité Énergétique : .....                                         | 85 |
| 10   | Adaptation du taux de récupération en fonction de la température ..... | 86 |
| 11   | Bénéfices techniques et opérationnels de l'étude .....                 | 87 |
| 12   | Recommandations .....                                                  | 87 |
| 13   | Conditions de Faisabilité .....                                        | 87 |
| 13.1 | Prérequis Techniques : .....                                           | 87 |
| 13.2 | Indicateurs de Performance Critiques .....                             | 87 |
| 14   | Conclusion : .....                                                     | 88 |
|      | Conclusion générale : .....                                            | 92 |
|      | Références bibliographiques .....                                      | 93 |

## Liste des tableaux

### CHAPITRE I : LES RESSOURCES HYDRIQUES EN ALGÉRIE

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 1:</b> Distribution géographique de la production d'eau dessalée mondiale [1] ..... | 3  |
| <b>Tableau 2 :</b> Bilan hydrique d'une culture de maïs en région tempérée [1] .....           | 4  |
| <b>Tableau 3:</b> Consommations industrielles spécifiques [1] .....                            | 5  |
| <b>Tableau 4:</b> Seuils de stress hydrique [1] .....                                          | 5  |
| <b>Tableau 5:</b> Distribution régionale des eaux superficielles [17] .....                    | 6  |
| <b>Tableau 6 :</b> Répartition des eaux souterraines septentrionales [17].....                 | 6  |
| <b>Tableau 7 :</b> Exploitation des aquifères sahariens [17] .....                             | 7  |
| <b>Tableau 8:</b> Stations exploitées par Sonelgaz [21]. .....                                 | 8  |
| <b>Tableau 9 :</b> Principales stations en développement .....                                 | 11 |

### CHAPITRE II : Les principales technologies du dessalement

|                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 10:</b> Dessalement de l'eau de mer: bilan des dernières avancées technologique ; bilan économique; analyse critique en fonction des contextes [20] [21][22]. ..... | 22 |
| <b>Tableau 11:</b> Synthèse des étapes de production d'eau potable par OI et devenir des produits utilisés [13].....                                                           | 25 |
| <b>Tableau 12:</b> Composition chimique de la saumure comparée à l'eau de mer [11] .....                                                                                       | 27 |
| <b>Tableau 13:</b> Indicateurs de durabilité pour les installations d'OI et de MSF avec source locale d'énergie électrique [11] .....                                          | 28 |
| <b>Tableau 14:</b> Évaluation des impacts associés à l'osmose inverse [14].....                                                                                                | 29 |

### Chapitre III : Description de la station de la station de dessalement AL MARSA

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 15:</b> Les Caractéristiques du dégrilleur .....          | 37 |
| <b>Tableau 16:</b> caractéristiques du dégrilleur tamis rotatif..... | 38 |
| <b>Tableau 17:</b> Débits de l'unité de dessalement par OI.....      | 45 |

### CHAPITRE IV : Estimation de l'évolution des besoins en eau

|                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 18:</b> Evolution démographique de la zone d'étude. ....                                                                    | 50 |
| <b>Tableau 19:</b> Débit moyen journalier domestique à différents horizons.....                                                        | 52 |
| <b>Tableau 20:</b> Besoins moyens en eau totales pour chaque horizon.....                                                              | 52 |
| <b>Tableau 21:</b> Consommations journalières avec coefficients maximal journalier. ....                                               | 53 |
| <b>Tableau 22:</b> Normes de potabilité de l'eau fixées par le ministère algérien des ressources en Eau (Journal officiel, 2014) ..... | 54 |

### CHAPITRE V : OPTIMISATION de la performance de la station de dessalement EL MARSA

### CHAPITRE VI : amélioration de performance du la station d'El MARSA avec la simulation

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 23:</b> Paramètres de l'eau de mer .....                               | 73 |
| <b>Tableau 24:</b> Les débits de conceptions de la station d'El Marsa .....       | 74 |
| <b>Tableau 25:</b> Résultats de simulation pour Y = 44,6 % avec logiciel Q+ ..... | 78 |
| <b>Tableau 26:</b> Résultats de simulation pour Y = 48 % avec logiciel Q+ .....   | 79 |
| <b>Tableau 27:</b> Résultats de simulation pour Y = 50 % avec logiciel Q+ .....   | 80 |

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 28:</b> Résultats de simulation pour $Y = 52\%$ avec logiciel Q+ .....                                 | 81 |
| <b>Tableau 29:</b> Comparaison des résultats de la simulation avec logiciel Q+.....                               | 82 |
| <b>Tableau 30:</b> Résultats de simulation de TDS avec logiciel Q+ .....                                          | 85 |
| <b>Tableau 31:</b> le pourcentage d'augmentation de l'énergie spécifique d' $Y = 50$ par rapport à $Y = 45$ ..... | 85 |
| <b>Tableau 32:</b> le pourcentage d'augmentation de l'énergie spécifique d' $Y = 52$ par rapport à $Y = 45$ ..... | 85 |

## Liste des figures

### CHAPITRE I : LES RESSOURCES HYDRIQUES EN ALGÉRIE

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1: Répartition des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie..... | 10 |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|

### CHAPITRE II : Les principales technologies du dessalement

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 2: Les divers procédés de dessalement [1] .....                               | 14 |
| Figure 3: distillation à simple effet, [source : SIDEM].....                         | 15 |
| Figure 4: Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED)..... | 16 |
| Figure 5: un processus typique de MSF [3]. .....                                     | 17 |
| Figure 6: Principe de distillation à compression de vapeur, [7].....                 | 18 |
| Figure 7: principe de l'électrodialyse.....                                          | 19 |
| Figure 8: Principe de l'osmose et de l'osmose inverse .....                          | 21 |

### Chapitre III : Description de la station de la station de dessalement AL MARSA

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 9: Localisation géographique de la station de dessalement d'El Marsa (Alger) ..... | 33 |
| Figure 10: la station de dessalement El Marsa.....                                        | 34 |
| Figure 11: La tour de captage.....                                                        | 35 |
| Figure 12: Dégrilleur.....                                                                | 36 |
| Figure 13: Tamis rotatif .....                                                            | 37 |
| Figure 14: Réservoir de pompage (élaboré par l'étudiante) .....                           | 38 |
| Figure 15: Le mélangeur statique.....                                                     | 39 |
| Figure 16: Décanteur lamellaire.....                                                      | 40 |
| Figure 17: Filtres gravitaires (Filtre multicouche) .....                                 | 42 |
| Figure 18: Filtres à cartouches .....                                                     | 43 |
| Figure 19: L'appareil de mesure de SDI (élaboré par l'étudiante) .....                    | 44 |
| Figure 20: le RACK (élaboré par l'étudiante) .....                                        | 46 |
| Figure 21: Pompes à haute pression (élaboré par l'étudiante).....                         | 46 |
| Figure 22: Échangeurs de pression (élaboré par l'étudiante) .....                         | 47 |

### CHAPITRE IV : Estimation de l'évolution des besoins en eau

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Figure 23: Evolution démographique de la zone d'étude. .... | 51 |
|-------------------------------------------------------------|----|

### CHAPITRE V : OPTIMISATION de la performance de la station de dessalement EL MARSA

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 24: Changement du joint torique du tube à pression .....             | 59 |
| Figure 25: les débits de production de chaque rack dans les 137 jours ..... | 60 |

### CHAPITRE VI : amélioration de performance de la station d'El MARSA avec la simulation

|                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 26: Fenêtre initiale du logiciel Q+(Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution)<br>.....  | 69 |
| Figure 27: Les informations de projet (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution). 70           |    |
| Figure 28: Sélectionnez les unités (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution).....             | 70 |
| Figure 29: Caractéristiques de l'eau d'alimentation (Seawater–Open Intake, Température et<br>pH)..... | 71 |

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 30:</b> Profil chimique de l'eau d'alimentation par Q+ (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution, 2025) .....                                | 71 |
| <b>Figure 31:</b> Configuration des débits du système par Q+ (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution, 2025) .....                                    | 72 |
| <b>Figure 32:</b> Configuration des membranes du système par Q+ (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution, 2025) .....                                 | 72 |
| <b>Figure 33:</b> La source d'eau d'alimentation (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution).....                                                       | 74 |
| <b>Figure 34:</b> Rapport des résultats de la simulation d'Y=44.6% (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution) .....                                    | 77 |
| <b>Figure 35:</b> Rapport des résultats de la simulation de la qualité d'eau du perméat de de Y=44.6% (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution) ..... | 78 |
| <b>Figure 36:</b> Variation de La pression d'alimentation (bar) en fonction de la température pour différentes valeurs de Y.....                              | 83 |
| <b>Figure 37:</b> Variation de l'énergie spécifique en fonction de la température pour différentes valeurs de Y.....                                          | 84 |

**Liste des planches :**

**PLANCHE 01 : Plan de masse de la station de dessalement**

**PLANCHE 02 : Schéma synoptique du premier étage de l'unité d'osmose inverse de la station de dessalement**

**PLANCHE 03 : Diagramme de tuyauterie et instrumentations (P&ID) d'une unité d'osmose inverse de dessalement**

**PLANCHE 04 : Plan de situation de la station de dessalement**

# INTRODUCTON GENERALE

# Introduction générale

L'eau constitue une ressource vitale pour le développement économique, social et environnemental des sociétés. Cependant, la disponibilité en eau douce est de plus en plus limitée en raison de la croissance démographique, de l'urbanisation rapide et du changement climatique. De nombreux pays, notamment ceux situés dans les régions arides et semi-arides comme l'Algérie, sont confrontés à un déséquilibre croissant entre l'offre et la demande en eau potable. Face à ce défi, le dessalement de l'eau de mer s'est imposé comme une solution stratégique pour diversifier et sécuriser l'approvisionnement en eau.

En Algérie, un vaste programme de construction des stations de dessalement a été lancé au cours des deux dernières décennies afin de réduire la dépendance vis-à-vis des ressources hydriques conventionnelles. Parmi ces infrastructures figure la station de dessalement d'El Marsa, mise en service pour répondre aux besoins croissants en eau potable de la capitale et de ses environs. D'une capacité de 60 000 m<sup>3</sup>/jour, cette station utilise le procédé d'osmose inverse, reconnu pour son efficacité dans le traitement des eaux salines et saumâtres.

Toutefois, malgré leurs performances, les stations de dessalement rencontrent des défis liés à l'optimisation énergétique, à la maintenance des équipements, à la gestion de la qualité de l'eau produite et à la durabilité environnementale. Dans ce contexte, l'amélioration de la performance des installations existantes constitue un enjeu majeur, permettant non seulement de garantir une production stable et conforme aux normes de potabilité, mais également de réduire les coûts d'exploitation et l'impact écologique.

Ce mémoire s'inscrit dans cette perspective et porte sur l'étude et l'optimisation de la station de dessalement d'El Marsa. Il vise à analyser son fonctionnement actuel, identifier les contraintes techniques et opérationnelles, puis proposer des pistes d'amélioration afin de renforcer son rendement et sa fiabilité. L'objectif est de contribuer à une meilleure gestion de la ressource en eau et à la pérennité de l'approvisionnement en eau potable dans la région d'Alger.

L'approche adoptée dans ce travail consiste, dans un premier temps, à réaliser une analyse approfondie du fonctionnement de la station afin d'identifier les principaux facteurs limitant sa performance. Dans un second temps, il s'agira de proposer des pistes d'amélioration et des recommandations pratiques visant à optimiser son rendement, à accroître sa fiabilité et à prolonger la durée de vie de ses composants critiques. Ces propositions s'appuieront sur des données techniques collectées sur site, mais également sur des références scientifiques et des expériences internationales en matière de dessalement.

L'objectif global de ce mémoire est de contribuer à une meilleure gestion de la ressource en eau à travers l'optimisation d'une infrastructure stratégique. En améliorant la performance de la station d'El Marsa, il s'agit non seulement d'assurer une production d'eau potable stable, conforme aux normes nationales et internationales de qualité, mais aussi de réduire les coûts d'exploitation et de minimiser l'impact environnemental lié à cette technologie. À terme, ce travail vise à participer à la pérennité de l'approvisionnement en eau potable de la région d'Alger et, plus largement, à renforcer la résilience du système national de gestion de l'eau face aux défis actuels et futurs.

CHAPITRE I :  
LES RESSOURCES  
HYDRIQUES EN ALGÉRIE

## 1 Introduction :

Les ressources hydriques englobent l'ensemble des eaux accessibles et exploitables par l'homme et les écosystèmes à travers les différentes phases du cycle hydrologique. Ces ressources, bien que limitées quantitativement et qualitativement, constituent un élément vital pour la survie humaine et le maintien des équilibres écosystémiques terrestres. Elles alimentent les secteurs stratégiques de l'agriculture, de l'industrie et de l'approvisionnement domestique.

## 2 Répartition Mondiale des Ressources Hydriques

La planète Terre contient des réserves d'eau sous deux formes principales : visible (océans, calottes glaciaires, lacs, cours d'eau, nuages) et invisible (nappes phréatiques). Cette répartition révèle une disproportion majeure puisque les océans concentrent 97% du total, tandis que 2% demeurent figés sous forme glaciaire. La fraction exploitable d'eau douce liquide ne représente qu'environ 1% de l'ensemble des ressources planétaires.

- Les eaux douces continentales se déclinent selon leur origine :
- Précipitations atmosphériques
- Eaux superficielles (cours d'eau, étendues lacustres)
- Eaux souterraines (aquifères, formations géologiques perméables) Ces dernières constituent 0,6% de la ressource hydrique totale [15].

**Tableau 1:** Distribution géographique de la production d'eau dessalée mondiale [1]

| Région           | 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /jour | Pourcentage (%) |
|------------------|--------------------------------------|-----------------|
| Moyen Orient     | 21                                   | 50              |
| Amérique du Nord | 7,56                                 | 18              |
| Asie             | 5,46                                 | 13              |
| Europe           | 5,46                                 | 13              |
| Afrique          | 2,52                                 | 6               |
| <b>Total</b>     | <b>42</b>                            | <b>100</b>      |

Ce tableau révèle une répartition très déséquilibrée de la production mondiale d'eau dessalée. Le Moyen-Orient domine largement avec 50% de la production totale ( $21 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{jour}$  sur 42), ce qui s'explique par la rareté des ressources en eau douce dans cette région et les capacités financières des pays pétroliers pour investir dans ces technologies coûteuses.

L'Amérique du Nord arrive en deuxième position avec 18% de la production, suivie par l'Asie et l'Europe (13% chacune). L'Afrique ne représente que 6% de la production mondiale, malgré les besoins importants en eau de nombreux pays du continent, probablement en raison des coûts élevés du dessalement.

Cette distribution géographique reflète à la fois les besoins hydriques régionaux, les capacités économiques et le niveau de développement technologique des différentes zones du monde. [15].

### 3 Équilibre entre Offre et Demande Hydrique

Les réserves hydriques renouvelables naturelles s'estiment à partir des flux cycliques, notamment la circulation des eaux continentales évaluée à 40 000 km<sup>3</sup> annuellement. Avec une population mondiale d'environ 6 milliards d'habitants, la disponibilité théorique moyenne atteint 7 000 m<sup>3</sup>/habitant/an, soit 20 m<sup>3</sup>/jour/habitant pour l'ensemble des usages.

Malgré cette abondance théorique, plusieurs défis émergent :

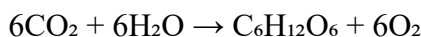
- Croissance démographique continue face à des ressources fixes
- Répartition géographique inégale (30% des terres émergées en zones arides/semi-arides)
- Contrastes régionaux extrêmes entre zones équatoriales humides et régions désertiques

#### 3.1 Consommations Domestiques

Les besoins domestiques varient considérablement selon le niveau de développement : 600 litres/jour aux États-Unis, 250-300 litres en Europe, contre seulement 30 litres en Afrique (5 litres à Madagascar). Cette consommation connaît une tendance haussière généralisée, excepté dans certains pays confrontés à la rareté physique comme l'Égypte.

#### 3.2 Usages Agricoles

L'agriculture mobilise approximativement 75% de la consommation hydrique mondiale. L'eau constitue un facteur limitant de la productivité végétale, représentant jusqu'à 95% du poids des tissus végétaux. Elle assure les fonctions vitales de turgescence, transport des nutriments et participe aux réactions photosynthétiques :



La production d'un kilogramme de biomasse végétale nécessite entre 300 litres (climat humide) et 1 000 litres (climat semi-aride) [15].

**Tableau 2 : Bilan hydrique d'une culture de maïs en région tempérée [1]**

| Utilisation         | m <sup>3</sup> d'eau/ha | Hauteur d'eau (mm) | Kg d'eau/kg matière sèche |
|---------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------|
| Eau métabolisée     | 20                      | 2                  | 1,2                       |
| Eau de constitution | 55                      | 5,5                | 3,2                       |
| Eau transpirée      | 5300                    | 530                | 311                       |

Dans ce tableau elle montre que les plantes utilisent une petite quantité d'eau pour le métabolisme (20 m<sup>3</sup>/ha) et la constitution de leurs tissus (55 m<sup>3</sup>/ha). Par contre, la plus grande partie de l'eau, environ 5300 m<sup>3</sup>/ha, est perdue par transpiration. Cela veut dire que la plante consomme beaucoup d'eau surtout pour réguler sa température et échanger avec l'air, bien plus que pour sa croissance directe.

#### 3.3 Usages au Secteur Industriel

L'industrie utilise l'eau comme solvant, diluant ou vecteur d'évacuation des effluents. Les secteurs de transformation présentent des consommations particulièrement élevées comme on peut le voir dans ce tableau :

**Tableau 3:** Consommations industrielles spécifiques [1]

| Secteur industriel      | Consommation                |
|-------------------------|-----------------------------|
| Raffinage pétrolier     | 10 t d'eau/t de pétrole     |
| Distillation alcoolique | 100 t d'eau/t d'alcool      |
| Pâte à papier           | 250 t d'eau/t de production |
| Sidérurgie              | 270 t d'eau/t d'acier       |
| Fibres synthétiques     | 5000 t d'eau/t de fibres    |

Ce tableau met en évidence la forte disparité des besoins en eau selon les secteurs industriels. Les fibres synthétiques se distinguent par une consommation très élevée (5000 L/t), suivies par la sidérurgie (270 L/t) et la pâte à papier (250 L/t). En revanche, la distillation alcoolique (100 L/L) et le raffinage pétrolier (10 L/t) nécessitent beaucoup moins d'eau. Ces écarts, allant d'un facteur 1 à 500, montrent la nécessité d'une gestion différenciée de l'eau et expliquent l'implantation de certaines industries à proximité de ressources hydriques abondantes.

### 3.4 Indicateurs de Stress Hydrique

La disponibilité per capita permet d'établir des seuils critiques :

**Tableau 4:** Seuils de stress hydrique [1]

| Niveau de stress | Ressources (m <sup>3</sup> /an/habitant) |
|------------------|------------------------------------------|
| Seuil de tension | ≤ 1000                                   |
| Seuil de pénurie | ≤ 500                                    |

L'indice d'exploitation ( $I_{exp}$ ) quantifie la pression sur les ressources :

$$I_{exp} = \text{Prélèvements} / \text{Ressources renouvelables disponibles}$$

Des indices  $\geq 25\%$  signalent des tensions locales,  $\geq 50\%$  annoncent des pénuries conjoncturelles, et  $\geq 100\%$  indiquent des pénuries structurelles [1].

## 4 Situation Hydrique Algérienne

L'Algérie figure parmi les vingt pays classés sous le seuil de tension hydrique en 1990. Avec ses 2 381 741 km<sup>2</sup>, répartis en 48 wilayas, le pays présente 80% de territoire désertique. Les ressources hydriques demeurent limitées, irrégulières et concentrées sur la bande littorale.

Les précipitations annuelles totalisent environ 100 milliards de m<sup>3</sup>, se répartissant en 12,4 milliards de m<sup>3</sup> d'eaux superficielles et 2,8 milliards de m<sup>3</sup> d'eaux souterraines, incluant 800 millions de m<sup>3</sup> de ressources fossiles sahariennes.

Le potentiel hydrique national s'élève à près de 20 milliards de m<sup>3</sup>, dont 75% renouvelables (60% superficielles, 15% souterraines). Les ressources non-renouvelables concernent les aquifères sahariens exploités comme gisements, entraînant un rabattement continu des niveaux piézométriques [16].

## 5 Mobilisation des Ressources Hydriques

Le programme quinquennal 2010-2014 prévoyait 80 barrages avec une capacité globale de 9 milliards de m<sup>3</sup>. Cette infrastructure représente une augmentation de 50% par rapport à la décennie précédente, passant de 44 ouvrages (3,3 milliards de m<sup>3</sup>) en 1999 à 65 barrages opérationnels (7,5 milliards de m<sup>3</sup>).

### 5.1 Eaux Superficielles

Les estimations coloniales évaluaient les écoulements méditerranéens à 15 milliards de m<sup>3</sup> (bassin de 123 000 km<sup>2</sup>). Les études récentes de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) et de la Direction des Grands Aménagements Hydrauliques (DGAIH), intégrant les périodes de sécheresse, réévaluent ces ressources à 12,4 milliards de m<sup>3</sup>.

**Tableau 5:** Distribution régionale des eaux superficielles [17]

| <b>Bassin Hydrographique</b>     | <b>Oranie</b> | <b>Chott Chergui</b> | <b>Chelif Zahrez</b> | <b>Algérois Soummam</b> | <b>Hodna Constantinois</b> | <b>Sud</b> | <b>Total</b> |
|----------------------------------|---------------|----------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|------------|--------------|
| Ressources (hm <sup>3</sup> /an) | 1025          | 1840                 | 4380                 | 4500                    | 600                        | -          | 12340        |
| Pourcentage (%)                  | 8,7           | 15,7                 | 37,3                 | 38,3                    | 0,48                       | -          | 100          |

Le régime hydrique se caractérise par une forte irrégularité saisonnière et interannuelle, avec des étiages fréquemment nuls et des crues brèves mais destructrices [17].

### 5.2 Eaux Souterraines

Région septentrionale : L'ANRH et la DGAIH évaluent ces ressources à 1,9 milliard de m<sup>3</sup>, exploitées à plus de 90%. Cette surexploitation critique concerne plus de 12 000 forages, 9 000 sources et 100 000 puits.

**Tableau 6 :** Répartition des eaux souterraines septentrionales [17]

| <b>Bassin</b>                    | <b>Oranie Chott Chergui</b> | <b>Cheliff Zahrez</b> | <b>Algérois Soummam</b> | <b>Hodna Constantinois Seybouse</b> | <b>Total</b> |
|----------------------------------|-----------------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------|
| Ressources (hm <sup>3</sup> /an) | 375                         | 231                   | 745                     | 543                                 | 1894         |
| Pourcentage (%)                  | 19,7                        | 12,2                  | 39,2                    | 28,9                                | 100          |

Région saharienne : Les aquifères sahariens comprennent le Continental Intercalaire (CI) exploité à 56% et le Complexe Terminal (CT). Ces nappes fossiles ne bénéficient que d'un renouvellement limité d'environ 800 millions de m<sup>3</sup>.

**Tableau 7** : Exploitation des aquifères sahariens [17]

| <b>Wilaya</b> | <b>Continental Intercalaire</b> | <b>Complexe Terminal</b> | <b>Total</b>  |
|---------------|---------------------------------|--------------------------|---------------|
| Biskra        | 24,6                            | 9,3                      | 33,9          |
| El Oued       | 310,5                           | 713,9                    | 1024,4        |
| Ouargla       | 507,0                           | 1446,2                   | 1953,2        |
| Ghardaïa      | 559,9                           | -                        | 559,9         |
| Adrar         | 1180,1                          | -                        | 1179,3        |
| <b>Total</b>  | <b>2582,1</b>                   | <b>2169,4</b>            | <b>4751,5</b> |

Le tableau précédent met en évidence l'exploitation des nappes sahariennes en Algérie, réparties entre le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal. Adrar se distingue comme principal pôle d'exploitation (24 % du total, exclusivement sur le Continental Intercalaire, suivi d'Ouargla avec une répartition équilibrée entre les deux nappes. À l'inverse, El Oued mobilise surtout le Complexe Terminal, tandis que certaines wilayas (Ghardaïa, Tamanrasset) exploitent uniquement le Continental Intercalaire. Globalement, l'exploitation du Continental Intercalaire (2582,9 Mm<sup>3</sup>/an) dépasse légèrement celle du Complexe Terminal (2169,4 Mm<sup>3</sup>/an), confirmant le rôle stratégique de ces ressources fossiles dans l'alimentation en eau du Sahara algérien.

### 5.3 Ressources Non-Conventionnelles

Face à la sécheresse chronique et à l'accroissement de la demande, l'Algérie s'oriente vers les ressources alternatives : dessalement d'eau marine, traitement des eaux saumâtres et recyclage des eaux usées. Le littoral de 1200 km offre un potentiel quasi-illimité, tandis que la proximité des centres urbains et industriels optimise la rentabilité économique du dessalement.

## 6 Développement du Dessalement en Algérie

### 6.1 Historique et Technologies

La première installation algérienne de dessalement date de 1964 à Arzew avec une capacité de 576 m<sup>3</sup>/jour utilisant la technologie multi-effets. Cette installation pionnière marquait l'entrée de l'Algérie dans l'ère du dessalement industriel.

Le développement du dessalement en Algérie est étroitement lié au développement des hydrocarbures et à la production d'électricité. L'usine de Mostaganem, mise en service en 1980, atteignait une capacité remarquable de 57 600 m<sup>3</sup>/j, constituant alors la plus importante installation de dessalement mondiale de l'époque.

Il y a Plusieurs organismes interviennent dans le secteur du dessalement :

- Ministère des Ressources en Eau (MRE) : Autorité de tutelle principale
- ADE (Algérienne des Eaux) : Gestion de la distribution d'eau potable
- SONATRACH : Compagnie nationale pétrolière fondée en 1963, aujourd'hui la plus grande entreprise d'Afrique avec 154 filiales

- SONELGAZ : Groupe électrique national
- L'Algérienne de l'Énergie (AEC) : Consortium formé avec Ionics et Sonelgaz pour les partenariats public-privé
- Opérateurs privés : Partenaires technologiques internationaux

## 6.2 Programme National de Dessalement

La sécheresse de 2001 a constitué un tournant décisif pour la politique de l'eau en Algérie, conduisant dès le 19 juin 2001 à l'annonce d'un vaste programme de construction d'usines de dessalement d'eau de mer. Ce plan visait d'une part le secteur de l'eau potable, avec :

- 15 stations planifiées pour une capacité totale de 2,5 millions m<sup>3</sup>/j
- 13 stations opérationnelles en 2014
- Actuellement 25 stations en exploitation sur le littoral, fournissant 18% de l'eau consommée dans le pays et alimentant 6 millions de personnes

D'autre part, le secteur industriel bénéficia de la réalisation de 3 stations totalisant 360 000 m<sup>3</sup>/jour, destinées principalement aux zones énergétiques et industrielles. Sur les 56 installations construites, la majorité repose sur l'osmose inverse, avec :

- 22 installations utilisent l'osmose inverse
- Ces installations produisent 60% de la capacité totale installée
- Diversité technologique : MSF (Multi-Etage Flash), électrodialyse, thermocompression

## 6.3 Installations par Secteur

Le ministère des Ressources en Eau a piloté plusieurs projets stratégiques de dessalement afin d'assurer l'approvisionnement en eau potable dans différentes régions du pays. Parmi les installations principales, on peut citer les stations

- D'Ouenza (wilaya de Guelma), d'une capacité de 3 360 m<sup>3</sup>/jour fonctionnant par osmose inverse,
- d'Ouled Djellal, mise en service en 1981, qui utilise la technologie de l'électrodialyse avec une capacité de 4 320 m<sup>3</sup>/jour.

Plus récemment, des projets d'envergure ont été réalisés, à l'image de la station de Corso, entrée en service en septembre 2023, avec une capacité de 80 000 m<sup>3</sup>/jour, destinée à alimenter les régions ouest et nord de Boumerdès ainsi que l'est d'Alger. On peut également mentionner la station du Hamma, implantée dans le quartier de Belouizdad à Alger, un projet initié en 2002 dans le cadre d'un partenariat public-privé, qui constitue aujourd'hui l'une des unités emblématiques du programme national de dessalement.

**Tableau 8:** Stations exploitées par Sonelgaz [21].

| Centrale         | Capacité (m <sup>3</sup> /j) | Technique         | Année |
|------------------|------------------------------|-------------------|-------|
| Mers. El Hadjadj | 1500                         | Thermocompression | 1977  |
| Mers. El Hadjadj | 2000                         | MSF               | 1991  |
| Cap Djinet       | 2000                         | MSF               | 1985  |
| Djidjel          | 2000                         | MSF               | 1992  |

SONATRACH a joué un rôle de leadership historique dans le développement du dessalement en Algérie. Entre 1964 et 1982, l'entreprise a réalisé pas moins de 31 installations, totalisant une capacité de 107 401 m<sup>3</sup>/jour. Ces unités reposaient sur une diversité de procédés, allant du Multi-Etage Flash (MSF) à l'électrodialyse, en passant par les échangeurs d'ions et les premières applications de l'osmose inverse. Les sources d'alimentation étaient elles aussi variées, incluant aussi bien l'eau de mer que les eaux saumâtres et même certaines eaux lacustres, ce qui illustre la volonté de SONATRACH d'adapter ses choix technologiques aux spécificités locales et aux besoins de ses complexes industriels et énergétiques.

## 6.4 Programme d'Urgence (2002-2003)

### 6.4.1 Urgence climatique

Le programme d'urgence a été déclenché à la suite de la sécheresse de 2001-2002, qui avait fortement impacté la disponibilité en eau potable. À Alger et dans l'ouest du pays, la plage horaire de distribution dont bénéficiait près de 70 % de la population a été réduite de 16 heures par jour à seulement 8 heures, accentuant la pression sur les ressources. Pour répondre rapidement à cette situation critique, les autorités ont opté pour le déploiement de stations mobiles monoblocs, dont les principales caractéristiques peuvent être résumées ainsi :

- Nombre d'unités : 21 stations mobiles installées entre 2002 et 2003
- Capacité totale : environ 57 500 m<sup>3</sup>/jour
- Répartition géographique : implantées dans 7 wilayas côtières afin de rapprocher la production des zones les plus touchées
- Acteurs impliqués : exploitation assurée par l'ADE (Algérienne des Eaux) et l'AEC (Algerian Energy Company, partenariat SONATRACH–SONELGAZ)
- Performance réelle : un rendement limité à environ 70 % de la capacité nominale, en raison de contraintes techniques et d'exploitation

Les fortes précipitations des hivers 2002-2003 et 2003-2004 ont permis d'atténuer temporairement l'urgence, mais le programme s'est poursuivi pour sécuriser l'approvisionnement.

### 6.4.2 Évolution vers les stations mobiles modernes [24]

En 2023, l'Algerian Energy Company (AEC) a annoncé qu'elle entamerait dès 2024 le déploiement des nouvelles stations mobiles de dessalement d'eau de mer pour répondre aux besoins urgents en eau des petites agglomérations et du secteur agricole. Cette nouvelle génération s'appuie sur l'expérience du programme d'urgence initial.

## 6.5 Grandes Installations en Cours

Le programme de dessalement, mis en œuvre à partir de 2003, prévoit la réalisation de 13 stations de dessalement d'une capacité nominale totale de 2,31 millions de m<sup>3</sup>/j, représentant près de 850 millions de m<sup>3</sup>/an, pour desservir 8 millions d'habitants.

À ce jour, onze (11) stations, d'une capacité installée de 2,1 millions m<sup>3</sup>/jour, ont été réalisées et mises en service.

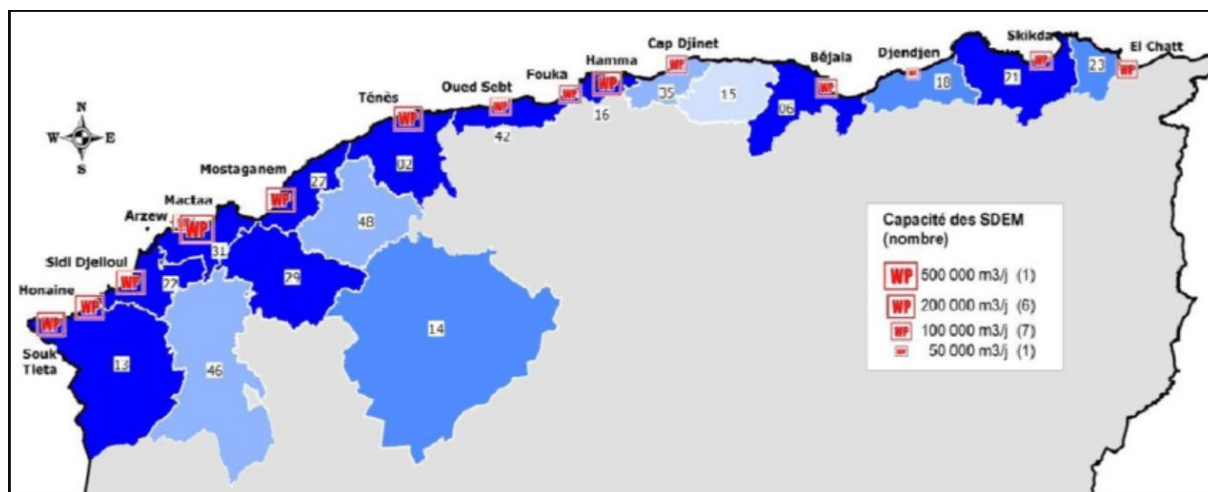


**Figure 1:** Répartition des stations de dessalement d'eau de mer en Algérie

**Tableau 9 : Principales stations en développement**

| <b>Localité</b>             | <b>Capacité<br/>(10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>/j)</b> | <b>Lancement</b> | <b>Mise en<br/>service</b> | <b>Observations</b>                                |
|-----------------------------|------------------------------------------------------|------------------|----------------------------|----------------------------------------------------|
| Kahrama<br>(Arzew)          | 90                                                   | Mai 2002         | Août 2005                  | Centrale électrique<br>300 MW                      |
| Skikda                      | 100                                                  | Août 2005        | Février<br>2009            | -                                                  |
| El Hamma<br>(Alger)         | 200                                                  | Mai 2007         | Juillet 2011               | Extension vers Alger<br>(60 000 m <sup>3</sup> /j) |
| Macta (Oran)                | 500                                                  | 2007             | 2015                       | Plus grande station<br>d'Afrique au<br>lancement   |
| Mostaganem                  | 200                                                  | Juin 2006        | 2011                       | -                                                  |
| Ténès (Chlef)               | 200                                                  | 2007             | 2011                       | -                                                  |
| Souk Tleta<br>(Tlemcen)     | 200                                                  | 2008             | 2011                       | -                                                  |
| Fouka II                    | 300                                                  | 2023             | 2025                       | -                                                  |
| Cap Djinet<br>(Boumerdès)   | 100                                                  | 2009             | 2016                       | -                                                  |
| El Marsa<br>(Alger)         | 60                                                   | 2020             | Juillet 2022               | Station moyenne<br>capacité                        |
| Corso<br>(Mostaganem)       | 80                                                   | 2021             | Septembre<br>2023          | Nouvelle génération                                |
| Cap Djinet 2<br>(Boumerdès) | 300                                                  | 2021             | Février<br>2025            | Grande station<br>stratégique                      |

Les unités réalisées comprennent : Arzew (Oran : 86 000 m<sup>3</sup>/j), de Hamma (Alger : 200 000 m<sup>3</sup>/j), de Skikda (100 000 m<sup>3</sup>/j), de Beni Saf (Ain Temouchent : 200 000 m<sup>3</sup>/j), Mostaganem (200 000 m<sup>3</sup>/j), Fouka (Tipaza : 120 000 m<sup>3</sup>/j). [23]

## 7 Conclusion :

L'examen des différents usages de l'eau met en évidence des contrastes marqués entre les secteurs. En agriculture, la consommation est largement dominée par la transpiration des cultures, traduisant une forte dépendance vis-à-vis des conditions climatiques et des pratiques d'irrigation.

Dans le domaine industriel, les besoins sont très variables mais peuvent atteindre des niveaux particulièrement élevés dans certaines filières, révélant un enjeu majeur en termes d'optimisation et de recyclage des eaux utilisées.

Ces constats soulignent que, bien que l'eau soit un élément vital et renouvelable, sa disponibilité reste limitée et inégalement répartie. La pression croissante liée à la croissance démographique, à l'expansion industrielle et à l'intensification agricole accentue les tensions sur cette ressource stratégique.

Il apparaît donc nécessaire de promouvoir une gestion intégrée et durable de l'eau, avec la conciliation entre les impératifs de production et la préservation des ressources. Cela passe par des techniques plus économiques, comme l'adoption des procédés industriels moins gourmands, ainsi que par le recours aux ressources non conventionnelles telles que le dessalement et la réutilisation des eaux usées.

# CHAPITRE II :

## Les principales technologies du dessalement

## 1 Introduction :

Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres s'est imposé comme une solution fiable et durable. Grâce aux avancées technologiques, plusieurs procédés ont été développés afin de rendre cette eau impropre à la consommation humaine utilisable pour différents besoins.

Les technologies de dessalement les plus répandues se divisent en deux grandes catégories : les procédés thermiques, qui reposent sur l'évaporation et la condensation de l'eau, et les procédés membranaires, qui utilisent des membranes semi-perméables pour séparer les sels de l'eau. Chacune de ces méthodes présente des caractéristiques propres en termes de fonctionnement, de consommation énergétique, de coûts, et d'adaptabilité aux conditions locales.

## 2 Généralités :

Le dessalement de l'eau est un procédé visant à éliminer les sels contenus dans l'eau de mer ou les eaux saumâtres afin de la rendre propre à la consommation. Diverses technologies de dessalement ont été développées à travers le monde, chacune adaptée à des contextes spécifiques. Le choix de la méthode à utiliser dépend principalement de la disponibilité et du type de source d'énergie nécessaire au fonctionnement de l'installation.

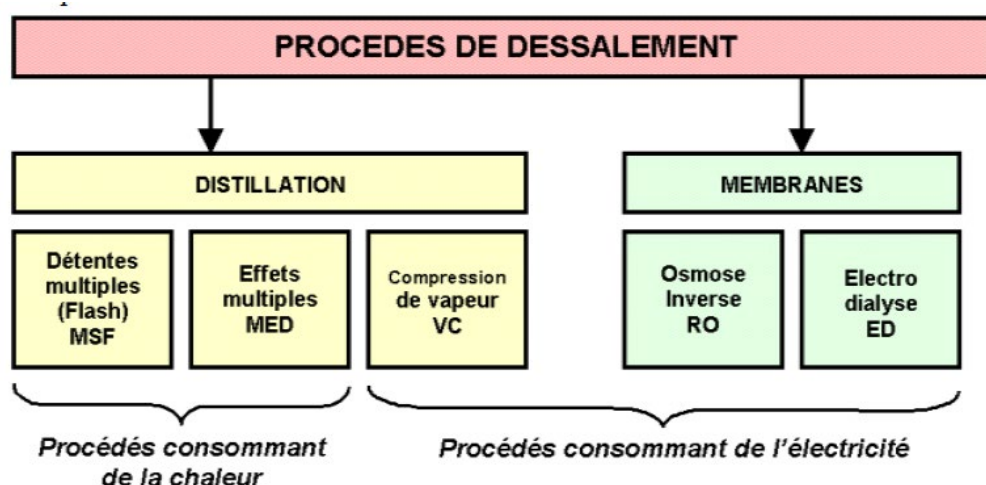


**Figure 2:** Les divers procédés de dessalement [1]

Ce schéma présente les principaux procédés de dessalement : les procédés thermiques (distillation par détente multiple MSF, effets multiples MED, compression de vapeur VC) qui consomment de la chaleur, et les procédés membranaires (osmose inverse RO, électrodialyse ED) qui consomment de l'électricité.

### 3 Procédés de distillation :

#### 3.1 Distillation à simple effet :

Ce procédé est mis en œuvre depuis longtemps sur les navires, où les moteurs Diesel émettent une quantité significative de chaleur récupérable. Son principe est simple : il reproduit le cycle naturel de l'eau. Dans une enceinte fermée, un serpentin de réchauffage porte à

Ébullition l'eau de mer (figure I.1). La vapeur produite se condense au contact d'un deuxième serpentin alimenté par l'eau de mer froide. Un éjecteur (ou une pompe) évacue les gaz incondensables. Un groupe électropompe soutire l'eau condensée ; un deuxième l'eau de mer concentrée ou saumure, [2].

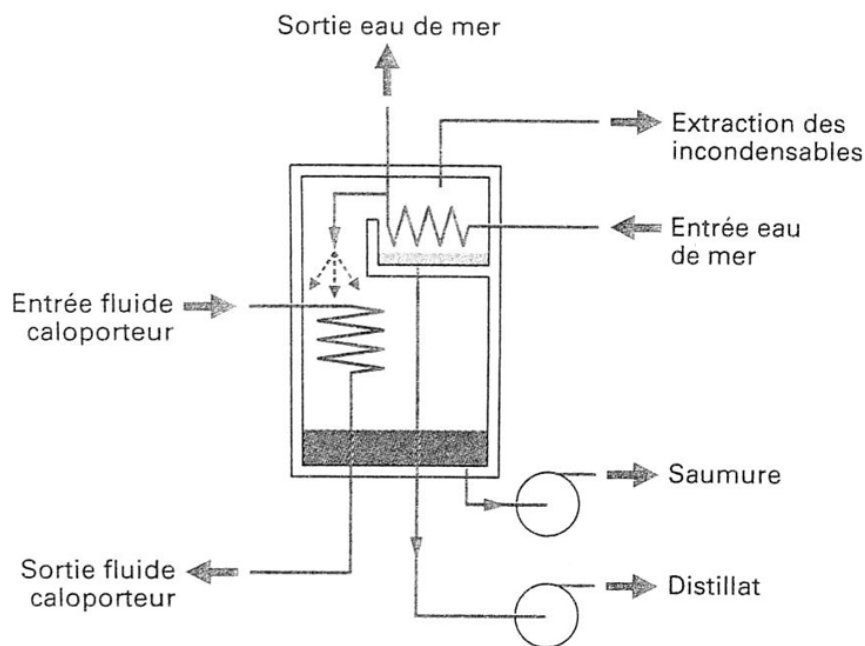


**Figure 3:** distillation à simple effet, [source : SIDEM]

Ce schéma représente un évaporateur de dessalement, où l'eau de mer est chauffée par un fluide caloporteur pour produire de la vapeur, ensuite condensée en distillat (eau douce), tandis que la saumure et les gaz incondensables sont extraits.

#### 3.2 Distillation à effets multiples (MED)

La distillation à effets multiples est une technique thermique avancée de dessalement qui permet de réduire la consommation énergétique par récupération progressive de la chaleur. Elle est largement utilisée dans l'industrie du dessalement, notamment pour les grandes capacités de production.

### Principe de fonctionnement :

Le procédé MED consiste à faire évaporer l'eau de mer en plusieurs étapes successives appelées effets. Chaque effet est maintenu à une pression plus basse que le précédent, ce qui permet à l'eau de bouillir à des températures décroissantes.

La vapeur produite dans un effet est utilisée comme source de chaleur pour évaporer l'eau dans l'effet suivant, d'où un meilleur rendement énergétique.

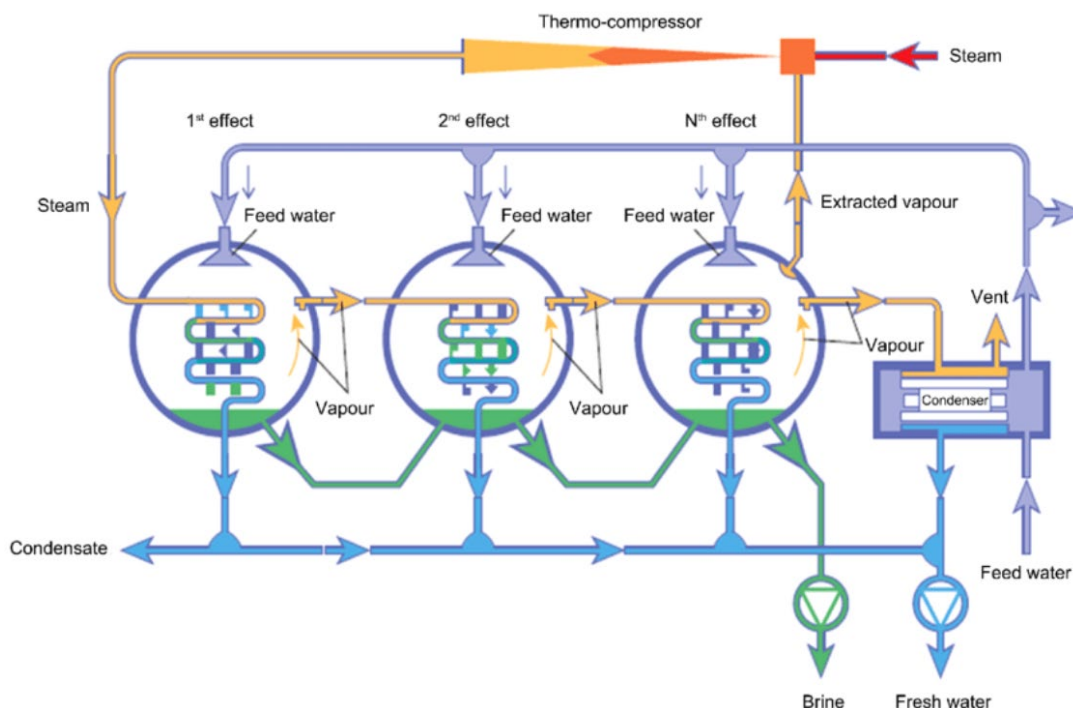


**Figure 4:** Schéma de principe d'un système d'évaporateurs multiples effets (MED)

Ce schéma illustre le procédé de dessalement par distillation à effets multiples (MED) : l'eau de mer est chauffée dans un premier effet grâce à un apport d'énergie thermique, puis la vapeur produite sert à chauffer l'effet suivant, et ainsi de suite, avec des pressions et températures décroissantes ; on récupère à la sortie de chaque effet du distillat (eau douce) et de la saumure, avant condensation finale.

### 3.3 Distillation à détente instantanée multi-étage (MSF)

Le procédé MSF (Multi-Etage Flash) repose sur le principe de l'évaporation instantanée de l'eau salée à travers plusieurs chambres successives à pression décroissante. L'eau est d'abord chauffée à haute température, puis envoyée dans une série d'étages où elle s'évapore rapidement (flash) en raison de la baisse de pression. La vapeur produite est ensuite condensée pour obtenir de l'eau douce.

Ce procédé est robuste et adapté aux très grandes capacités, mais il nécessite une consommation thermique importante (environ 80 à 120 °C) et des matériaux résistants à la corrosion.

Il est largement utilisé dans les pays disposant de ressources énergétiques abondantes (comme les États du Golfe).

Ses avantages incluent une bonne tolérance à la salinité et une fiabilité élevée, tandis que ses inconvénients concernent surtout le coût énergétique élevé et la complexité de la maintenance.

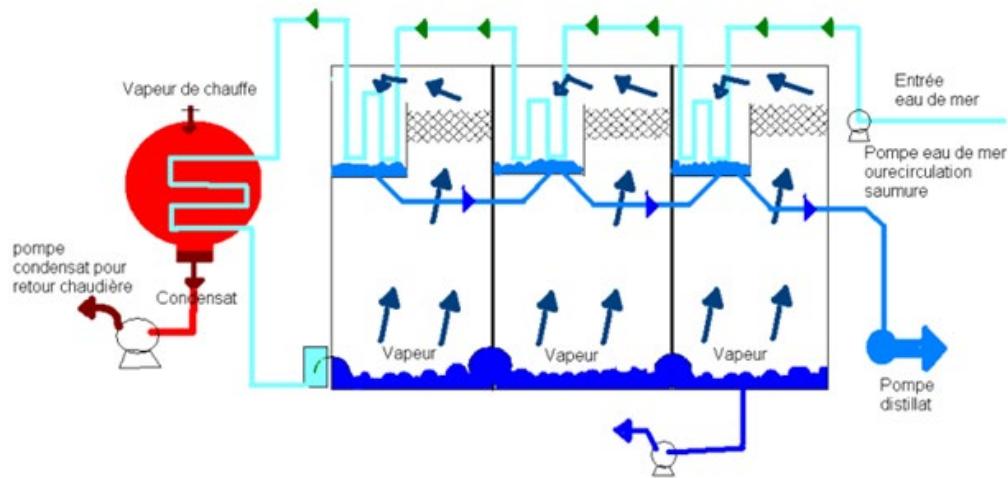


**Figure 5:** un processus typique de MSF [3].

MSF n'a pas eu une grande efficacité mais une énorme capacité, [4]. Il est considéré comme une énergie intensive, [5].

Même si ce n'est pas la technologie de dessalement performante, MSF est le plus populaire.

La principale raison c'est sa grande fiabilité, sa flexibilité d'opération et influence relativement une basse de salissure causée par le sel (tartres) dans les échangeurs de chaleur,[6].

### 3.4 Compression de vapeur (VC) :

Le procédé de compression de vapeur (VC) utilise un système de compression (mécanique ou thermique) pour réutiliser la vapeur produite comme source de chaleur, ce qui permet un fonctionnement en boucle fermée et une consommation thermique réduite.

Il existe deux variantes principales :

MVC : Mechanical Vapor Compression (Compression mécanique de vapeur).

TVC : Thermal Vapor Compression (Compression thermique de vapeur).

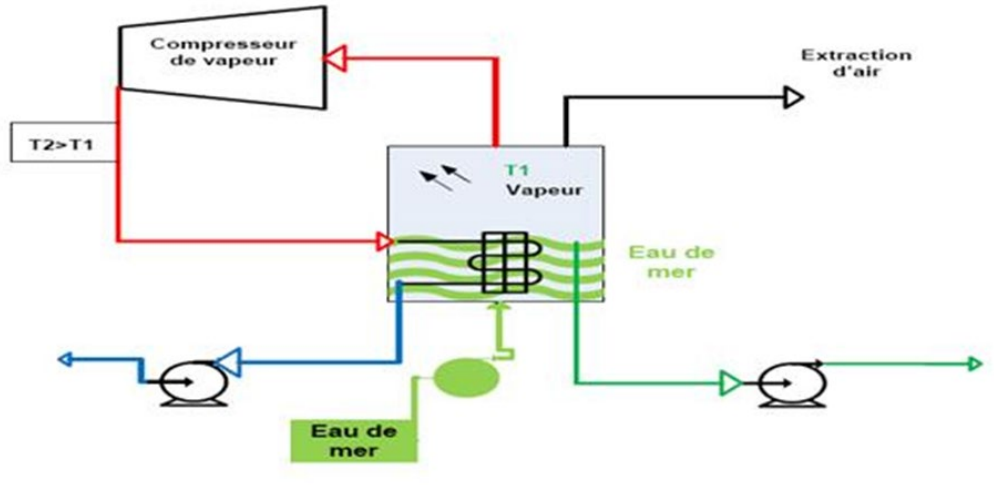


**Figure 6:** Principe de distillation à compression de vapeur, [7].

Le procédé VC est surtout adapté aux unités de petite à moyenne capacité (hôtels, navires, sites isolés), et fonctionne à basse température (50–70 °C).

Il est compact, économe en eau de refroidissement et automatisable, mais sa capacité reste limitée, et il dépend d'une alimentation électrique stable.

### 3.5 Les Avantages et les Inconvénients de procédés de distillation :

Les Avantages sont :

- Grande tolérance à la qualité variable de l'eau brute (salinité et impuretés).
- Pas de membranes à remplacer (moins de risques de colmatage).
- Production d'une eau de très haute pureté (souvent trop pure, nécessitant déminéralisation).
- Fiabilité et maturité technologique (surtout MSF).
- Possibilité d'intégration avec des sources thermiques existantes (cogénération, chaleur perdue, solaire).

Et les Inconvénients :

- Forte consommation d'énergie thermique, surtout pour MSF.
- Coût d'investissement initial élevé (matériaux anticorrosion coûteux).
- Problèmes de corrosion et entartrage nécessitant un entretien fréquent.
- Installations encombrantes (surface importante).
- Peu rentables pour de petites capacités, contrairement à l'osmose inverse ou la compression de vapeur.

#### 4 Procédés à membranes :

Plutôt que d'extraire l'eau douce de l'eau de mer par évaporation, il est possible d'opter pour une séparation entre l'eau et les sels dissous à l'aide de membranes semi-perméables. Ces procédés présentent plusieurs avantages : ils fonctionnent généralement à température ambiante et ne nécessitent pas de changement de phase, ce qui les rend théoriquement plus simples et plus économes en énergie.

Actuellement, deux technologies à membranes sont commercialisées : l'électrodialyse et l'osmose inverse. Ces procédés ont d'abord été appliqués principalement au dessalement des eaux saumâtres, dont la salinité est inférieure à celle de l'eau de mer, généralement comprise entre 1 et 10 g/l. Ce type d'eau est très répandu dans certaines régions du monde, notamment en Afrique du Nord, au Moyen-Orient, et dans certaines zones des États-Unis.

##### 4.1 L'électrodialyse :

L'électrodialyse est un procédé électrochimique de dessalement qui permet de séparer les ions dissous dans l'eau à l'aide d'un champ électrique et de membranes spécifiques. Ce procédé est particulièrement adapté au traitement des eaux saumâtres, dont la salinité est modérée.

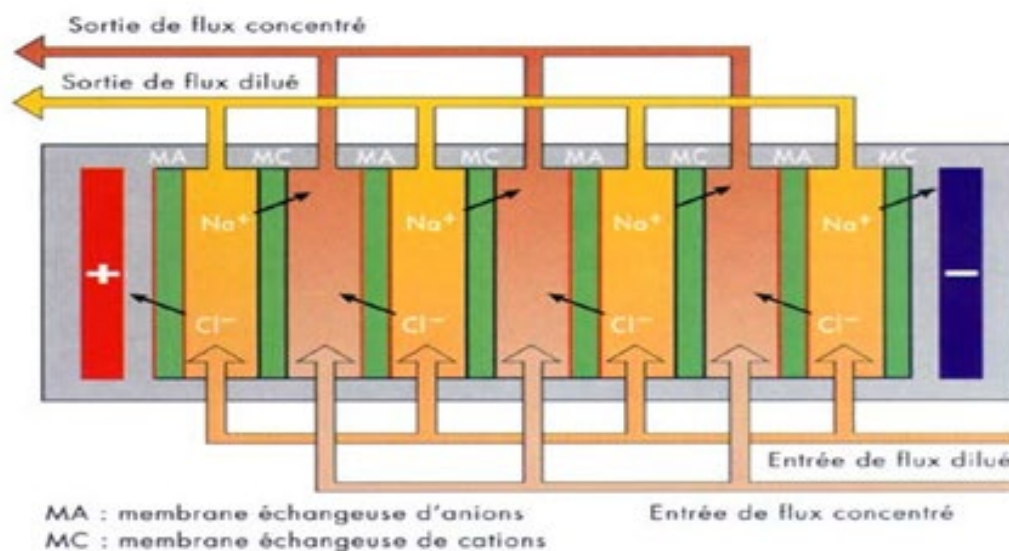


**Figure 7:** principe de l'électrodialyse

Le principe de son fonctionnement est le suivant :

Le système est composé de deux électrodes (anode et cathode) entre lesquelles sont disposées alternativement des membranes cationiques (perméables aux cations) et anioniques (perméables aux anions). Sous l'effet du champ électrique, les ions dissous migrent vers les électrodes opposées à leur charge :

- Les cations ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ...) traversent les membranes cationiques vers la cathode,
- Les anions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ...) traversent les membranes anioniques vers l'anode.

Cela forme des compartiments d'eau dessalée (où les ions sont extraits) et des compartiments de concentrât (où les ions s'accumulent).

Et leurs Caractéristiques techniques sont :

- Fonctionne à basse pression et à température ambiante.
- Plus efficace pour des salinités faibles à modérées (inférieures à 5–6 g/L). Peut fonctionner en continu avec un bon système de régulation.

#### **4.1.1 Les Avantages et les Inconvénients de L'électrodialyse :**

Les Avantages de L'électrodialyse sont :

- Faible consommation énergétique pour les eaux peu salées.
- Pas de changement de phase → pas de chaleur nécessaire.
- Technologie modulable et facile à automatiser.
- Longue durée de vie des membranes (jusqu'à 10 ans).

Et Les inconvénients de ces procédés :

- Moins efficace pour l'eau de mer (salinité trop élevée).
- Nécessite un bon prétraitement pour éviter les dépôts et encrassements.
- Limité par la conductivité électrique de l'eau à traiter.

#### **4.2 L'osmose inverse :**

L'osmose inverse (OI) est aujourd'hui le procédé membranaire le plus utilisé pour le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. Il repose sur l'utilisation d'une membrane semi-perméable qui permet de séparer l'eau des sels dissous sous l'effet d'une pression supérieure à la pression osmotique naturelle.

Le principe de son fonctionnement est le suivant :

Dans un système d'osmose inverse, l'eau salée est pressurisée et envoyée contre une membrane. Cette pression force les molécules d'eau à traverser la membrane, tandis que la majorité des sels, des micro-organismes et des impuretés sont retenus et évacués sous forme de concentrât (saumure).

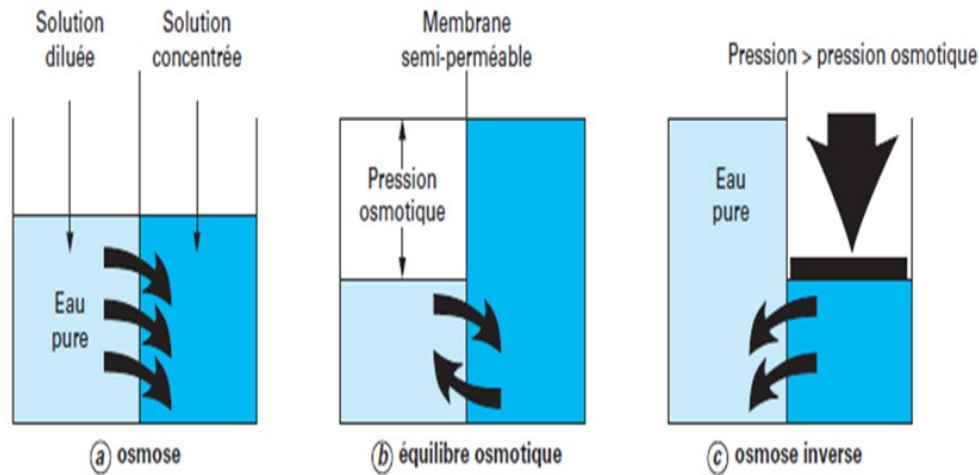


**Figure 8:** Principe de l'osmose et de l'osmose inverse

Les Caractéristiques techniques du procédé sont :

Pression de fonctionnement : généralement entre 55 et 70 bars pour l'eau de mer, et 10 à 20 bars pour les eaux saumâtres.

Taux de récupération : 35 à 50 % pour l'eau de mer ; jusqu'à 75 % pour les eaux saumâtres.

Qualité de l'eau produite : très bonne, souvent nécessitant une reminéralisation.

#### 4.2.1 Les Avantages et les Inconvénients de L'osmose inverse :

Les Avantages de L'osmose inverse sont :

- Faible consommation thermique (fonctionne à température ambiante).
- Installation compacte et modulable.
- Coût d'investissement inférieur à celui des procédés thermiques.
- Maintenance relativement simple (hors nettoyage des membranes).

Et Les inconvénients de ces procédés :

- Sensibilité au colmatage et à l'encrassement biologique.
- Nécessite un prétraitement rigoureux de l'eau brute (filtration, antiscalants)
- Durée de vie limitée des membranes (généralement 3 à 7 ans).
- Gestion des rejets (saumure concentrée) pouvant poser des problèmes environnementaux.

**Tableau 10:** Dessalement de l'eau de mer: bilan des dernières avancées technologique ; bilan économique; analyse critique en fonction des contextes [20] [21][22].

| Indicateur                                           | MSF                                                     | MED                                                     | MED-TVC /<br>MED-MVC                                 | MVC                                        | OI                                                                              |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| Température de fonctionnement (°C)                   | ~90–120 °C                                              | ~50–90 °C                                               | Similaire à MED (couplée vapeur)                     | N/a (compression de vapeur)                | N/a (pas de chauffe thermique)                                                  |
| Source principale d'énergie                          | Thermique (chaleur basse Pression)                      | Thermique                                               | Thermique (+ vapeur recyclée via TVC/MVC)            | Mécanique (électricité pour compresseur)   | Électrique (pompage haute pression)                                             |
| Consommation thermique                               | ~190–282 MJ/m <sup>3</sup> (~52–78 kWh/m <sup>3</sup> ) | ~145–230 MJ/m <sup>3</sup> (~40–64 kWh/m <sup>3</sup> ) | Plus efficace, mais données spécifiques rares        | n/a                                        | Nulle (pas de chauffage)                                                        |
| Consommation électrique                              | ~2.5–5 Kwh/m <sup>3</sup>                               | ~2–2.5 kWh/m <sup>3</sup>                               | Similaire à MED, légèrement en plus dû au TVC/MVC    | ~7–12 kWh/m <sup>3</sup>                   | ~2.3 –5.5 kWh/m <sup>3</sup>                                                    |
| Énergie équivalente électrique (thermique convertie) | ~15.8–23.5 kWh/m <sup>3</sup>                           | ~12.2–19.1 kWh/m <sup>3</sup>                           | Non précisé, mais similaire à MED avec gains mineurs | —                                          | —                                                                               |
| Total énergie équivalente                            | ~18.3–28.5 kWh/m <sup>3</sup>                           | ~14.2–21.6 kWh/m <sup>3</sup>                           | Légèrement Inférieur à MED (gain + vapeur)           | ~7–12 kWh/m <sup>3</sup> (tout électrique) | ~3–5.5 kWh/m <sup>3</sup> ; Jusqu'à 2.3 kWh/m <sup>3</sup> avec optimisation    |
| eau brute                                            | Sans restriction Notable                                | Sans restriction Notable                                | Idem                                                 | Idem                                       | Jusqu'à ~35 000 ppm (eau de mer)                                                |
| Eau produite (ppm)                                   | <10 ppm                                                 | <10 ppm                                                 | <10 ppm                                              | <10 ppm                                    | Typiquement 200–500 ppm selon filtrage                                          |
| Capacité typique (m <sup>3</sup> /j)                 | 50 000–70 000 m <sup>3</sup> /j                         | 5 000–15 000 m <sup>3</sup> /j                          | (~70–80 000 m <sup>3</sup> /j)                       | 100–2 500 m <sup>3</sup> /j                | Très variables ; les grandes usines RO peuvent dépasser 60000 m <sup>3</sup> /j |

Le tableau compare les principales technologies de dessalement d'eau de mer. On peut les classer en deux grandes catégories : les procédés thermiques et les procédés mécaniques.

Les procédés thermiques (MSF, MED et MED-TVC) utilisent la chaleur pour évaporer l'eau. Le MSF (distillation à multiples étages) et le MED (distillation à multiples effets) sont adaptés aux très grandes capacités et peuvent traiter des eaux très salées. Le MED est particulièrement remarquable par sa faible consommation d'énergie thermique. Le MED-TVC est une variante qui consomme plus de chaleur.

Les procédés mécaniques (MVC et OI) utilisent de l'électricité. L'Osmose Inverse (OI) se distingue comme la technologie la plus efficace sur le plan énergétique, avec une consommation électrique plus faible que les autres procédés. Elle est très polyvalente et s'adapte à de nombreuses échelles de production. L'OI est aujourd'hui la technologie la plus utilisée dans le monde pour le dessalement de l'eau.

## **5 Impact du Dessalement par Osmose Inverse sur l'Environnement**

L'installation d'une unité de dessalement entraîne des impacts environnementaux à la fois lors de la construction et durant l'exploitation. Ces effets concernent la modification de l'usage des sols, les nuisances visuelles et sonores, ainsi que les rejets atmosphériques et aquatiques susceptibles d'affecter les écosystèmes côtiers et marins. La biodiversité, en particulier les habitats sensibles comme les prairies sous-marines, peut être perturbée par ces activités.

Sur le plan opérationnel, toutes les technologies de dessalement génèrent un rejet de saumure dont la salinité est nettement supérieure à celle de l'eau de mer, et qui contient en plus des produits chimiques utilisés pour le prétraitement et la désinfection. Ces substances, bien qu'indispensables au maintien des performances et à la prévention de l'entartrage ou de la prolifération microbienne, renforcent l'impact potentiel de ces effluents sur le milieu récepteur.

## **6 Conséquences Potentielles des Déversements de Saumures sur l'Écosystème Marin**

La principale menace du dessalement provient de la charge saline. En Méditerranée occidentale notamment, la salinité naturelle de l'eau marine varie entre 37 et 38 g/l, tandis que la concentration du résidu osmotique peut s'élever jusqu'à 70 g/l.

Des recherches menées en Espagne, tant en conditions contrôlées qu'in situ, ont démontrées la sensibilité particulière de la phanérogame marine "Posidonia oceanica" aux fluctuations de salinité de son environnement naturel. Des altérations significatives de la structure végétale ont été constatées dès 38,4 g/l de salinité, et des impacts sur la vitalité dès 39,1 g/l. L'élévation importante de la teneur saline du concentré rejeté par osmose inverse présente donc un risque majeur pour les herbiers de Posidonie, reconnus comme habitat prioritaire par la réglementation européenne relative à la préservation des habitats faunistiques et floristiques. [10]

Ces formations végétales aquatiques, extrêmement vulnérables aux variations salines, constituent un écosystème fondamental méditerranéen et assurent une protection littorale contre l'érosion marine. Ces prairies abritent une diversité remarquable d'espèces animales (mollusques, poissons, crustacés, etc.).

## **7 Sources et Typologie des Émissions et Rejets :**

### **7.1 La Saumure Concentrée :**

Une concentration saline élevée dans les eaux de rejet et les variations du niveau de salinité peuvent provoquer, au voisinage du point de déversement, une mortalité parmi les organismes sensibles. Par ailleurs, les effluents des installations de dessalement présentent une densité supérieure à celle de l'eau marine et risquent de se déposer sur les fonds marins avec des effets potentiellement néfastes pour les communautés benthiques.

Les modifications de salinité et/ou de température résultant du rejet de saumure affectent également les comportements migratoires des poissons le long du littoral. Lorsque certaines espèces détectent ces variations, elles peuvent éviter la zone d'influence du panache et s'éloigner vers le large. Cette situation contraint les poissons à parcourir des distances plus importantes et à quitter les zones les plus riches en ressources alimentaires. [11]

### **7.2 Les Déversements Chimiques**

L'ensemble des unités de dessalement emploie des produits chimiques pour le prétraitement de l'eau d'alimentation et le post-traitement de l'eau produite. La majorité de ces substances sont utilisées comme agents biocides, anticalcaires, antisalissures, modifiant ainsi la composition de la saumure concentrée. La présence de certains métaux, issus de la corrosion des circuits, influence également la composition de cette saumure concentrée. [12]

Ces composés chimiques diffèrent selon les principales technologies de dessalement, notamment MSF et osmose inverse. Le tableau suivant présente les étapes de traitement du procédé d'osmose inverse pour la production d'eau potable :

**Tableau 11:** Synthèse des étapes de production d'eau potable par OI et devenir des produits utilisés [13]

| Étapes                                       | Objectif                                                                                             | Substances Chimiques Ajoutées                         | Devenir des Produits                                                                                    |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Régulation du pH</b>                      | Réduction de la concentration carbonatée<br>Protection membranaire contre l'hydrolyse                | Acide ( $H_2SO_4$ )                                   | Modification du pH de l'eau brute et de la saumure ;<br><br>Le sulfate reste dans la saumure concentrée |
| <b>Anticalcaire</b>                          | Prévention de la formation calcaire sur les membranes                                                | Agents chélateurs et dispersants                      | Les complexes formés sont retenus dans la saumure concentrée                                            |
| <b>Coagulation-Floculation</b>               | Prévention des salissures et de l'encrassement membranaire                                           | Coagulants-Floculants                                 | Les agents floculants formés se séparent par décantation et sont éliminés par filtration                |
| <b>Désinfection</b>                          | Prévention de l'encrassement biologique<br>Élimination des microorganismes consommateurs de Membrane | Chlore (ou biocide, UV)                               | Chlore réparti dans le perméat et la saumure concentrée                                                 |
| <b>Décoloration</b>                          | Protection des membranes sensibles au chlore                                                         | Bisulfite de sodium ou charbon actif granulaire (CAG) | Réaction avec le chlore pour former sulfate et chlorure retenus dans la saumure                         |
| <b>Oxygénation</b>                           | Augmentation de l'oxygène dissous favorisant le développement de la flore et faune aquatique         | Aération                                              | Augmentation de l'oxygénation dans la saumure concentrée                                                |
| <b>Élimination d'autres formes chimiques</b> | Réduction de tous les polluants susceptibles d'être présents dans l'eau brute                        | Variable selon les formes chimiques                   | Les complexes formés sont retenus dans la saumure concentrée                                            |

Les substances chimiques rejetées dans le milieu marin se classent dans les catégories suivantes :

- Produits de corrosion : Ces produits sont moins significatifs dans le procédé OI car celui-ci fonctionne à température ambiante et les éléments métalliques sont principalement en acier inoxydable.
- Agents anticalcaires : Les dépôts calcaires se développent sur les surfaces des équipements de dessalement industriel. Leur présence entraîne inévitablement des complications opérationnelles et/ou une diminution du rendement. Dans les installations OI, l'acide sulfurique est employé avec des adjuvants polymères pour empêcher la formation calcaire.
- Agents antisalissures : Les salissures constituent un processus complexe impliquant de nombreux groupes d'organismes. Elles débutent par l'adsorption de substances polymères de l'eau non traitée sur les surfaces solides, permettant la formation d'un film précurseur pour la colonisation bactérienne. À ce premier biofilm s'attachent périphytes, microalgues, protozoaires et champignons, puis débris, détritus et particules inorganiques. Traditionnellement, les composés chlorés sont utilisés pour désinfecter les systèmes d'approvisionnement en eau marine et les installations en amont, afin de prévenir les salissures.
- Agents antimousses : La formation mousseuse dépend des constituants organiques de l'eau marine, principalement des produits d'excrétion et de dégradation d'algues planctoniques. Dans le cas de l'OI, l'ajout d'agents antimousses s'avère donc nécessaire.

### 7.3 Rejet des Eaux de Nettoyage à Contre-courant des Membranes

Dans les installations OI, le nettoyage et le stockage des membranes peuvent générer des eaux potentiellement dangereuses. Les membranes nécessitent un nettoyage tous les trois à six mois selon la qualité de l'eau d'alimentation et le fonctionnement de l'installation. Les formulations de nettoyage membranaire sont généralement des solutions aqueuses alcalines ou acides. De plus, une solution chimique de conservation (habituellement à base de bisulfite de sodium) doit être utilisée lors du stockage des membranes pendant l'arrêt de l'installation.

Un exemple de composition chimique de la saumure comparée à l'eau de mer dans une installation de dessalement des îles Canaries est présenté dans le tableau suivant :

**Tableau 12:** Composition chimique de la saumure comparée à l'eau de mer [11]

| Analyse                       | Eau d'alimentation<br>(mg/l) | Saumure<br>(mg/l) | Rapport<br>(saumure/eau<br>d'alimentation) |
|-------------------------------|------------------------------|-------------------|--------------------------------------------|
| Ca <sup>2+</sup>              | 962                          | 1583              | 1,64                                       |
| Mg <sup>2+</sup>              | 1,021                        | 1,09              | 1,87                                       |
| Na <sup>+</sup>               | 11,781                       | 19,346            | 1,64                                       |
| K <sup>+</sup>                | 514                          | 830               | 1,61                                       |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 0,004                        | 0,005             | 1,25                                       |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | 195                          | 256               | 1,31                                       |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | 3,162                        | 5,548             | 1,75                                       |
| Cl <sup>-</sup>               | 21,312                       | 43,362            | 2,03                                       |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | 2,6                          | 4                 | 1,54                                       |
| PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>  | 0,08                         | 0,4               | 5                                          |
| Salinité totale<br>(TSD)      | 38,951                       | 63,840            | 1,64                                       |
| Conductivité                  | 46200 µs/cm                  | 75300 µs/cm       | -                                          |
| pH                            | 7,85                         | 6,92              | -                                          |

Le tableau met en évidence que la saumure issue du dessalement est plus concentrée en sels minéraux que l'eau d'alimentation. On observe une augmentation notable de la salinité, de la conductivité et des principaux ions dissous. Ce phénomène traduit l'effet de concentration inhérent au procédé d'osmose inverse.

De manière générale, la saumure constitue donc un rejet fortement minéralisé, dont l'évacuation dans le milieu naturel doit être soigneusement contrôlée afin de limiter son impact environnemental, notamment sur les écosystèmes marins. [11]

## 7.4 Les Émissions Atmosphériques

Toute installation de dessalement nécessite généralement une unité de production énergétique associée. Cette dernière génère naturellement d'importantes quantités de gaz à effet de serre, ayant un impact négatif sur le climat et le cycle hydrique. Certains experts s'inquiètent que la prolifération des usines de dessalement n'entraîne une relance massive de la construction de centrales nucléaires : chaque unité de dessalement serait accompagnée de sa propre unité nucléaire dédiée.

Étant donné que les émissions atmosphériques d'un procédé de dessalement sont directement proportionnelles à ses besoins énergétiques, il est évident que les émissions de l'OI sont inférieures à celles de la MSF. L'étude d'Afgan (1999) portant sur les installations de

dessalement des pays du Golfe a permis de calculer des indicateurs de durabilité confirmant cette observation, comme le montre le tableau suivant :

**Tableau 13:** Indicateurs de durabilité pour les installations d'OI et de MSF avec source locale d'énergie électrique [11]

| Indicateurs                                                                           | MSF  | OI    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------|-------|
| Indicateur de ressources combustibles (kg combustible/m <sup>3</sup> )                | 11   | 1,8   |
| Indicateur environnemental pour CO <sub>2</sub> (kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ) | 37   | 7     |
| Indicateur environnemental pour SO <sub>2</sub> (kg SO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> ) | 0,09 | 0,005 |
| Indicateur environnemental pour NO <sub>x</sub> (kg NO <sub>x</sub> /m <sup>3</sup> ) | 0,06 | 0,009 |

Ce tableau révèle la supériorité environnementale de l'osmose inverse (OI) par rapport à la distillation multi-étage (MSF). L'OI consomme 6 fois moins d'énergie, génère 5 fois moins d'émissions de CO<sub>2</sub> et produit significativement moins de pollution atmosphérique (SO<sub>2</sub> et NO<sub>x</sub>). Ces différences majeures d'impact environnemental expliquent pourquoi l'osmose inverse devient la technologie de référence pour le dessalement durable. [11]

## 8 Nuisances Sonores

Les installations d'osmose inverse utilisent des pompes hautes pression, des turbines et des récupérateurs d'énergie générant des nuisances sonores contribuant à la pollution acoustique. Ces équipements devraient donc être implantés à distance des zones habitées, sauf si des mesures d'atténuation sont mises en œuvre pour réduire leur niveau sonore.

## 9 Les Défis Techniques

Concernant les procédés de filtration membranaire, la perméabilité de celle-ci ainsi que la susceptibilité au colmatage et à la dégradation doivent être évaluées. Le colmatage membranaire peut résulter de l'obstruction des pores internes, de phénomènes d'adsorption, ou encore de dépôts de matières.

La dégradation membranaire peut survenir si les conditions opérationnelles exposent les membranes à des pH ou des substances chimiques inadéquates. Ainsi, la qualité de l'eau marine peut influencer la durée de vie membranaire.

## 10 L'Aspect Économique

La quantité d'énergie requise demeure considérable car il faut appliquer à l'eau salée une pression suffisante pour la faire traverser la membrane semi-perméable, associant ainsi les coûts de production à l'énergie nécessaire au fonctionnement. Des dépenses supplémentaires sont liées aux systèmes de

Prétraitement incluant filtration, désinfection, etc. Des coûts importants sont également associés à l'acquisition des membranes ayant une durée de vie limitée, bien que moindres que les dépenses précédentes, ils demeurent récurrents et peuvent fluctuer selon le marché ou la technologie sélectionnée. [14]

**Tableau 14:** Évaluation des impacts associés à l'osmose inverse [14]

| Aspect               | Critère                                | Description                                                                                             | Évaluation de l'impact |
|----------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| <b>Économique</b>    | Coûts initiaux                         | Inférieurs comparativement à d'autres procédés comme la distillation                                    | +                      |
|                      | Coûts de maintenance et d'exploitation | Nécessite un prétraitement                                                                              | -                      |
| <b>Technique</b>     | Consommation Énergétique               | Inférieure à la distillation                                                                            | +                      |
|                      | Capacité de traitement                 | Le procédé consomme moins d'eau marine que la distillation pour produire la même quantité d'eau potable | +                      |
|                      | Membrane : Colmatage ; Dégradation     | Susceptible au colmatage et à la dégradation                                                            | -                      |
|                      | Écosystème marin                       | Les produits chimiques utilisés lors du prétraitement peuvent contaminer le rejet                       | -                      |
| <b>Environnement</b> | Bruit                                  | Utilisation de turbines et de pompes haute pression bruyantes                                           | -                      |
|                      | Source d'énergie                       | Consommation moindre                                                                                    | +                      |
|                      | Gestion des résidus                    | Les membranes ont une durée de vie courte et constituent des déchets                                    | -                      |
|                      | Réponse au besoin                      | Possibilité d'installations à grande capacité                                                           | +                      |
|                      | Main d'œuvre                           | Procédé répandu et bien connu                                                                           | +                      |
| <b>Sociaux</b>       | Acceptation                            | Procédé le plus populaire                                                                               | +                      |
|                      | Santé humaine                          | Eau produite convient bien aux usages domestiques                                                       | +                      |

L'osmose inverse présente plusieurs avantages, notamment des coûts initiaux réduits, une consommation énergétique inférieure et une bonne capacité de traitement, ce qui en fait une technologie largement acceptée et adaptée aux besoins domestiques.

Cependant, elle comporte aussi des limites comme le colmatage et la dégradation des membranes, la gestion complexe des résidus, ainsi que des impacts environnementaux liés aux produits chimiques et au bruit des équipements. Globalement, il s'agit d'un procédé performant mais qui nécessite une gestion rigoureuse de ses contraintes techniques et environnementales. [14]

## 11 Effets dus au Prélèvement d'Eau Marine :

Les installations de dessalement d'eau marine disposent de systèmes d'admission offshore leur permettant de prélever d'importants volumes d'eau à proximité de certains habitats marins. Ce processus présente des impacts potentiels pour la biodiversité de la zone concernée.

Par exemple, des tambours filtrants sont souvent installés entre le dispositif d'apport et les pompes d'alimentation afin d'empêcher débris flottants, organismes marins volumineux et autres matières de pénétrer dans le circuit de prétraitement.

Cependant, le prélèvement représente deux sources potentielles d'impact :

L'impact du poisson et d'autres organismes marins sur les tambours entraînant des dommages physiques comme l'écaillage et des troubles tels que la désorientation. Ce phénomène provoque une augmentation de la mortalité par maladie et une vulnérabilité accrue à la prédation.

L'introduction de biotes dans le circuit d'eau d'alimentation, constituant une menace importante pour le phytoplancton et le zooplancton.

Les principaux impacts associés au passage dans les circuits de prétraitement et de dessalement sont liés à des activités telles que la chloration, les lésions de cisaillement et les changements rapides de pression dans le circuit. La conséquence générale de l'entraînement d'organismes dans le circuit est une réduction du recrutement pour les habitats existants et une diminution de la productivité de l'écosystème. [11]

## 12 Conclusion :

En définitive, le dessalement de l'eau constitue une solution technologique incontournable pour répondre aux besoins croissants en eau douce. Les différents procédés étudiés - qu'ils soient thermiques (MSF, MED, VC) ou membranaires (osmose inverse, électrodialyse) - offrent une gamme complète d'options adaptées à diverses situations.

Les procédés thermiques, bien qu'énergivores, demeurent fiables pour les grandes capacités, tandis que les technologies membranaires se distinguent par leur efficacité énergétique et leur adaptabilité. Le choix du procédé optimal dépend essentiellement des conditions locales, qualité de l'eau, ressources énergétiques disponibles, capacité requise et contraintes économiques.

L'osmose inverse s'impose aujourd'hui comme la technologie dominante grâce à son excellent compromis entre performance énergétique, coût d'investissement et flexibilité d'installation. Cette évolution technologique s'inscrit dans une démarche de développement durable visant à optimiser l'utilisation des ressources énergétiques tout en garantissant l'accès à l'eau potable.

# Chapitre III :

## Description de la station de dessalement el MARSA

## **1 Introduction :**

Le dessalement par osmose inverse (procédé utilisé à la station d'el MARSA), s'impose aujourd'hui comme une solution incontournable pour répondre à la demande croissante en eau potable dans les régions côtières.

Le processus de dessalement ne se limite pas à l'osmose inverse elle-même, mais comprend une série des étapes complémentaires telles que la prise d'eau, le prétraitement, le conditionnement chimique, le pompage et enfin la production d'eau douce. Chacune de ces étapes joue un rôle essentiel et conditionne la performance de la suivante. Une conception et une exploitation rigoureuses de l'ensemble garantissent non seulement la qualité du perméat produit, mais aussi la durabilité et la fiabilité de l'installation.

Dans ce chapitre, nous présenterons donc les différentes étapes clés d'un système de dessalement par osmose inverse, en mettant en évidence leur importance et leur contribution à l'efficacité globale du procédé.

## **2 Situation géographique de la station :**

La station de dessalement d'eau de mer d'El Marsa est située en Algérie, dans la wilaya d'Alger, plus précisément dans la commune côtière d'El Marsa, à environ 25 km à l'est du centre-ville d'Alger Comme présenté dans la (figure 9). Elle est implantée dans la zone littorale appelée R'mila, en bordure directe de la mer Méditerranée, non loin de la route nationale RN24.

Cette localisation stratégique permet un accès direct à l'eau de mer pour le prélèvement et le rejet, tout en étant proche des réseaux de distribution d'eau potable. La station est implantée dans un environnement semi-industriel et des zones agricoles, à proximité de zones résidentielles, de la forêt protégée d'El Marsa et du site archéologique antique de Tamentfoust (Rusguniae). Elle est reliée à plusieurs communes de l'est d'Alger, notamment Bordj El Bahri, Aïn Taya, Heraoua, Rouiba et Réghaïa, via des conduites de transfert. Cette situation géographique offre un équilibre entre accessibilité, efficacité logistique et proximité des zones à alimenter en eau potable. (Voir planche N<sup>0</sup>01 et figure 10)



**Figure 9:** Localisation géographique de la station de dessalement d'El Marsa (Alger)

La figure ci-dessus illustre la localisation géographique de la station de dessalement d'El Marsa, située à l'est d'Alger, entre les communes de Bordj El Bahri et Ain Taya. Cette implantation stratégique sur le littoral permet un accès direct à la ressource en eau de mer, facilitant ainsi l'alimentation en eau potable d'une large partie de la capitale et de ses environs.



**Figure 10:** la station de dessalement El Marsa

La figure illustre la station de dessalement d'eau de mer d'Al Marsa. Elle met en évidence l'ensemble du processus de dessalement, depuis la prise d'eau en mer jusqu'à l'obtention d'une eau potable conforme aux normes de consommation. (Voir la planche N°04 pour les détails de chaque ouvrage.)

### **3 Processus du dessalement dans la station d'El Marsa :**

Le fonctionnement de la station de dessalement d'El Marsa repose sur une succession d'étapes techniques soigneusement organisées, visant à transformer l'eau de mer en eau douce conforme aux normes de potabilité. Chaque étape joue un rôle essentiel pour assurer la qualité, la sécurité et la durabilité du procédé. Les principales composantes de ce processus sont :

- Une prise d'eau de mer ;
- Un poste de prétraitement ;

- L'unité d'osmose inverse ;
- Un poste de traitement et de reminéralisation ;

### **3.1 Le captage**

#### **3.1.1 La tour de captage :**

La tour de captage est l'une des ouvrages hydrauliques massifs, généralement fabriqués en béton armé ou en acier, dont les dimensions typiques sont de quelques mètres de diamètre et de quelques mètres de haut. Elles sont recouvertes d'un toit qui force l'eau à entrer par grilles latérales dont les mailles sont suffisamment fines ( $< 20 \times 20 \text{ cm}$ ) pour éviter l'entrée dans le circuit des corps solides susceptibles de rester coincés dans les conduites, et suffisamment grosses ( $> 10 \times 10 \text{ cm}$ ) pour limiter les risques d'obturation par les algues et coquillages, la vitesse d'absorption d'eau est comprise entre 0.1 m/s et 0.2 m/s.



**Figure 11:** La tour de captage

La figure précédente présente la prise d'eau de mer, élément essentiel du système d'amenée, assurant le captage initial de l'eau brute.

#### **3.1.2 La conduite d'amenée:**

La conduite d'amenée constitue l'ouvrage hydraulique reliant directement la prise d'eau de mer à l'unité de prétraitement. Dans le cas de la station d'El Marsa, elle est réalisée en polyéthylène haute densité (PEHD), un matériau reconnu pour sa résistance mécanique, sa durabilité face à la corrosion saline et sa souplesse d'installation sous-marine. [9]

Ses Caractéristiques techniques [9] :

- Longueur totale : 260 m
- Diamètre nominal : 1 200 mm
- Capacité de transport : environ 133 333 m<sup>3</sup>/j
- Vitesse d'écoulement : comprise entre 1 et 2 m/s

### 3.1.3 Le pré chloration

Le pré chloration consiste à injecter une solution d'hypochlorite de sodium ( $\text{NaOCl}$ ) dans la conduite de captage grâce à une pompe doseuse. Cette opération vise à limiter la croissance biologique, réduire la formation de biofilm et prévenir l'obstruction des conduites, assurant ainsi la protection des installations de dessalement. [9]

### 3.1.4 L'acidification

Pour limiter la bio-croissance dans la conduite d'eau de mer, un traitement chimique est appliqué par injection d'acide sulfurique ( $\approx 140 \text{ mg/l}$ ) pour dissoudre les dépôts calcaires, suivi d'hypochlorite de sodium ( $4\text{--}6 \text{ mg/l}$ ) pour la désinfection. La fréquence dépend de la saison et de la qualité de l'eau. Des bacs et pompes dédiés assurent le dosage. [9]

### 3.1.5 Le dégrilleur :

Le dégrilleur est le premier filtre par lequel passe l'eau après capter de mer. Son rôle est d'éliminer les particules grossières présentes dans l'eau. Il est conçu avec des barres inclinées espacées pour retenir ces impuretés. Il est généralement constitué de barres métalliques inclinées et espacées de manière à permettre le passage de l'eau tout en bloquant l'élément de grande taille.

Les barres parallèles sont inclinées vers le bas à un angle de  $80^\circ$ . Chaque cadre de dégrilleur est intégré dans les parois en béton du canal correspondant. Les dimensions des canaux au niveau de chaque dégrilleur grossier sont de 1,60 m de large et 6,65 m de profondeur. L'espacement entre les barres est de 40 mm. Tous les composants des dégrilleurs en contact avec le fluide sont fabriqués en acier inoxydable super duplex[9]. Ce procédé est représenté dans la figure 12 :



*Figure 12:* Dégrilleur

Et Les caractéristiques opérationnelles et de contrôle de dégrillage sont numérisés dans le tableau 15 :

**Tableau 15:** Les Caractéristiques du dégrilleur

|                                     |                                                                     |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Nombre de dégrilleurs grossiers     | 2                                                                   |
| Mode d'opération de nettoyage       | Manuel                                                              |
| Indication de l'action de nettoyage | Sur base de la différence de niveau amont/aval dans les dégrilleurs |

Ce tableau présente les caractéristiques de fonctionnement des dégrilleurs grossiers installés en entrée de la station.

### 3.1.6 Le tamis rotatif [9] :

Équipement de filtration fin mécaniquement nettoyé pour empêcher les déchets flottants de taille moyenne à fine de se déplacer vers les pompes situées en aval.

Les filtres rotatifs comprennent un panneau de plaques perforées ou mailles métalliques tissées reliées à deux bouts de rouleaux assemblés des chaînes et formant une bande continue de panneaux.

Les panneaux piège les déchets en suspension avec l'eau pendant que l'eau filtrée passe à travers.

Les déchets sont ensuite retirés des panneaux par une pulvérisation d'eau située au sommet

Les dégrilleurs sont de type vertical à bande mobile. L'élément principal de chaque unité est un ensemble de panneaux filtrants fins, d'une largeur de 1,10 m. Ces panneaux tournent dans un plan perpendiculaire au sens de l'écoulement. Ils sont fixés à des chaînes à rouleaux qui se déplacent le long de rails de guidage situés de chaque côté du dégrilleur.

Le système fonctionne selon le principe de l'écoulement « de l'intérieur vers l'extérieur » : l'eau de mer traverse les panneaux à mailles rotatifs depuis les côtés parallèles aux parois du canal, puis ressort à l'arrière du dégrilleur par une ouverture. Ce procédé est représenté dans la figure 13 :



**Figure 13:** Tamis rotatif

Et Les caractéristiques opérationnelles et de contrôle de tamis rotatif sont numérisés dans le tableau 16 :

**Tableau 16:** caractéristiques du dégrilleur tamis rotatif

|                               |                          |
|-------------------------------|--------------------------|
| Nombre de dégrilleurs fin     | 2                        |
| Mode d'opération de nettoyage | Manuel et Automatique    |
| Mode d'écoulement             | Intérieur vers extérieur |
| Débit nominal                 | 2805 m <sup>3</sup> /h   |

Ce tableau présente les caractéristiques de fonctionnement des Tamis rotatif grossiers installés en entrée de la station.

### 3.1.7 Le réservoir de captage :

L'eau rejoint un bassin de stockage de forte capacité afin de parer aux éventuelles pollutions ou pointes de consommation. Ce stockage est souvent doté d'une autoépuration naturelle provenant des rayons du soleil, de la faune et de la flore présente dans le bassin.

L'eau pompée reçoit un traitement de pré désinfection au chlore ou à l'ozone permettant de diminuer le taux de bactéries.

### 3.1.8 Pompes de relevage d'eau de mer [9] :

Le système de pompage d'eau de mer est composé de quatre pompes centrifuges verticales identiques Modèle DESMI DSL (trois en service, une en veille), chacune conçue pour un débit de 1900 m<sup>3</sup>/h à une hauteur totale de 50 m, ces pompes sont équipées de tuyaux d'aspiration verticaux suffisamment immergés pour prévenir l'entrée d'air et la cavitation, Ce procédé est représenté dans la figure 14 :



**Figure 14:** Réservoir de pompage (élaboré par l'étudiante)

Le réservoir de pompage de la station EL MARSA est équipé de quatre pompes centrifuges fonctionnant en parallèle.

## 3.2 Prétraitement

### 3.2.1 Coagulation/Floculation :

Dans cette étape on ajoute un coagulant et un floculant dans un mélangeur statique permet de créer une turbulence dans la conduite pour mélanger les produits injectés. Ce procédé est représenté dans la figure 15 :



**Figure 15:** Le mélangeur statique

La coagulation et la floculation sont des étapes fondamentales du prétraitement, visant à préparer l'eau de mer pour une élimination efficace des matières en suspension. La coagulation a pour objectif de déstabiliser les liaisons ioniques des espèces présentes dans l'eau et de favoriser la formation de petits flocons initiaux de matières en suspension. Ce processus est chimiquement assisté par le chlorure ferrique ( $\text{FeCl}_3$ ) agissant comme coagulant.

La floculation suit la coagulation, son but étant d'agglomérer ces particules coagulées pour former des macro-flocons plus grands et plus faciles à éliminer lors des étapes ultérieures. La floculation est également assistée chimiquement par l'injection d'une solution de polymère cationique en tant que floculant.

Contrairement aux méthodes traditionnelles, cette station utilise des mélangeurs statiques pour la coagulation et la floculation. Cette approche, bien que relativement nouvelle, a prouvé son efficacité en assurant une homogénéisation quasi-parfaite (degré de mélange CoV de 0,05) des produits chimiques, plutôt que de se baser sur des temps de rétention longs. Deux lignes de prétraitement sont prévues, chacune traitant 50% du débit de conception (2802 m<sup>3</sup>/h), et comprenant deux mélangeurs statiques en série : le premier pour la coagulation, le second pour la floculation. [9]

Dosage des Produits Chimiques :

- Chlorure Ferrique (Coagulant) : Le  $\text{FeCl}_3$  est ajouté sous forme d'une solution aqueuse à 40%. La dose varie de 4 à 10 mg/l,

- Polymère (Floculant) : Le polymère est ajouté sous forme d'une solution aqueuse fortement diluée à 0,5% (5 g/l).

### 3.2.2 Les Décanteurs lamellaires :

La phase de prétraitement se termine avec la séparation et l'élimination des matières en suspension de l'eau de mer coagulée et floculée, processus réalisé dans trois décanteurs lamellaires. Ces décanteurs sont dimensionnés selon le principe N-1, ce qui signifie que deux décanteurs sont suffisants pour traiter le débit total de conception de 5604 m<sup>3</sup>/h, garantissant ainsi la continuité du service même si une unité est hors ligne pour maintenance ou réparation. Chaque décanteur est spécifiquement conçu pour un débit de 2802 m<sup>3</sup>/h et est capable d'éliminer les solides en suspension de l'eau de mer, même à des concentrations élevées (jusqu'à 55-60 mg/l), avec une efficacité d'au moins 95%.

L'eau de mer coagulée et floculée est distribuée depuis une conduite d'arrivée DN1000 vers chaque décanteur via des branches DN700, avec des vannes murales manuelles de 700x700 mm pour l'isolement. Chaque décanteur est une structure en béton avec une partie supérieure rectangulaire (~17,20 x 17,20 m) contenant des blocs de plaques de décantation parallèles et inclinées (lamelles). La partie inférieure est cylindrique et inclinée vers une trémie à boue centrale, optimisant la sédimentation. Les plaques de décantation sont en polypropylène renforcé de talc et sont inclinées à 55°, avec une surface spécifique de 12,9 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. L'eau circule de manière ascendante et laminaire à travers ces lamelles, assurant une sédimentation efficace des flocons. [9]

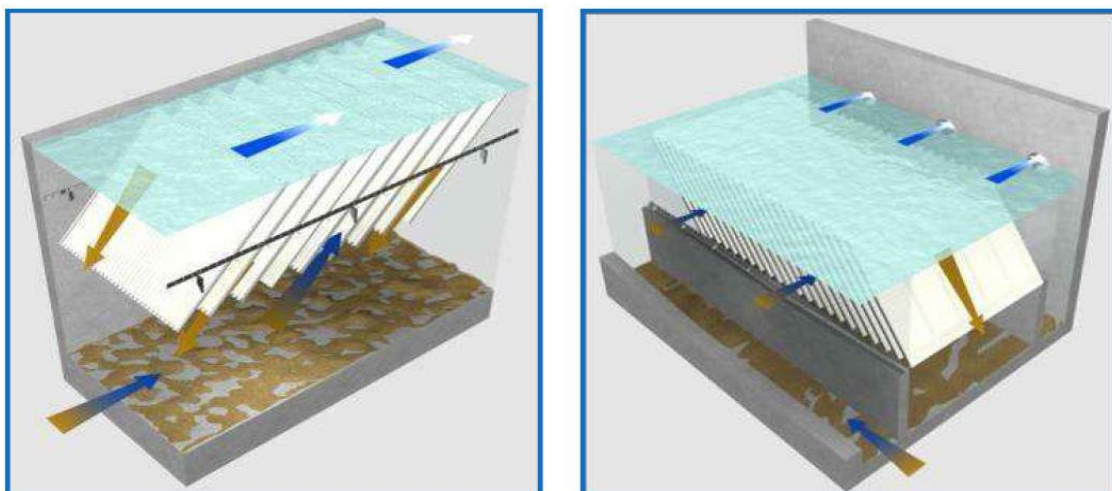


**Figure 16:** Décanteur lamellaire

Après avoir traversé les lamelles, l'eau clarifiée est collectée dans des bassins rectangulaires en plastique et acheminée vers une chambre de sortie commune, puis vers les filtres à gravier à double couche via une conduite DN1000. La concentration des solides en suspension dans l'eau clarifiée est mesurée en permanence à l'entrée des filtres gravitaires, permettant d'évaluer l'efficacité du prétraitement.

Chaque décanteur est équipé d'un racleur de boue vertical, composé d'une unité d'entraînement, d'un arbre central et de bras avec des lames. Ces lames tournent à faible vitesse (~2,5 cm/s) pour racler et déplacer continuellement les boues décantées vers la trémie centrale.

La concentration de solides secs dans la boue décantée ne dépasse pas 8 g/l (0,8%) pour des concentrations de TSS allant jusqu'à 50 mg/l. Les boues sont évacuées périodiquement. [9]

### **3.2.3 Filtre à multicouche :**

Le principal rôle des Filtres Gravitaires à Double Couche est d'éliminer les grosses matières en suspension et les particules supérieures à 30-40  $\mu\text{m}$  qui persistent dans l'eau après la clarification. Ce système se compose de cinq unités identiques, conçues selon le principe "N-1" : cela signifie que si une unité est hors service pour maintenance ou lavage à contre-courant, les quatre autres peuvent traiter la totalité du débit d'eau.

Chaque filtre est doté de deux lits de filtration parallèles, mesurant chacun 15,90 m sur 4,85 m, ce qui représente une superficie de 77,1  $\text{m}^2$  par lit et 154,2  $\text{m}^2$  par filtre. La surface totale des DMGF atteint 771  $\text{m}^2$ . Avec un débit maximal de 5556  $\text{m}^3/\text{h}$ , la vitesse de filtration varie de 7,20 m/h (lorsque les cinq filtres sont en service) à 9,01 m/h (en configuration N-1). Bien que situés à l'extérieur, les filtres sont protégés par un toit pour éviter l'exposition directe au soleil.

L'eau prétraitée accède à chaque filtre par une ouverture rectangulaire, équipée d'une vanne murale électrique de 500x500 mm. Après avoir franchi une paroi anti-refoulement, l'eau s'écoule dans un canal central longitudinal, puis se répartit latéralement dans cinq canaux de distribution situés au-dessus du milieu filtrant de chaque lit. Ces canaux mesurent 4,85 m de long, 0,70 m de large et 0,40 m de profondeur. Des plaques de débordement en plastique, installées sur les parois latérales des canaux, garantissent une distribution uniforme de l'eau sur le milieu filtrant. [9]

Le milieu filtrant est stratifié comme suit [9] :

- Couche supérieure : anthracite, avec une granulométrie de 0,8 à 1,6 mm et une épaisseur de 0,90 m.
- Couche inférieure : sable quartzeux, avec une granulométrie de 0,4 à 0,8 mm et une épaisseur de 0,40 m.
- couche de support : une couche de sable/gravier de 15 cm d'épaisseur (granulométrie 2,00-3,15 mm). Sous cette couche de support



**Figure 17:** Filtres gravitaires (Filtre multicouche)

Une fois filtrée, l'eau s'écoule dans une zone de collecte commune située sous les deux lits de filtration. Le filtrat quitte cette zone via une vanne papillon DN500, actionnée pneumatiquement et régulée, pour rejoindre un canal collecteur commun DN500. De là, l'eau de mer filtrée s'écoule par gravité dans le bac de filtrat. [9]

### **3.2.3.1 Lavage à contre-courant des filtres à sable :**

Le lavage à contre-courant des filtres à disques gravitaires à double couche est une étape essentielle pour assurer leur bon fonctionnement. Entièrement automatisé par un système PLC et supervisé par l'opérateur, il s'effectue quotidiennement en utilisant de l'air et de l'eau introduits du bas vers le haut.

Un seul filtre est lavé à la fois, en cycles de 30 minutes, avec l'eau de rinçage issue de l'osmose inverse comme agent de lavage. Le processus comprend successivement la baisse du niveau d'eau, le lavage à l'air, l'évacuation de l'air, le lavage à l'eau, puis l'évacuation du premier filtrat. Les eaux de lavage sont ensuite rejetées vers le réservoir principal des eaux usées. L'installation dispose de trois surpresseurs d'air (2 en service, 1 en réserve) et de deux pompes de lavage (1 en service, 1 en réserve), toutes équipées de variateurs de fréquence. Ils font ce processus tous les jours pour chaque filtre différent. [9]

### **3.2.4 Filtre à cartouche :**

Avant d'être dirigé vers les pompes haute pression d'osmose inverse (OI), le filtrat issu des filtres gravitaires passe à travers six filtres à cartouche disposés en parallèle. Ces unités sont conçues selon le principe N-1 : si l'un des filtres est hors service, les autres peuvent maintenir l'intégralité du débit d'alimentation sans interruption du procédé.

Chaque micro filtre comprend un boîtier en PRFV de forme cylindrique installé verticalement, équipé d'un bras de levage pour l'ouverture du couvercle, ainsi que de trois pieds d'ancrage au sol. Les raccords d'entrée et de sortie (brides DN400) sont placés sur des côtés opposés du boîtier, avec un léger décalage, assurant un flux descendant. Comme le montre dans la figure 18 :



**Figure 18:** Filtres à cartouches

Chaque boîtier peut contenir jusqu'à 340 cartouches filtrantes en polypropylène (PP) bobiné, d'une longueur standard de 40 pouces (1016 mm) et d'un seuil de filtration de 5 microns. Les entrées et sorties sont isolées par des vannes papillon DN400 manuelles. Un évent DN80 et une vanne de purge DN150 sont également intégrés à chaque boîtier.

Chaque section de 10 pouces de cartouche est conçue pour un débit maximal de 1,0 m<sup>3</sup>/h. Pour un débit total de 5556 m<sup>3</sup>/h, chaque filtre traite 926 m<sup>3</sup>/h en fonctionnement normal (avec 6 unités), soit 2,72 m<sup>3</sup>/h par cartouche (0,68 m<sup>3</sup>/h par segment de 10"). En cas de fonctionnement à 5 filtres (mode N-1), le débit par unité passe à 1111,2 m<sup>3</sup>/h et à 3,27 m<sup>3</sup>/h par cartouche (0,82 m<sup>3</sup>/h par segment de 10").

La perte de charge initiale avec des cartouches neuves est de 0,25 bar. Lorsque la pression différentielle atteint 1,2 bar, toutes les cartouches doivent être remplacées. Pour assurer une performance uniforme, leur remplacement doit se faire successivement sur l'ensemble des unités. Un système de mesure dédié permet de suivre en continu la différence de pression entre les conduites d'entrée et de sortie communes des filtres.

L'indice de colmatage (SDI) est un indicateur essentiel de la qualité de l'eau avant l'osmose inverse. L'objectif est d'obtenir un  $SDI \leq 5,5$  après prétraitement,  $\leq 4,5$  après filtration, et  $\leq 5$  à la sortie des filtres à cartouche de 5  $\mu m$ . Sa surveillance continue garantit la protection et la performance des membranes d'osmose inverse. [9]



**Figure 19:** L'appare de mesure de SDI (élaboré par l'étudiante)

Ils vérifient et règlent l'appareil de mesure du SDI après chaque les 24 heures.

### **3.2.5 La dé chloration :**

Les membranes en polyamide à couche mince sont vulnérables aux agents oxydants tels que le chlore libre. Dans la station, le dé chloration est effectué en injectant du SMBS (méta bisulfite de sodium)  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$  dans un mélangeur statique. La dose injectée de SMBS est généralement égale à trois fois la concentration de chlore libre. [9]

### **3.2.6 Pompes de filtrat :**

Les pompes de transfert du filtrat ont pour fonction d'acheminer l'eau depuis l'unité de microfiltration vers l'étape d'osmose inverse, tout en assurant une pression d'au moins 2,2 bars à l'entrée des pompes haute pression. L'installation comprend quatre pompes centrifuges verticales identiques, dont trois en fonctionnement et une en réserve.

Chaque pompe est dimensionnée pour un débit unitaire de  $1850 \text{ m}^3/\text{h}$ , avec une hauteur manométrique totale de 50 m. Les composants en contact avec le fluide sont fabriqués en alliage de bronze-aluminium marin, résistant à l'eau de mer.

Pour prévenir la cavitation, chaque pompe est équipée d'un système d'amorçage indépendant, destiné à purger l'air du tuyau d'aspiration. Cela permet de maintenir la colonne d'aspiration pleine d'eau de mer avant chaque démarrage. Ce système comprend une pompe motorisée, un réservoir d'eau de 25 litres, une crépine, un manomètre, des vannes et les tuyauteries associées. [9]

### 3.2.7 Systèmes de dosage d'antitartre et de biocide :

La protection des membranes d'osmose inverse repose sur deux systèmes de dosage : l'injection continue d'antitartre (1 à 5 mg/l) pour prévenir l'entartrage, réalisée, et l'injection périodique d'un biocide non oxydant à base de DBNPA (10–30 mg/l) deux fois par mois afin de limiter l'encrassement biologique. Ces traitements assurent la durabilité et la performance des membranes. [9]

## 3.3 ETAPE D'OSMOSE INVERSE :

### 3.3.1 Le processus d'OI et l'équipement principal :

L'étape d'osmose inverse (OI) constitue une phase essentielle du procédé de dessalement de l'eau de mer. Elle vise principalement à réduire les sels dissous dans l'eau de mer filtrée afin de produire un perméat respectant les exigences de qualité et de débit spécifiées. Les performances de cette étape influencent directement le dimensionnement des étapes de traitement en amont comme en aval. (Voir planche N°02)

Le système d'OI est dimensionné pour traiter une eau de mer contenant une concentration totale en solides dissous (TDS) d'environ 40 300 mg/l, ce qui dépasse volontairement la valeur réelle estimée à 36000–38 000 mg/l, afin d'assurer une stabilité opérationnelle à long terme.

Le système adopte une configuration à un seul passage et une seule étape, avec un taux de récupération constant du perméat de 45 %, sur toute la plage de températures de l'eau de mer (14 à 30 °C).

Les débits de conception sont les suivants :

**Tableau 17:** Débits de l'unité de dessalement par OI

| Les débits                 | (m³/j)       |
|----------------------------|--------------|
| Débit total d'alimentation | 133 333 m³/j |
| Par ligne d'OI             | 26 667       |
| Perméat total              | 60 000       |
| Perméat par ligne          | 12 000       |
| Rejet de saumure total     | 73 333,3     |
| Saumure par ligne          | 14 666,4     |

Chaque ligne du système OI comprend :

Un rack divisé en 4 segments (2 segments de 39 tubes et 2 de 38 tubes). Comme la figure 20 :



**Figure 20:** le RACK (élaboré par l'étudiante)

154 tubes de pression latéraux de classe 1200 psis, chacun contenant 7 membranes d'osmose inverse de type 8x40".

### 3.3.2 Pompes à haute pression d'osmose inverse :

Chaque ligne d'osmose inverse (OI) est équipée de sa propre pompe haute pression. Ces pompes sont de type multicellulaire à plan de joint radial, spécialement conçues pour le traitement de l'eau de mer par osmose inverse. Les composants en contact avec l'eau, ainsi que les pièces critiques, sont fabriqués en acier inoxydable super duplex, garantissant une excellente résistance à la corrosion.

Le débit de chaque pompe varie de 504,8 à 632,6 m<sup>3</sup>/h, en fonction de la température de l'eau de mer et de la pression osmotique requise. La hauteur manométrique totale se situe entre 599 et 682 mètres, [9]



**Figure 21:** Pompes à haute pression (élaboré par l'étudiante)

Pour assurer une régulation précise du débit, chaque pompe est équipée d'un variateur de fréquence (VFD) dédié. Elles fonctionnent avec un rendement hydraulique élevé, compris entre

82 % et 85 %, et nécessitent une puissance électrique allant de 1051 à 1419 kW. L'entraînement est assuré par un moteur électrique en 6 kV. (Voir planche N°03)

### 3.3.3 Échangeurs de pression (ERI) :

Les échangeurs de pression sont des dispositifs à déplacement positif qui récupèrent l'énergie du rejet de saumure à haute pression et la transmettent directement au flux d'alimentation à basse pression. Chaque échangeur, constitué d'un rotor en céramique, d'une chemise fixe et de deux embouts, assure le transfert de pression grâce à la rotation du rotor équipé de conduits internes. Les modèles PX-Q300 (45 à 68 m<sup>3</sup>/h, pression max. 82,7 bar) sont utilisés, avec 12 unités par ligne d'osmose inverse, réparties en deux groupes de 6 montés sur un skid. [9]



**Figure 22:** Échangeurs de pression (élaboré par l'étudiante)

Cette configuration permet d'optimiser l'efficacité énergétique globale du système en réduisant significativement la consommation électrique des pompes haute pression.

### 3.3.4 Unité CIP :

Le système CIP (Clean-In-Place) assure le nettoyage chimique périodique des membranes d'osmose inverse afin de maintenir leurs performances. Selon l'origine de l'encrassement (biologique, minéral ou colloïdal), des solutions acides (pH 1–2) ou caustiques (pH 12) sont utilisées. L'unité, dimensionnée pour 50 % d'une ligne (539 membranes), comprend deux cuves de 28 m<sup>3</sup> chauffées, deux pompes centrifuges (370–624 m<sup>3</sup>/h, 4,5 bar), deux filtres à cartouche (180 × 5 µm) et une instrumentation de contrôle. Le cycle CIP suit six étapes principales (préparation, rinçage initial, circulation, trempage, pompage à haut débit et rinçage final, avant neutralisation et rejet des solutions usées.) [9]

## 3.4 Reminéralisations :

Le perméat issu de l'osmose inverse, faiblement minéralisé et acide, doit être reminéralisé pour devenir potable, stable et non corrosif. Le procédé utilise du CO<sub>2</sub> et de la calcite (CaCO<sub>3</sub>) pour former des bicarbonates et augmenter l'alcalinité. Le traitement s'applique sur 60 % du perméat via des contacteurs de calcite, puis est mélangé avec 40 % de perméat en bypass. Un

ajustement final au NaOH permet d'obtenir un pH stabilisé et un LSI légèrement positif (0,02–0,1). La séquence comprend : injection de CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, passage dans la calcite, mélange avec bypass, puis correction finale au NaOH. [9]

#### **4 Conclusion :**

En conclusion, cette analyse détaillée de la station de dessalement d'El Marsa nous a donné une compréhension approfondie de l'ensemble des infrastructures de la station et leurs destinations. Chaque étape du traitement a été examinée minutieusement, mettant en lumière l'ingéniosité des procédés mis en œuvre, Depuis le captage de l'eau brute jusqu'à sa distribution en tant qu'eau potable, Soulignant ainsi le rôle vital de la station dans l'approvisionnement d'Alger.

Cependant, il est à signaler que la capacité de production actuelle de la station d'El Marsa ne suffit plus pour répondre aux besoins grandissants de la population algéroise. Le nombre limité de lignes de traitement exige impérativement un agrandissement de la station pour qu'elle puisse satisfaire la demande croissante en eau potable dans la région. Sans cette expansion, les défis liés à l'approvisionnement en eau risquent de s'accroître à l'avenir.

# CHAPITRE IV :

## Estimation de l'évolution des besoins en eau

## 1 Introduction

La demande en eau varie en fonction du profil des usagers. Ainsi, avant d'entreprendre un projet d'alimentation en eau, il est indispensable d'identifier l'ensemble des catégories de consommateurs d'une agglomération. L'évaluation des besoins en eau potable pour une zone donnée doit tenir compte de plusieurs paramètres, notamment l'évolution démographique, la présence d'équipements collectifs ainsi que le niveau de vie de la population. De plus, la consommation diffère d'une région ou d'une agglomération à une autre.

## 2 Estimation et évolution des besoins futurs (Horizons de calcul) :

L'estimation future des besoins est calculée pour les horizons 2035 et 2045

### 2.1 Evaluation de la population :

Les taux d'accroissement démographique des communes de la zone d'étude sont variables selon les localités.

Pour évaluer la population future correspondant à l'horizon 2055, nous utilisons une progression géométrique selon la formule des intérêts composés :

$$P_N = P_0 (1 + \tau)^n$$

Avec :

- $P_N$  : Population future à l'horizon
- $P_0$  : Population de référence correspondant à l'année 2008
- $\tau$  : Taux d'accroissement de la population (en %)
- $n$  : Nombre d'années séparant les deux périodes considérées

Le résultat de l'évaluation de la population est présenté dans le tableau 18 :

**Tableau 18:** Evolution démographique de la zone d'étude.

| Commune        | Taux d'accroissement | 2008          | 2025          | 2035          | 2045          | 2055          |
|----------------|----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Heraoua        | 0.86%                | 27565         | 31 887        | 34 735        | 37 841        | 41 220        |
| Rouïba         | 2.89%                | 49870         | 80 900        | 91 000        | 102 300       | 114 900       |
| Réghaïa        | 0.84%                | 85452         | 98 843        | 107 680       | 117 307       | 127 795       |
| Bordj El Bahri | 1.44%                | 52816         | 41 282        | 44 950        | 48 950        | 53 289        |
| El Marsa       | 1.29%                | 12100         | 10807         | 14000         | 16500         | 19500         |
| Ain taya       | 0.86%                | 34501         | 39901         | 43420         | 47420         | 51395         |
| <b>TOTAL</b>   | -                    | <b>264312</b> | <b>305645</b> | <b>337820</b> | <b>372363</b> | <b>410154</b> |

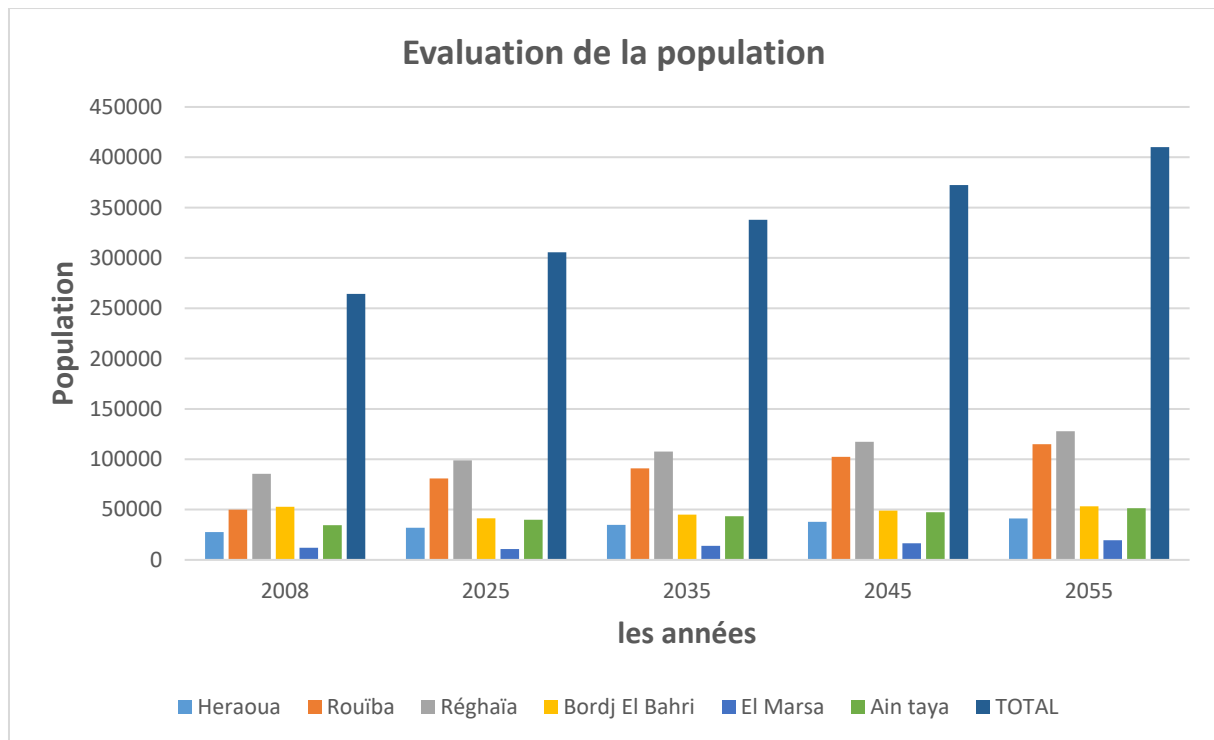


**Figure 23:** Evolution démographique de la zone d'étude.

La population totale de la zone étudiée passe de 264 312 habitants en 2008 à 410 154 habitants en 2055, soit une croissance d'environ 55 %. Cette évolution est marquée par une forte augmentation à Rouïba, une croissance régulière à Réghaïa et Aïn Taya, une progression modérée à Heraoua, tandis que Bordj El Bahri et El Marsa connaissent une tendance plus faible, voire stagnante.

## 2.2 Dotation :

C'est la quantité d'eau potable, par jour, que doit recevoir un habitant au niveau de son robinet, pour satisfaire ses besoins journaliers.

La dotation nette domestique et autres usages correspond à la dotation moyenne journalière destinée à la consommation domestique et des autres usages.

Selon les informations recueillies auprès de SEAAL, la dotation en eau potable des communes est égale à 150 l/j/hab.

## 2.3 Estimation des besoins journaliers

Les besoins journaliers sont calculés comme suit :

$$Q_{\text{moy},j} = \frac{1}{1000} \times \text{dot} \times N$$

Avec :

- $Q_{moy.j}$  : Débit moyen journalier ( $m^3/j$ ).
- Dot : La dotation moyenne journalière (l/j/hab).
- N : Nombre d'habitants.

### 2.3.1 Besoins domestiques :

Les besoins moyens journaliers à différents horizons sont donnés dans le tableau 19 :

**Tableau 19:** Débit moyen journalier domestique à différents horizons

| Horizon                 | Actuel          | Moyen terme  | Moyen terme     | Long terme     |
|-------------------------|-----------------|--------------|-----------------|----------------|
| Années                  | 2025            | 2035         | 2045            | 2055           |
| Population              | 305645          | 337820       | 372363          | 410154         |
| Dotation (l/j/hab)      | 150             | 150          | 150             | 150            |
| $Q_{moy.j}$ ( $m^3/j$ ) | <b>45846,75</b> | <b>50673</b> | <b>55854,45</b> | <b>61523,1</b> |

Le tableau fournit des données précises sur les besoins en eau potable de la population croissante de la zone d'étude dans 2025, 2035, 2045 et 2055.

### 2.3.2 Besoins des équipements :

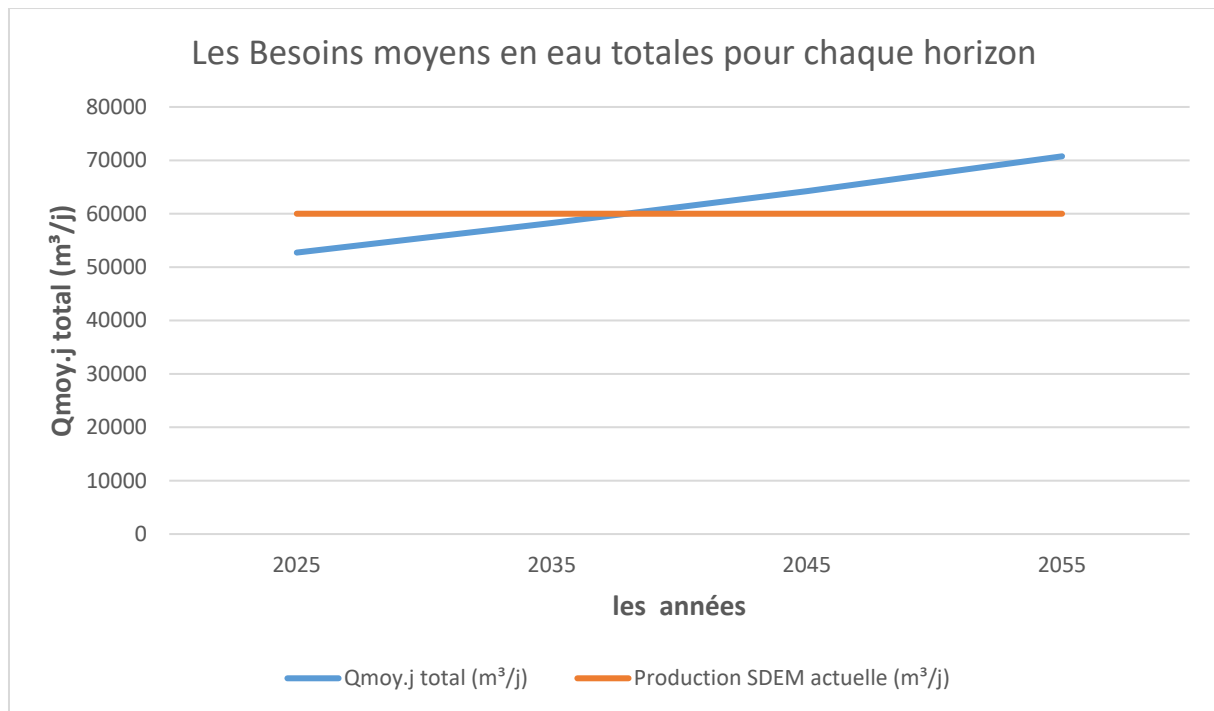
Les équipements publics sont des infrastructures sanitaires, scolaires, socioculturelles et administratives. Le choix de la dotation varie en fonction du besoin de ces équipements

On estime que la consommation des équipements est de 15% de la consommation domestique

**Tableau 20:** Besoins moyens en eau totales pour chaque horizon

| Horizon                                                  | 2025         | 2035         | 2045         | 2055         |
|----------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| $Q_{moy.j}$ Domestique ( $m^3/j$ )                       | 45846,75     | 50673        | 55854,45     | 61523,1      |
| $Q_{moy.j}$ Équipements ( $m^3/j$ )                      | 6877,013     | 7600,95      | 8378,168     | 9228,465     |
| <b><math>Q_{moy.j}</math> total (<math>m^3/j</math>)</b> | 52723,76     | 58273,95     | 64232,62     | 70751,57     |
| <b>Production SDEM actuelle (<math>m^3/j</math>)</b>     | <b>60000</b> | <b>60000</b> | <b>60000</b> | <b>60000</b> |

Le tableau précédent confirme une tendance à long terme déjà anticipée. Si la capacité de production de la SDEM demeure fixée à 60 000  $m^3/jour$ , elle deviendra progressivement insuffisante pour couvrir la demande en eau. Le point de bascule, où la demande excède l'offre, se situe entre 2035 et 2045, ce qui concorde avec l'observation selon laquelle la station ne parvenait plus à satisfaire les besoins moyens après 2037. Cela implique la nécessité de mettre en place des mesures urgentes, telles que l'optimisation de la station, afin de répondre aux besoins croissants et d'éviter une situation de pénurie



Calcul des déficits en eau potable :

Nous devons également considérer les variations journalières de consommation avec les coefficients d'irrégularité :

- Coefficient maximal journalier :  $K_{max,j} = 1,2$

**Tableau 21:** Consommations journalières avec coefficients maximal journalier.

| Horizon | Qmoy.j (m³/j) | Kmax.j | Qmax.j (m³/j)   |
|---------|---------------|--------|-----------------|
| 2025    | 45593,82      | 1,2    | <b>54712,58</b> |
| 2035    | 58525,11      | 1,2    | <b>70230,13</b> |
| 2045    | 64755,12      | 1,2    | <b>77706,14</b> |
| 2055    | 70751,57      | 1,2    | <b>84901,88</b> |

Le tableau précédent montre une hausse continue des besoins en eau entre 2025 et 2055. Le débit moyen et le débit maximal journalier augmentent fortement, traduisant une pression croissante sur les ressources et la nécessité d'anticiper des solutions pour couvrir la demande future.

### 3 Critères de potabilité d'une eau destinée à la consommation

Une eau est considérée comme "potable" si elle respecte les normes légales établies qui fixent des limites maximales pour diverses substances nocives pouvant être présentes dans l'eau. Ces normes incluent cinq catégories de paramètres :

### 3.1 Paramètres organoleptiques :

- Goût et odeur : doivent être non désagréables
- Couleur : degré de couleur maximale acceptable de 15 UCV
- Turbidité : mesure l'aspect trouble de l'eau.

### 3.2 Les paramètres physico-chimiques :

- La température : influence la densité, la viscosité et la solubilité des gaz
- La dureté : somme des concentrations en cations métalliques ( $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ )
- Le pH : mesure l'acidité ou l'alcalinité de l'eau (6,5 à 9,5)
- La minéralisation : concentration en sels dissous

### 3.3 Les paramètres bactériologiques :

L'eau potable ne doit contenir aucun organisme pathogène ni indicateur de contamination fécale, avec une limite de 10 bactéries coliformes totales par 100 millilitres d'eau.

### 3.4 Matières en suspension :

Particules minérales et organiques présentes dans l'eau, leur concentration varie selon la nature des terrains traversés.

### 3.5 La conductivité électrique :

Mesure de la conductance de l'eau, reflète la minéralisation et sert de marqueur d'origine.

### 3.6 Les normes de potabilité

Les normes de l'eau potable sont établies par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), l'Union Européenne (UE) ou le ministère algérien des ressources en eau.

**Tableau 22:** Normes de potabilité de l'eau fixées par le ministère algérien des ressources en Eau (Journal officiel, 2014)

| Paramètres   | Symbole            | Unité                          | Norme Algérienne |
|--------------|--------------------|--------------------------------|------------------|
| Turbidité    | -                  | NTU                            | 5                |
| Dureté       | -                  | °F                             | 50               |
| Conductivité | -                  | $\mu\text{S}/\text{cm}$ à 20°C | 2800             |
| pH           | -                  | -                              | 6,5 - 9,5        |
| Ammonium     | $\text{NH}_4^+$    | ppm                            | 0.5              |
| Calcium      | $\text{Ca}^{2+}$   | ppm                            | 200              |
| Potassium    | $\text{K}^+$       | ppm                            | 12               |
| Chlorure     | $\text{Cl}^-$      | ppm                            | 500              |
| Fluore       | $\text{F}^-$       | ppm                            | 1.5              |
| Fer          | Fe                 | ppm                            | 0.3              |
| Nitrite      | $\text{NO}_2^-$    | ppm                            | 0.2              |
| Nitrate      | $\text{NO}_3^-$    | ppm                            | 50               |
| Sodium       | $\text{Na}^+$      | ppm                            | 200              |
| Sulfate      | $\text{SO}_4^{2-}$ | ppm                            | 400              |

Ce tableau établit les normes de qualité pour l'eau potable en Algérie (2014). Il fixe des limites maximales pour 12 paramètres essentiels : physiques (turbidité, dureté), chimiques (pH, conductivité) et minéraux (calcium, chlorure, fer, etc.).

Ces normes visent à garantir la sécurité sanitaire tout en tenant compte des spécificités géologiques locales (tolérance plus élevée pour certains minéraux naturellement présents).

Met L'objectif est d'assurer une eau de consommation saine, conforme aux standards de santé publique en Algérie.

### **4 Conclusion :**

L'étude a montré que la production actuelle de la station de dessalement d'El Marsa, estimée à 60 000 m<sup>3</sup>/j, permet déjà de couvrir une grande partie des besoins en eau potable de la zone d'étude. Toutefois, les prévisions indiquent que cette capacité reste légèrement insuffisante face à la croissance démographique et aux besoins futurs. Ainsi, il n'est pas nécessaire de recourir immédiatement à de nouvelles infrastructures de grande envergure, mais plutôt d'optimiser et d'améliorer les performances de la station existante.

L'amélioration de la station d'El Marsa apparaît donc comme une solution stratégique et réaliste pour combler ce léger déficit, sécuriser l'approvisionnement et garantir une eau conforme aux normes de potabilité, tout en répondant durablement aux besoins de la population.

CHAPITRE V :

OPTIMISATION de la  
performance de la station de  
dessalement EL MARSA

## **1 Introduction :**

L'analyse des données d'exploitation constitue une étape essentielle pour évaluer la performance réelle d'une station de dessalement et identifier les principaux facteurs limitant son efficacité. Dans le cadre de ce travail, nous disposons de six mois de relevés de production et d'observations techniques concernant la station d'El Marsa. Ces informations fournissent une base solide pour comprendre les fluctuations de rendement, les arrêts enregistrés ainsi que les contraintes opérationnelles qui affectent la continuité du service.

L'étude de ces données permet non seulement de mettre en évidence les écarts entre la capacité nominale et la production effective, mais également de cerner les causes récurrentes des interruptions, telles que les perturbations électriques, les défauts de variateurs ou encore les défaillances mécaniques liées à l'usure et à la dégradation des joints d'étanchéité.

L'objectif de ce chapitre est donc de présenter, d'interpréter et de commenter les résultats issus de ces observations, afin de dégager les tendances majeures, d'identifier les points critiques et de proposer des pistes d'amélioration pour optimiser la performance de la station à court et à long terme.

## **2 Analyse des Performances de Production de la Station de Dessalement :**

Dans le cadre de cette étude, 137 jours de données d'exploitation de la station de dessalement d'El Marsa ont été collectés et analysés. Cependant, afin d'illustrer de manière plus détaillée les dysfonctionnements rencontrés, le mois de mai 2025 a été retenu comme exemple représentatif.

L'analyse de cette période révèle une forte variabilité du débit de production, liée principalement aux perturbations électriques. Ces incidents ont entraîné des arrêts fréquents, parfois prolongés, réduisant considérablement le taux d'exploitation de la station.

Par ailleurs, les microcoupures répétitives ont accentué la dégradation mécanique de certains composants, notamment les joints toriques des tubes à pression, a provoqué des fuites sur plusieurs points de raccordement. Ce qui conduit à une diminution de la performance globale de la station et l'augmentation des besoins en maintenance corrective.

. Pour une meilleure corrélation entre les arrêts de production et les incidents électriques, il serait pertinent d'effectuer un suivi basé sur les heures précises d'occurrence plutôt que sur une simple périodicité journalière.

Dans une station d'osmose inverse, il peut arriver qu'on arrête un rack pour différentes raisons. Ces arrêts sont souvent nécessaires pour protéger l'installation, faire des contrôles ou corriger des problèmes. Dans ce qui suit, on va voir les raisons principales qui peuvent pousser à arrêter un rack. Voici quelques raisons :

- Changement des joints toriques du tube a pression.
- Arrêt de la station suite à une perturbation électrique au niveau de Sonelgaz
- Réparation du conductimètre
- Intervention sur les débitmètres d'expédition.
- Effectuer un lavage chimique des membranes (CIP)
- Défaut de variateur

- Intervenir sur une fuite détectée au niveau de la conduite de distribution
- Une perturbation électrique
- L'amorçage de la pompe

### **3 Impact des microcoupures électriques sur l'exploitation**

Les microcoupures électriques constituent l'un des principaux facteurs de perturbation du fonctionnement de la station de dessalement. Chaque microcoupure provoque l'arrêt brutal des unités de production, entraînant une perte immédiate de production pouvant atteindre 20 000 à 40 000 m<sup>3</sup>/jour, selon ses conséquences sur certains équipements de la station et la gravité de l'incident.

À cela s'ajoute le temps nécessaire pour le redémarrage de la station, qui nécessite une vérification complète des différents équipements et installations, en particulier les conduites (problèmes de fuites), les pompes, les vannes endommagées et d'autres accessoires. Cette vérification peut durer plusieurs heures, évaluée en moyenne entre 3 et 6 heures, ce qui réduit considérablement la disponibilité effective de la station.

Sur le plan mécanique, ces arrêts et redémarrages répétés génèrent des coups de bélier dans les pompes, causés par les variations soudaines de pression lors de la coupure ou du rétablissement de l'alimentation électrique. Ces chocs hydrauliques fragilisent les organes internes des pompes et accélèrent la casse des composants sensibles, notamment les joints toriques, dont la défaillance provoque des fuites d'eau et une perte continue de débit.

À long terme, les microcoupures contribuent également à l'usure prématurée des équipements électromécaniques, augmentant la fréquence des pannes et le recours à la maintenance corrective.

Ainsi, elles ont un triple impact : une réduction directe de la production, une augmentation du temps d'indisponibilité et une dégradation accélérée du matériel due aux coups de bélier dans les pompes.

#### **3.1 Coups de bélier dus aux microcoupures électriques**

Le coup de bélier est un phénomène hydraulique transitoire caractérisé par une variation brutale de pression dans une canalisation, provoqué par un changement rapide de vitesse d'écoulement du fluide. Dans le contexte d'une station de dessalement, les microcoupures électriques (coupures de très courte durée, généralement inférieures à 3 secondes) provoquent l'arrêt brutal des pompes, générant des ondes de surpression et de dépression qui se propagent dans le réseau hydraulique.

Mécanisme physique :

- Arrêt brutal des pompes suite à une microcoupure
- Inversion du sens d'écoulement dans la conduite de refoulement
- Création d'ondes de pression pouvant atteindre plusieurs bars
- Répercussion sur l'ensemble du réseau hydraulique interne

Conséquences observées :

- Sollicitations mécaniques excessives sur les équipements
- Risque de désamorçage des pompes

- Nécessité de redémarrages fréquents des équipements

### **3.2 Détériorations des joints toriques causée par les microcoupures**

Les joints toriques sont des éléments d'étanchéité circulaires en élastomère, installés dans des gorges usinées pour assurer l'étanchéité entre deux pièces mécaniques. Dans une station de dessalement, ils équipent notamment les tubes de pression des modules d'osmose inverse, les raccords hydrauliques et les équipements rotatifs.



**Figure 24: Changement du joint torique du tube à pression**

Le Mécanisme de dégradation :

Les microcoupures électriques génèrent des cycles pression-dépression brutaux qui soumettent les joints toriques à des contraintes mécaniques répétées :

- Déformation élastique excessive : les variations de pression déforment le joint au-delà de sa limite d'élasticité
- Fatigue du matériau : les cycles répétés fragilisent la structure moléculaire de l'élastomère
- Phénomène d'extrusion : la pression différentielle pousse le joint hors de sa gorge
- Abrasion : les mouvements relatifs des pièces usent prématurément le joint

Incidents documentés :

- Fuites sur tubes de pression des racks
- Arrêts pour réparation de fuites
- Interventions de maintenance corrective récurrentes

## 4 Présentation des Données de Production

### 4.1 Configuration de la Station

La station de dessalement étudiée comprend cinq racks de production (Rack 1 à Rack 5), chacun équipé de systèmes d'osmose inverse. La capacité nominale de chaque rack est de 500 m<sup>3</sup>/h, permettant une production théorique maximale de 60 000 m<sup>3</sup>/j.

Paramètres de Suivi

Les paramètres analysés comprennent :

- Débit de sortie de chaque rack (m<sup>3</sup>/h)
- Débit de production journalier total (m<sup>3</sup>/j)
- Observations opérationnelles et interventions de maintenance

### 4.2 Analyse Statistique des Performances

#### 4.2.1 Les débits moyens de production

L'analyse révèle des différences significatives dans les performances des racks comme nous pouvons voir dans le graphe suivant :

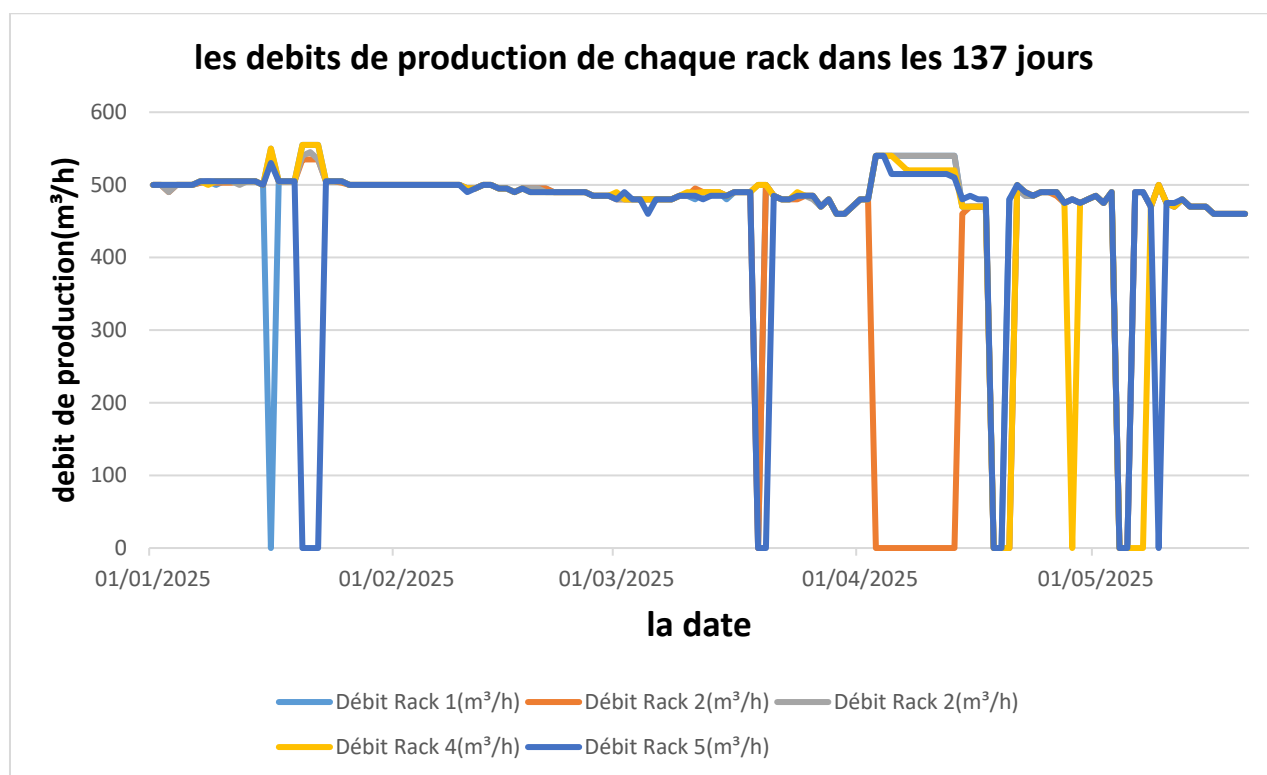


**Figure 25:** les débits de production de chaque rack dans les 137 jours

Les débits moyens de chaque rack, hors jours d'arrêt (où le débit de production est nul)

- Rack 1 : Performance la plus élevée avec un débit moyen de 472,7 m<sup>3</sup>/h
- Rack 2 : Performance la plus faible avec un débit moyen de 430,1 m<sup>3</sup>/h, affecté par plusieurs arrêts prolongés

- Racks 3, 4, 5 : Performances intermédiaires avec des débits moyens variant entre 456 et 476 m<sup>3</sup>/h

#### **4.2.2 Production Journalière :**

La production journalière moyenne s'élève à 48406.32 m<sup>3</sup>/j, représentant environ 80.6% de la capacité théorique maximale de la station (60 000 m<sup>3</sup>/j).

#### **4.3 Analyse des Incidents et Maintenances :**

Typologie des Interventions :

L'analyse des observations révèle plusieurs types d'interventions :

Maintenances Préventives :

La maintenance préventive est indispensable pour assurer la fiabilité et la longévité des équipements de la station de dessalement. Toutefois, ces opérations planifiées nécessitent l'arrêt partiel ou total de certaines unités, ce qui entraîne des pertes de production temporaires. Les principales interventions préventives et leurs impacts sont les suivantes :

- Lavages chimiques des membranes (CIP - Cleaning In Place) : ces opérations mobilisent généralement une partie des racks pendant 6 à 8 heures, ce qui réduit la production journalière d'environ 12 000 à 18 000 m<sup>3</sup>, en fonction du nombre de trains arrêtés.
- Maintenance des pompes et équipements auxiliaires : ces travaux nécessitent un arrêt de 4 à 6 heures, avec une perte de débit estimée entre 8 000 et 12 000 m<sup>3</sup>, selon la capacité des pompes concernées.
- Remplacement de joints toriques : bien que ciblée, cette opération implique une immobilisation de 2 à 4 heures, avec une perte directe de 3 000 à 6 000 m<sup>3</sup>. Cependant, elle permet de prévenir des fuites prolongées qui, si elles ne sont pas traitées, peuvent causer des pertes diffuses continues.

Interventions Correctives :

Les observations d'exploitation montrent que plusieurs interventions correctives sont nécessaires à la suite de ces incidents, avec des impacts mesurables en termes de pertes de temps et de production :

- Réparation de conductimètres : temps d'arrêt moyen de 2 à 3 heures, entraînant une perte estimée entre 4 000 et 6 000 m<sup>3</sup> de production.
- Intervention sur les variateurs de fréquence : arrêt prolongé de 6 à 10 heures, avec une perte journalière pouvant dépasser 15 000 à 20 000 m<sup>3</sup>.
- Réparation de fuites sur les conduites (joints toriques, raccords) : immobilisation de 3 à 5 heures, causant une perte directe de 5 000 à 8 000 m<sup>3</sup>, à laquelle s'ajoute une perte diffuse continue tant que la fuite n'est pas colmatée.

Arrêts Externes :

Les arrêts externes, indépendants de l'exploitation directe de la station, constituent une source importante de pertes de production. Ces événements échappent généralement au contrôle des opérateurs et engendrent des interruptions souvent prolongées :

- Perturbations électriques (SONALGAZ) : elles provoquent un arrêt immédiat et complet de la station. Selon la durée de la coupure, l'indisponibilité varie entre 6 et 12 heures, entraînant une perte estimée de 15 000 à 30 000 m<sup>3</sup>/jour.
- Travaux sur les conduites d'expédition : ces interventions nécessitent la suspension temporaire du refoulement vers le réseau, immobilisant la station pendant 8 à 24 heures, avec une perte journalière pouvant atteindre 20 000 à 40 000 m<sup>3</sup> selon l'ampleur des travaux.
- Interventions de l'ADE (Algérienne Des Eaux) : généralement liées à la gestion ou au contrôle de la distribution, elles imposent des arrêts de 4 à 8 heures, correspondant à une perte de 8 000 à 15 000 m<sup>3</sup> de production.

## **5 IDENTIFICATION DES PRINCIPALES DÉFAILLANCES**

Cette section présente une analyse détaillée des principales défaillances observées dans la station, classées selon leur nature technique. Chaque défaillance est analysée en termes de description, conséquences opérationnelles et causes probables.

### **5.1 DÉFAILLANCES ÉLECTRIQUES**

Les défaillances électriques constituent l'une des principales causes d'arrêt et de baisse de performance dans une station de dessalement par osmose inverse. Elles se manifestent sous différentes formes : perturbations liées au réseau d'alimentation (Sonelgaz), microcoupures, ou encore défauts des variateurs de fréquence.

#### **5.1.1 Arrêts dus aux perturbations électriques (Sonelgaz)**

Ces perturbations correspondent à des coupures ou des instabilités dans l'alimentation électrique fournie par Sonelgaz. Elles peuvent durer de quelques secondes à plusieurs heures selon la gravité de l'incident.

Conséquences :

- Arrêt total ou partiel de la station, avec interruption immédiate de la production.
- Désamorçage des pompes, nécessitant des opérations de réamorçage chronophages.
- Pertes de production estimées entre 20 000 et 40 000 m<sup>3</sup>/jour en cas d'incident majeur.
- Allongement du temps d'indisponibilité : entre 3 et 6 heures pour redémarrer complètement l'installation, incluant les vérifications des conduites, pompes, vannes et accessoires.
- Accélération de l'usure mécanique, notamment à cause des coups de bélier générés lors de l'arrêt/redémarrage brutal des pompes.

#### **5.1.2 Défaut de variateur de fréquence**

Le variateur de fréquence régule la vitesse des moteurs des pompes haute pression afin d'adapter le débit et la pression aux besoins de la production. Un défaut du variateur peut provenir d'une panne électronique, d'une surchauffe ou d'une instabilité électrique.

Conséquences :

- Instabilité du débit d'alimentation en eau de mer vers les modules d'osmose inverse.
- Arrêt des pompes concernées, ce qui entraîne un déséquilibre hydraulique au sein de la chaîne de production.

- Baisse de performance énergétique, car le variateur joue un rôle clé dans l'optimisation de la consommation électrique.
- Risque d'endommagement des membranes en cas de variation brutale de pression non maîtrisée.

## **5.2 DÉFAILLANCES MÉCANIQUES**

Les défaillances mécaniques constituent une cause récurrente d'arrêts et de pertes de performance dans les stations de dessalement. Elles concernent principalement les organes d'étanchéité (joints toriques), les pompes et les réseaux de distribution. Ces problèmes, souvent aggravés par les microcoupures électriques et les cycles de pression-dépression, entraînent une hausse de la maintenance corrective et une réduction de la disponibilité effective de la station.

### **5.2.1 Dégradation des joints toriques**

Les joints toriques sont des éléments d'étanchéité en élastomère, placés dans des gorges pour assurer la jonction hermétique entre différentes pièces mécaniques (tubes de pression, raccords hydrauliques, pompes, etc.). Leur usure ou leur dégradation entraîne des pertes d'étanchéité.

Conséquences :

- Risque de fuites internes au niveau des tubes à pression et des raccordements.
- Perte de pression dans le circuit hydraulique, entraînant une baisse du rendement.
- Diminution de l'efficacité globale du système d'osmose inverse.
- Augmentation des besoins en maintenance corrective (interventions répétées).

Causes identifiées :

- Vieillesse des matériaux (fatigue de l'élastomère au fil du temps).
- Pression excessive et coups de bélier liés aux microcoupures électriques.
- Mauvaise qualité de l'eau (présence de particules abrasives ou de produits chimiques dégradant l'élastomère).
- Extrusion et abrasion du joint dues aux cycles pression-dépression répétés.

### **5.2.2 Problèmes d'amorçage de pompe :**

L'amorçage consiste à remplir la pompe et la conduite d'aspiration avec de l'eau avant sa mise en marche. En cas de perte de charge excessive, de désamorçage ou d'entrée d'air dans le circuit, l'amorçage devient difficile, voire impossible.

Conséquences :

- Diminution du débit d'alimentation, réduisant la capacité de production.
- Fonctionnement à sec des pompes, entraînant une surchauffe et un risque d'endommagement des garnitures mécaniques.
- Augmentation des besoins en maintenance corrective et réduction de la durée de vie des équipements.

Causes identifiées :

- Présence d'air dans la conduite d'aspiration.

- Pertes de charge élevées dues à un encrassement des filtres ou des prétraitements.
- Mauvaise étanchéité des clapets anti-retour.

### **5.2.3 Fuite sur la conduite de distribution**

Les conduites de distribution transportent l'eau dessalée vers les réservoirs de stockage ou les réseaux de distribution. La corrosion, la fatigue mécanique ou les défauts de raccordement peuvent provoquer des fuites localisées.

Conséquences :

- Pertes d'eau importantes, augmentant le volume non facturé.
- Baisse de pression dans le réseau, impactant la continuité du service.
- Risque de contamination de l'eau traitée par infiltration de polluants externes.
- Augmentation des coûts d'entretien liés aux réparations répétitives.

Causes identifiées :

- Vieillesse des matériaux de tuyauterie.
- Coups de bélier répétés affaiblissant les raccords.
- Mauvaise qualité de pose ou défauts de soudure/raccordement.
- Corrosion interne ou externe des conduites.

## **5.3 DÉFAILLANCES INSTRUMENTALES**

### **5.3.1 Conductimètre**

Description : Dysfonctionnement du capteur mesurant la conductivité

Conséquences : Mauvaise évaluation de la qualité de l'eau produite

### **5.3.2 Les débitmètres d'expédition**

Description : Débitmètres défectueux ou mal calibrés

Conséquences : Inexactitude dans les volumes d'eau mesurés

## **6 SOLUTIONS PROPOSÉES ET RECOMMANDATIONS**

Basées sur l'analyse des défaillances identifiées, les solutions proposées suivant une approche préventive et corrective visant à améliorer la fiabilité et la performance de la station. Ces recommandations sont organisées selon les domaines d'intervention prioritaires.

### **6.1 OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE**

#### **6.1.1 Joints toriques**

Planification optimisée des remplacements pour minimiser l'impact sur la production avec mise en place d'un programme basé sur les heures de fonctionnement. Mise en place d'un système de maintenance prédictive utilisant des joints haute qualité résistants aux produits chimiques.

Amélioration de la coordination entre opérateurs par la formation à l'inspection régulière des éléments d'étanchéité.

### **6.1.2 Systèmes de pompage**

Planification optimisée des interventions avec procédures de démarrage automatisées pour réduire les temps d'arrêt. Mise en place d'un système de maintenance prédictive incluant des vannes d'amorçage automatiques et capteurs de niveau. Amélioration de la coordination par la formation aux bonnes pratiques de redémarrage et procédures standardisées.

## **6.2 AMÉLIORATION DE LA FIABILITÉ :**

### **6.2.1 Alimentation électrique :**

Renforcement de l'alimentation électrique avec installation de groupes électrogènes et onduleurs pour équipements sensibles. Installation de systèmes de surveillance en temps réel pour le monitoring permanent des fluctuations réseau et détection précoce des défaillances électriques.

Standardisation des équipements avec parafoudres et systèmes de protection uniformisés.

### **6.2.2 Variateurs et contrôle :**

Renforcement des systèmes critiques par diagnostic automatique et alarmes de pré-défaillance. Installation de systèmes de surveillance continue des paramètres de fonctionnement des variateurs. Standardisation des pièces de rechange avec constitution d'un stock de variateurs de secours pour réduire les temps d'intervention.

## **6.3 AMÉLIORATION DE L'INSTRUMENTATION :**

### **6.3.1 Systèmes de mesure :**

Renforcement de la fiabilité par la redondance des débitmètres sur lignes critiques et instruments de rechange. Installation de systèmes de surveillance avec calibration périodique programmée et monitoring continu. Standardisation des capteurs pour faciliter la maintenance et réduire les coûts de stockage.

### **6.3.2 Détection et surveillance :**

Installation de systèmes de surveillance en temps réel pour la détection précoce des fuites et anomalies de fonctionnement. Renforcement des capacités de détection avec capteurs de pression et débit anormal. Standardisation des procédures de vérification et maintenance des connexions.

## **6.4 OPTIMISATION DU PROCÉDÉ :**

### **6.4.1 Gestion des membranes :**

Planification optimisée des cycles de nettoyage selon les valeurs de pression différentielle et SDI pour minimiser l'impact sur la production. Mise en place de prétraitements prédictifs plus efficaces pour espacer les interventions CIP. Amélioration de la coordination par la planification en période de faible demande.

### **6.4.2 Protection des infrastructures :**

Renforcement des équipements avec utilisation de matériaux résistants à la corrosion et pressions élevées. Installation de systèmes de surveillance pour la ventilation des armoires

électriques et température. Standardisation des matériaux pour faciliter la surveillance des dépôts et colmatages

## **7 PLAN D'ACTION PRIORITAIRE**

La mise en œuvre des solutions identifiées nécessite une approche progressive et structurée. Ce plan d'action hiérarchise les interventions selon leur urgence et leur impact sur la continuité de service.

### **7.1 Phase 1 : Actions Immédiates**

- Installation d'un réseau électrique spéciale pour la station de dessalement et bien dimensionner pour une bonne satisfaction électrique
- Installation du système de secours électrique
- Mise en place du monitoring électrique

### **7.2 Phase 2 : Amélioration Continue**

- Optimisation des cycles de maintenance
- Installation des systèmes de détection
- Amélioration des prétraitements

### **7.3 Phase 3 : Modernisation**

- Automatisation des procédures
- Redondance des équipements critiques
- Système de diagnostic prédictif

## **8 Conclusion :**

En conclusion, l'analyse des données a révélé un ensemble de dysfonctionnements récurrents qui compromettent la performance globale de la station de dessalement d'El Marsa. Les résultats montrent clairement que les microcoupures électriques constituent la cause principale des arrêts, puisqu'elles engendrent des effets en chaîne tels que les coups de bélier et la dégradation prématurée des joints toriques. Ces défaillances représentent à elles seules plus de 50 % des interruptions de fonctionnement, traduisant une fragilité notable de l'installation face aux perturbations électriques externes.

L'étude menée, combinant une approche quantitative (fréquence et durée des arrêts) et qualitative (analyse des conséquences techniques), met en évidence l'importance d'adopter une stratégie proactive pour limiter ces impacts négatifs. Elle démontre également que la fiabilité et la disponibilité de l'usine dépendent fortement de la stabilité de l'alimentation énergétique et de la capacité des équipements à résister aux variations imprévues.

Cette conclusion ouvre ainsi la voie à la recherche de solutions techniques adaptées, qu'il s'agisse de dispositifs de protection électrique, de systèmes d'atténuation des coups de bélier ou d'améliorations au niveau des matériaux et composants sensibles. L'objectif final est de garantir une exploitation plus sûre, plus continue et économiquement plus rentable de la station. Les chapitres suivants seront donc consacrés à l'étude et à la présentation de ces solutions d'amélioration, en mettant en évidence leur pertinence et leur apport potentiel dans la durabilité et l'efficacité du système de dessalement.

# CHAPITRE VI :

## Amélioration de performance du la station d'El MARSA

## **1 Introduction :**

Dans le domaine du dessalement de l'eau de mer par osmose inverse, la conception et l'optimisation des systèmes de membranes sont essentielles pour garantir une production efficace, économique et durable. Le logiciel LG Q+, développé par LG Chem, est un outil de simulation avancé qui permet de modéliser avec précision les performances des membranes d'osmose inverse dans différentes conditions d'exploitation.

Ce chapitre présente les résultats des simulations réalisées avec le logiciel LG Q+ sur le cas de la station de dessalement d'El Marsa. L'étude a porté sur la variation de la température de l'eau d'alimentation ainsi que sur le taux de conversion des membranes, afin d'évaluer leur influence sur la pression d'alimentation, la consommation énergétique et la qualité du perméat. Toutes les simulations ont été effectuées en maintenant un débit d'alimentation constant de 133 333 m<sup>3</sup>/j, correspondant au fonctionnement réel de la station.

L'objectif principal de ce travail est d'identifier les paramètres d'optimisation permettant d'améliorer la performance globale du procédé, tout en tenant compte des conditions réelles d'exploitation et des contraintes techniques de la station d'El Marsa.

## **2 Présentation du logiciel LG Q+**

LG Q+ est un logiciel de simulation gratuit conçu pour assister les ingénieurs dans la conception, la modélisation et l'optimisation des systèmes de dessalement utilisant les membranes LG Chem. Il est utilisé pour différents types d'eau, notamment l'eau saumâtre et l'eau de mer.

## **3 Fonctionnalités principales**

Le logiciel offre plusieurs fonctionnalités clés :

- Saisie des données d'entrée : salinité, température, pH, turbidité, etc.
- Sélection automatique des membranes adaptées
- Dimensionnement des racks : nombre de modules, agencement en série/parallèle
- Simulation complète des performances du système

## **4 Résultats fournis**

À partir des paramètres saisis, LG Q+ génère une série de résultats techniques :

- Débit de perméat total
- Taux de récupération
- Rejet de sels
- Pression appliquée
- Consommation spécifique d'énergie
- Qualité du perméat

## **5 Avantages techniques**

Le logiciel prend en compte les limites de fonctionnement des membranes, et avertit l'utilisateur en cas de dépassement (pression maximale, flux critique, etc.). Cela permet de :

- Prévenir l'encrassement et le vieillissement prématuré
- Optimiser la performance énergétique
- Réduire les risques techniques lors de la mise en œuvre

### 6 L'utilisation de logiciel LG Q+ :

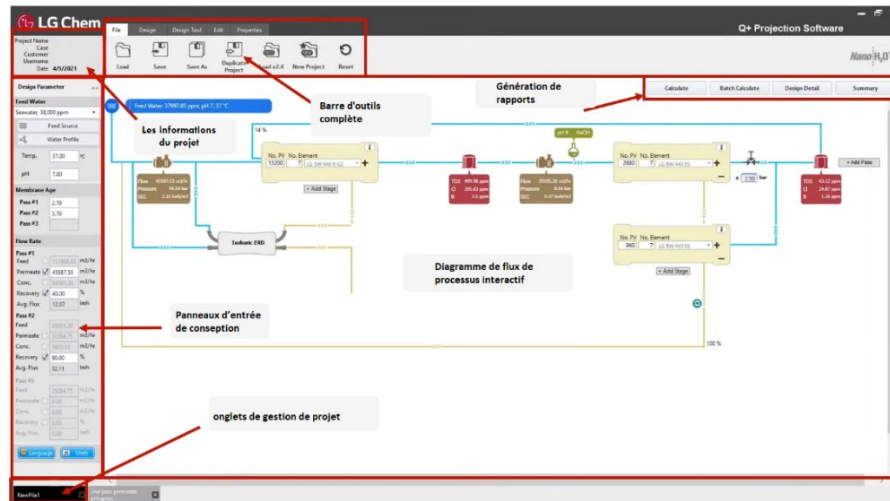


**Figure 26:** Fenêtre initiale du logiciel Q+(Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution)

- Les informations du projet
- Barre d'outils complète
- Panneaux d'entrée de conception
- Diagramme de flux de processus interactif
- Génération de rapports
- Onglets de gestion de projet

#### 6.1 L'information de projet :

Après le lancement du logiciel, la première étape consiste à créer un nouveau projet dans le logiciel de simulation LG Chem NanoH<sub>2</sub>O™. Cette étape débute par la création de projet, où l'utilisateur doit saisir les informations de base nécessaires à l'organisation et au suivi de la simulation.

L'objectif est de donner une identité claire et une traçabilité au fichier de calcul. Ainsi, l'utilisateur renseigne différents champs, tels que le nom du projet, le nom du client et son identifiant d'utilisateur. Ces informations permettent d'archiver correctement les résultats et de les associer à une étude spécifique. Comme nous pouvons le voir dans la figure 26 :

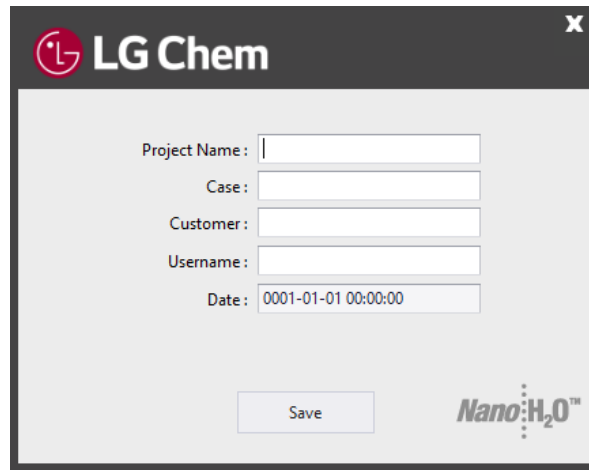
The screenshot shows a software window titled "LG Chem" with a close button (X) in the top right corner. Inside the window, there are five input fields: "Project Name:", "Case:", "Customer:", "Username:", and "Date:". The "Date" field is pre-filled with "0001-01-01 00:00:00". Below these fields is a "Save" button. In the bottom right corner of the window, there is a logo that reads "Nano:H<sub>2</sub>O™".

**Figure 27:** Les informations de projet (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution)

Une fois ces données enregistrées, le projet peut être sauvegardé, ce qui permet de passer aux étapes suivantes de la simulation.

## 6.2 Les données de l'eau :

Une fois le projet créé, nous pouvons procéder au choix des unités

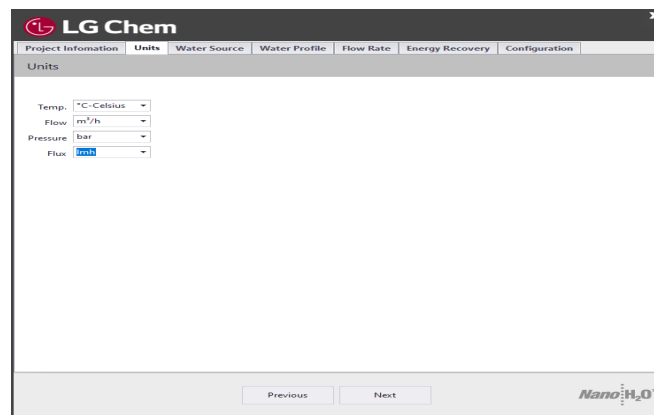
The screenshot shows the "Units" tab of the LG Chem software. The window has a title bar "LG Chem" and a menu bar with "Project Information", "Units", "Water Source", "Water Profile", "Flow Rate", "Energy Recovery", and "Configuration". The "Units" tab is active, showing four dropdown menus: "Temp." set to "°C-Celsius", "Flow" set to "m<sup>3</sup>/h", "Pressure" set to "bar", and "Flux" set to "m<sup>3</sup>/h". At the bottom of the window, there are "Previous" and "Next" buttons, and the "Nano:H<sub>2</sub>O™" logo is in the bottom right corner.

**Figure 28:** Sélectionnez les unités (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution)

Nous pouvons changer les unités à tout moment.

## 6.3 Configuration du profil chimique de l'eau d'alimentation :

Cette étape consiste à renseigner les données d'alimentation du système. En effet, il est nécessaire d'indiquer des paramètres clés tels que la température de l'eau, le pH et le type de SDI (indice de colmatage), qui influencent directement la perméabilité des membranes, le taux de passage des sels et le risque de colmatage. Comme illustré dans la figure suivante.

**Figure 29:** Caractéristiques de l'eau d'alimentation (Seawater–Open Intake, Température et pH)

L'étape suivante permet de définir la composition chimique détaillée de l'eau d'alimentation. L'utilisateur peut sélectionner un type d'eau prédéfini via le menu déroulant "Select Water Type" ou créer un nouveau profil personnalisé en utilisant le bouton "Add New". Le tableau présente une liste exhaustive des paramètres chimiques incluant les cations et les anions, et autres composés, avec leurs concentrations exprimées en mg/L et mg/L équivalent  $\text{CaCO}_3$ . Cette configuration précise de la chimie de l'eau est cruciale car elle influence directement les calculs de dimensionnement des membranes, et les besoins en prétraitement du système d'osmose inverse.

| Name                           | mg/L | mg/L as $\text{CaCO}_3$ | Balanced mg/L |
|--------------------------------|------|-------------------------|---------------|
| Ammonium ( $\text{NH}_4$ )     | 0    | 0                       | NaN           |
| Sodium (Na)                    | 0    | 0                       | NaN           |
| Potassium (K)                  | 0    | 0                       | NaN           |
| Magnesium (Mg)                 | 0    | 0                       | NaN           |
| Calcium (Ca)                   | 0    | 0                       | NaN           |
| Strontium (Sr)                 | 0    | 0                       | NaN           |
| Barium (Ba)                    | 0    | 0                       | NaN           |
| Fluoride (F)                   | 0    | 0                       | NaN           |
| Chloride (Cl)                  | 0    | 0                       | NaN           |
| Sulfate ( $\text{SO}_4$ )      | 0    | 0                       | NaN           |
| Nitrate ( $\text{NO}_3$ )      | 0    | 0                       | NaN           |
| Carbonate ( $\text{CO}_3$ )    | 0    | 0                       | 0             |
| Bicarbonate ( $\text{HCO}_3$ ) | 0    | 0                       | 0             |
| Boron (B)                      | 0    | 0                       | NaN           |
| Bromide (Br)                   | 0    | 0                       | NaN           |
| Silica ( $\text{SiO}_2$ )      | 0    | 0                       | 0             |

**Figure 30:** Profil chimique de l'eau d'alimentation par Q+ (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution, 2025)

La figure représente l'interface de configuration du profil chimique de l'eau d'alimentation

#### 6.4 Configuration des débits et du taux de conversion du système :

Cette étape permet de définir les paramètres hydrauliques essentiels dans la section "Flow Information" du logiciel Q+ de LG Chem. L'utilisateur peut spécifier le débit d'alimentation (Feed), le débit de perméat produit (Permeate), le débit de concentrat (Concentrate) et le taux de récupération (Recovery) en pourcentage. Le logiciel offre la flexibilité de saisir soit le débit de perméat souhaité, soit le débit d'alimentation disponible, calculant automatiquement les autres valeurs selon le taux de conversion défini. Cette configuration détermine directement les dimensions du système.

Flow Information

Pass #1

|             |                          |   |       |
|-------------|--------------------------|---|-------|
| Feed        | <input type="checkbox"/> | 0 | m3/hr |
| Permeate    | <input type="checkbox"/> | 0 | m3/hr |
| Concentrate | <input type="checkbox"/> | 0 | m3/hr |
| Recovery    | <input type="checkbox"/> | 0 | %     |

**Figure 31:** Configuration des débits du système par Q+ (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution, 2025)

La figure précédente représente l'interface de configuration des débits et du taux de conversion du système d'osmose inverse.

## 6.5 Configuration des membranes et dimensionnement du système :

Dans cette étape finale, l'utilisateur définit l'architecture physique du système d'osmose inverse en spécifiant la configuration des membranes pour chaque passe (si nous avons deux passes). Pour chaque étage (si nous avons deux étage), il est nécessaire de sélectionner le type de membrane adapté via le menu déroulant "Select Model", puis de définir le nombre de tubes à pression (No.PV - Pressure Vessels) et le nombre d'éléments membranaires par tube (No.Element). Cette configuration permet d'optimiser les performances du système selon les contraintes de débit, de qualité d'eau produite et d'efficacité énergétique.

Configuration

Please select number of PV, PV length and element type.

Pass #1

1st stage

No.PV: 0, No.Element: 0, Select Model

2nd stage

No.PV: 0, No.Element: 0, Select Model

Pass #2

1st stage

No.PV: 0, No.Element: 0, Select Model

2nd stage

No.PV: 0, No.Element: 0, Select Model

Previous Done

**Figure 32:** Configuration des membranes du système par Q+ (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution, 2025)

## 7 Caractérisation de la ressource hydrique :

L'élaboration du système repose sur l'évaluation précise des caractéristiques de la ressource en eau et des objectifs de traitement. Une investigation approfondie de la source disponible s'avère indispensable, incluant une caractérisation complète de sa composition, la définition du volume d'eau purifiée requis et les critères de qualité visés.

Cette phase initiale implique l'utilisation de l'outil de simulation Q+ développé par LG Chem Water Solution pour concevoir et évaluer par modélisation numérique une installation d'osmose inverse d'une production de 60 000 m<sup>3</sup> par jour. Les paramètres opérationnels principaux s'appuient sur ceux mis en œuvre à la station d'El Marsa. L'accomplissement de cette

mission nécessite de naviguer à travers différentes interfaces avant d'accéder au bilan final de la simulation.

## **7.1 Paramètres de Comparaison et Méthodologie**

### **7.1.1 Conditions d'Essai Normalisées**

Pour garantir la validité de la comparaison, les deux configurations ont été testées dans des conditions opérationnelles identiques :

#### **7.1.2 Paramètres Constants :**

- TDS eau brute : 36 632 mg/L
- Type de membranes : LG SW 440 SR
- Configuration : 154 tubes  $\times$  7 éléments = 1 078 membranes/rack
- Efficacité ERD : 80%

Aussi, d'autres paramètres de l'analyse de l'eau de mer de conception définies dans le tableau ci-dessous, telle qu'elle a été utilisée dans le logiciel de projection d'OI :

**Tableau 23:** Paramètres de l'eau de mer

| <b>Paramètre</b>                      | <b>Valeur (mg/L)</b> |
|---------------------------------------|----------------------|
| Ammonium (NH <sub>4</sub> )           | 0.2                  |
| Sodium (Na)                           | 11128.36             |
| Potassium (K)                         | 503.7                |
| Magnésium (Mg)                        | 1363.13              |
| Calcium (Ca)                          | 431.51               |
| Strontium (Sr)                        | 7.38                 |
| Barium (Ba)                           | 0.04                 |
| Fluoride (F)                          | 1.29                 |
| Chloride (Cl)                         | 19965.5              |
| Sulfate (SO <sub>4</sub> )            | 3054.07              |
| Nitrate (NO <sub>3</sub> )            | 0                    |
| Carbonate (CO <sub>3</sub> )          | 4.07                 |
| Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> )       | 157.52               |
| Boron (B)                             | 4.78                 |
| Bromide (Br)                          | 0                    |
| Silice (SiO <sub>2</sub> )            | 1.1                  |
| Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ) | 1.4                  |

Nous introduisons ces paramètres directement dans le logiciel LG Q+, afin qu'il puisse ajuster ses calculs et fournir une simulation fidèle aux conditions réelles de fonctionnement.

| Total Dissolved Solid (TDS) | 36632.11 | mg/L          | pH            | 8.00 | Temp.                 | 25.00 | °C |
|-----------------------------|----------|---------------|---------------|------|-----------------------|-------|----|
| Total Osmotic Pressure      | 26.09    | bar           |               |      |                       |       |    |
| Charge Balance              | All Ions |               |               |      | Balance Ion Selection |       |    |
| Name                        | mg/L     | mg/L as CaCO3 | Balanced mg/L |      |                       |       |    |
| Ammonium (NH4)              | 0.2      | 0.55          | 0.2           |      |                       |       |    |
| Sodium (Na)                 | 11128.36 | 24202.61      | 11118.69      |      |                       |       |    |
| Potassium (K)               | 503.7    | 644.12        | 503.26        |      |                       |       |    |
| Magnesium (Mg)              | 1363.13  | 5607.28       | 1361.95       |      |                       |       |    |
| Calcium (Ca)                | 431.51   | 1076.62       | 431.13        |      |                       |       |    |
| Strontium (Sr)              | 7.38     | 8.42          | 7.37          |      |                       |       |    |
| Barium (Ba)                 | 0.04     | 0.03          | 0.04          |      |                       |       |    |
| Fluoride (F)                | 1.29     | 3.39          | 1.29          |      |                       |       |    |
| Chloride (Cl)               | 19966.5  | 28161.5       | 19983.96      |      |                       |       |    |
| Sulfate (SO4)               | 3054.07  | 3179.34       | 3056.74       |      |                       |       |    |
| Nitrate (NO3)               | 0        | 0             | 0             |      |                       |       |    |
| Carbonate (CO3)             | 4.07     | 6.79          | 4.07          |      |                       |       |    |
| Bicarbonate (HCO3)          | 157.52   | 129.08        | 157.52        |      |                       |       |    |
| Boron (B)                   | 4.78     | 22.11         | 4.78          |      |                       |       |    |
| Bromide (Br)                | 0        | 0             | 0             |      |                       |       |    |
| Silica (SiO2)               | 1.1      | 0.92          | 1.1           |      |                       |       |    |
| Carbon dioxide (CO2)        | 1.1      | 2.5           | 1.1           |      |                       |       |    |

**Figure 33:** La source d'eau d'alimentation (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution)

## 7.2 Optimisation du Taux de Récupération

Le taux de récupération, défini comme le rapport entre la production d'eau dessalée et le débit d'eau brute entrant, constitue un paramètre crucial pour l'optimisation économique :

Formule de base :

$$Y = 100 \times \frac{Q_p}{Q_a}$$

Où :

- Y = Taux de récupération (%)
- Q<sub>p</sub> = Débit de perméat (m<sup>3</sup>/h)
- Q<sub>a</sub> = Débit d'alimentation (m<sup>3</sup>/h)

## 7.3 Stratégies de Récupération par Typologie d'Installation

En général, le taux de conversion dans le cas du dessalement de l'eau de mer est compris entre 30% et 55 % :

- Installations de faible capacité (Y ≈ 30-35%) : Conviennent aux unités avec prétraitement basique où l'optimisation énergétique n'est pas prioritaire.
- Installations industrielles moyennes (Y ≈ 35-45%) : Adaptées aux capacités importantes nécessitant un équilibre entre investissement et coûts opérationnels, avec prétraitement complet.
- Installations haute performance (Y ≈ 45-55%) : Déployées pour minimiser les coûts globaux, particulièrement efficaces avec des salinités modérées (35-36 g/L).

Maintenant dans La station d'Almarsa un taux de récupération constant de 45% sur toute la plage de températures opérationnelles (16-28°C).

**Tableau 24:** Les débits de conceptions de la station d'El Marsa

| Paramètre              | Valeur Horaire (m³/h) | Valeur Journalière (m³/j) |
|------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Alimentation totale    | 5 555,5               | 133333                    |
| Alimentation par ligne | 1111.1                | 26666.4                   |
| Production totale      | 2 500                 | 60000                     |
| Production par ligne   | 500.41                | 12 218,2                  |
| Concentrat total       | 3 053,5               | 74 666,4                  |
| Concentrat par ligne   | 610.7                 | 14 933,3                  |

Le tableau présente un récapitulatif des débits de conception pour un système d'osmose inverse, en montrant la quantité d'eau qui entre et sort du système. Les valeurs sont données pour le flux total et pour chaque ligne de traitement, en se concentrant sur les trois principaux flux : l'eau d'alimentation (l'eau brute qui entre), le perméat (l'eau purifiée produite) et la saumure (l'eau résiduelle concentrée).

## 7.4 Calcul du Dimensionnement Membranaire :

### 7.4.1 Détermination du Nombre d'Éléments

La quantification du nombre d'éléments nécessaires s'effectue selon la relation :

$$Ne = \frac{Qp}{f \times Se}$$

Où :

- Ne = Nombre d'éléments requis
- Qp = Débit de perméat de conception (m³/h)
- f = Flux transmembranaire (m³/m²/h)
- Se = Surface membranaire active par élément (m²)

Application numérique :

$$Ne = \frac{495.64}{11.25 \times 0.001 \times 41} \approx 1078 \text{ éléments par rack}$$

Pour une configuration à cinq racks, le nombre total d'éléments s'élève à 6 620 membranes.

### 7.4.2 Dimensionnement des Tubes de Pression

Les tubes de pression standard accueillent généralement 6 éléments, avec des variantes allant jusqu'à 8 éléments pour les configurations étendues. Les installations de taille réduite peuvent utiliser des tubes de capacité inférieure.

Dans notre configuration, chaque tube de pression contient 7 membranes.

Calcul du nombre de tubes :

$$N_v = \frac{N_e}{NEPV}$$

Où :

- $N_v$  = Nombre de tubes de pression
- $NEPV$  = Nombre d'éléments par tube

Application numérique :

$$N_v = \frac{1078}{7} = 154 \text{ tubes de pression par rack}$$

Pour l'ensemble de la station (5 racks), cela représente 770 tubes de pression au total.

## **8 Méthodologie de simulation**

### **8.1 Outil de simulation utilisé**

L'étude a été réalisée à l'aide du logiciel LG Q+, reconnu pour sa fiabilité dans la modélisation des systèmes de dessalement par osmose inverse. Cet outil permet de reproduire les conditions réelles de fonctionnement des membranes et d'évaluer les performances du procédé dans différentes situations d'exploitation. Grâce à sa précision, il constitue une référence pour l'analyse technique et l'optimisation énergétique des stations de dessalement.

### **8.2 Paramètres d'étude**

Afin de mener cette étude, plusieurs scénarios opérationnels ont été considérés. Les choix retenus concernent principalement :

- Le taux de conversion fixé à 44,6 % correspondant à la configuration standard, puis augmenté à 48 %, 50 % et 52 %.
- La plage de température comprise entre 16 °C et 28 °C, avec un pas de 2 °C.

La justification de ce choix qui repose sur les variations saisonnières observées à la station de dessalement d'El Marsa. Cette sélection assure une représentativité fidèle des conditions réelles et permet une interprétation pertinente des résultats.

### **8.3 Paramètres analysés**

Pour chaque combinaison de température et de taux de conversion, plusieurs indicateurs de performance ont été examinés. L'évaluation a porté sur :

- La pression d'alimentation, mesurée pour déterminer la contrainte nécessaire afin de compenser la pression osmotique et permettre le passage de l'eau à travers les membranes.

- La perte de charge, représentant les résistances hydrauliques dans les modules membranaires.
- L'énergie spécifique, correspondant à la consommation énergétique par unité de perméat produite et considérée comme un paramètre clé de l'efficacité globale du procédé.

## 9 Résultats finaux de la simulation

Dans le but d'améliorer la performance de la station, différents taux de conversion ont été testés dans une plage de températures comprise entre 16 °C et 28 °C. Les données obtenues à partir de ces simulations ont ensuite été analysées afin de mettre en évidence l'influence de ces paramètres sur le fonctionnement global du procédé.

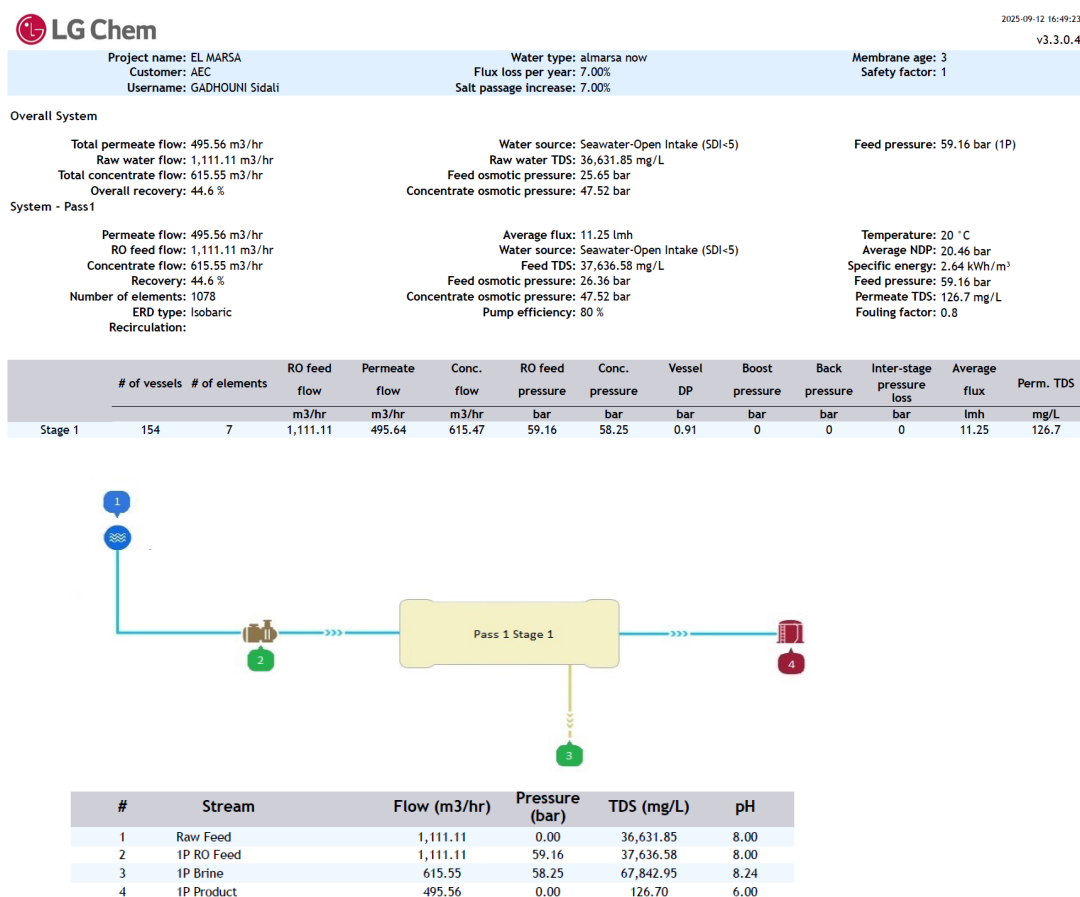


**Figure 34:** Rapport des résultats de la simulation d'Y=44.6% (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution)

| Water Analysis - Pass1 |           |               |              |                 |  |
|------------------------|-----------|---------------|--------------|-----------------|--|
| Species                | Raw water | Adjusted feed | Conc. Stage1 | Permeate Stage1 |  |
| Ammonium               | 0.20      | 0.21          | 0.36         | 0.01            |  |
| Sodium                 | 11,118.47 | 11,423.43     | 20,586.22    | 45.18           |  |
| Potassium              | 503.25    | 517.06        | 931.51       | 2.39            |  |
| Magnesium              | 1,361.92  | 1,399.27      | 2,525.12     | 1.21            |  |
| Calcium                | 431.13    | 442.95        | 799.35       | 0.38            |  |
| Strontium              | 7.37      | 7.58          | 13.67        | 0.01            |  |
| Barium                 | 0.04      | 0.04          | 0.07         | 0.00            |  |
| Fluoride               | 1.29      | 1.33          | 2.39         | 0.01            |  |
| Chloride               | 19,984.36 | 20,532.53     | 37,007.12    | 74.60           |  |
| Sulfate                | 3,056.80  | 3,140.65      | 5,668.87     | 1.14            |  |
| Nitrate                | 0.00      | 0.00          | 0.00         | 0.00            |  |
| Carbonate              | 2.62      | 2.67          | 6.62         | 0.00            |  |
| Bicarbonate            | 157.52    | 161.84        | 291.32       | 1.06            |  |
| Boron                  | 4.78      | 4.91          | 8.30         | 0.70            |  |
| Bromide                | 0.00      | 0.00          | 0.00         | 0.00            |  |
| Silica                 | 1.10      | 1.13          | 2.04         | 0.00            |  |
| CO2                    | 1.80      | 1.80          | 1.80         | 1.80            |  |
| TDS                    | 36,631.85 | 37,636.58     | 67,842.95    | 126.70          |  |
| pH                     | 8.00      | 8.00          | 8.24         | 8.00            |  |

| Within Vessels - Pass1 |                    |                     |           |                    |                |                          |              |               |                |        |
|------------------------|--------------------|---------------------|-----------|--------------------|----------------|--------------------------|--------------|---------------|----------------|--------|
| Position               | RO feed flow m3/hr | Permeate flow m3/hr | Flux l/mh | Element recovery % | Element DP bar | Net driving pressure bar | Polarization | Feed TDS mg/L | Perm. TDS mg/L |        |
| Stage 1                |                    |                     |           |                    |                |                          |              |               |                |        |
| LG SW 440 SR           | 1                  | 7.22                | 0.78      | 19.13              | 10.84          | 0.20                     | 27.54        | 1.13          | 37,632.60      | 57.54  |
| LG SW 440 SR           | 2                  | 6.43                | 0.65      | 16.01              | 10.17          | 0.16                     | 24.00        | 1.12          | 42,200.78      | 76.10  |
| LG SW 440 SR           | 3                  | 5.78                | 0.54      | 13.11              | 9.27           | 0.14                     | 20.56        | 1.11          | 46,970.55      | 101.70 |
| LG SW 440 SR           | 4                  | 5.24                | 0.43      | 10.53              | 8.21           | 0.12                     | 17.34        | 1.09          | 51,760.79      | 136.80 |
| LG SW 440 SR           | 5                  | 4.81                | 0.34      | 8.34               | 7.08           | 0.11                     | 14.44        | 1.08          | 56,380.14      | 184.52 |
| LG SW 440 SR           | 6                  | 4.47                | 0.27      | 6.53               | 5.97           | 0.10                     | 11.90        | 1.07          | 60,663.65      | 248.62 |
| LG SW 440 SR           | 7                  | 4.20                | 0.21      | 5.08               | 4.94           | 0.09                     | 9.74         | 1.05          | 64,499.42      | 333.46 |

| Solubility - Pass1     |          |          |
|------------------------|----------|----------|
| Solubility calculation |          |          |
|                        | Feed     | Conc.    |
| LSI                    | 0.92     | 1.95     |
| CaCO3                  | 25.65 %  | 54.81 %  |
| SiO2                   | 14.74 %  | 38.04 %  |
| BaSO4                  | 173.46 % | 265.58 % |
| CaF2                   | 21.64 %  | 132.52 % |
| SiO2                   | 0 %      | 0 %      |
| Stiff Davis Index      | -0.64    | 0.38     |

**Figure 35:** Rapport des résultats de la simulation de la qualité d'eau du perméat de de Y=44.6% (Logiciel de simulation Q+ LG Sea Water Solution)

L'étude comparative repose principalement sur trois indicateurs clés de performance :

- La production et l'efficacité hydraulique,
- La qualité du perméat.
- L'Efficacité énergétique,

## 9.1 Configuration Standard – Taux de récupération Y = 44.6 %

Un taux de récupération de 44.6 % correspond à la configuration de référence. Le débit de perméat produit reste équilibré par rapport au débit de concentrat, ce qui assure une exploitation stable et fiable. La pression osmotique reste modérée, limitant les risques d'entartrage et de colmatage des membranes. Cette configuration prolonge la durée de vie des membranes et réduit les interventions de maintenance. Toutefois, elle implique un débit de concentrat plus important, nécessitant davantage d'eau brute et un traitement plus coûteux des rejets.

**Tableau 25:** Résultats de simulation pour Y = 44,6 % avec logiciel Q+

| Température | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 |
|-------------|----|----|----|----|----|----|----|
|-------------|----|----|----|----|----|----|----|

|                                         |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>La pression d'alimentation (bar)</b> | 61.17 | 60.11 | 59.16 | 58.32 | 57.57 | 56.92 | 56.32 |
| <b>La perte de charge (bar)</b>         | 0.92  | 0.92  | 0.91  | 0.91  | 0.9   | 0.89  | 0.89  |
| <b>Énergie spécifique (kWh/m³)</b>      | 2.73  | 2.69  | 2.64  | 2.61  | 2.57  | 2.55  | 2.52  |

L'évolution thermique montre une baisse progressive de la pression d'alimentation, passant de 61,17 bar à 16 °C à 56,32 bar à 28 °C, soit une réduction totale de 7,9 %. Cette tendance est directement liée à la diminution de la viscosité de l'eau avec l'élévation de la température, ce qui améliore la perméabilité membranaire.

Les pertes de charge restent remarquablement stables, variant faiblement entre 0,92 bar et 0,89 bar, avec un coefficient de variation très faible (1,64 %). Cela confirme que le design hydraulique des modules assure une résistance constante, indépendamment des fluctuations thermiques.

Sur le plan énergétique, la consommation spécifique diminue de 2,73 kWh/m³ à 16 °C à 2,52 kWh/m³ à 28 °C, soit un gain global de 7,7 %. Le gradient moyen d'amélioration est estimé à 0,0175 kWh/m³ par degré Celsius, mettant en évidence l'effet bénéfique de la température sur l'efficacité énergétique du procédé.

À 44,6 %, le système reste stable et peu contraignant pour les membranes, mais la consommation d'eau brute demeure importante en raison d'un rejet élevé.

## 9.2 Configuration Intermédiaire – Taux de récupération $Y = 48 \%$

Avec un taux de récupération de 48 %, le système permet d'augmenter le débit de perméat et de réduire légèrement le débit de concentrat. Cette configuration améliore l'efficacité sans modifier profondément le fonctionnement du procédé. En revanche, la pression d'alimentation augmente, et la concentration des sels dans le concentrat s'accroît. Une surveillance renforcée du prétraitement et des paramètres de colmatage est donc nécessaire pour maintenir la fiabilité du système.

**Tableau 26:** Résultats de simulation pour  $Y = 48 \%$  avec logiciel Q+

|                    |           |           |           |           |           |           |           |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Température</b> | <b>16</b> | <b>18</b> | <b>20</b> | <b>22</b> | <b>24</b> | <b>26</b> | <b>28</b> |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|

|                                               |       |       |       |       |       |      |       |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|
| <b>La pression d'alimentation (bar)</b>       | 65.19 | 64.02 | 62.99 | 62.03 | 61.22 | 60.5 | 59.87 |
| <b>La perte de charge (bar)</b>               | 0.88  | 0.87  | 0.87  | 0.86  | 0.85  | 0.85 | 0.84  |
| <b>Énergie spécifique (kWh/m<sup>3</sup>)</b> | 2.82  | 2.77  | 2.73  | 2.69  | 2.65  | 2.62 | 2.52  |

L'augmentation du taux de conversion de 44,6 % à 48 % entraîne une hausse moyenne de la pression d'alimentation de 4,02 bar, soit environ +6 % par rapport à la configuration standard. Cette évolution s'explique par l'élévation de la pression osmotique liée à l'augmentation de la concentration en sels dans le rejet.

En parallèle, une amélioration des pertes de charge est observée avec une diminution moyenne de 4,8 % par rapport au standard. Ce résultat suggère une optimisation hydraulique liée à une meilleure distribution des flux dans les modules.

Sur le plan énergétique, la consommation spécifique augmente en moyenne de 3,8 %. Toutefois, le rapport entre le gain de production d'eau dessalée (7,6 %) et le surcoût énergétique reste très favorable, avec un ratio proche de 2, ce qui indique une optimisation globalement bénéfique.

Le passage à 48 % améliore le débit de perméat produit et réduit le rejet, mais au prix d'une augmentation de la consommation énergétique spécifique.

### 9.3 Configuration Optimisée – Taux de récupération $Y = 50 \%$

À 50 %, la station atteint une meilleure valorisation de l'eau brute, avec un débit de perméat plus élevé et un débit de concentrat plus faible. Cette configuration améliore le rendement hydraulique et réduit les rejets. Cependant, elle entraîne une hausse significative de la pression osmotique et donc de la pression d'alimentation. Les membranes fonctionnent à des charges plus importantes, ce qui exige un contrôle accru des phénomènes d'entartrage et un dosage optimisé des produits antitartres.

**Tableau 27:** Résultats de simulation pour  $Y = 50 \%$  avec logiciel Q+

|                                               |           |           |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Température</b>                            | <b>16</b> | <b>18</b> | <b>20</b> | <b>22</b> | <b>24</b> | <b>26</b> | <b>28</b> |
| <b>La pression d'alimentation (bar)</b>       | 67.72     | 66.5      | 65.43     | 64.47     | 63.62     | 62.87     | 62.2      |
| <b>La perte de charge (bar)</b>               | 0.85      | 0.84      | 0.84      | 0.83      | 0.82      | 0.82      | 0.81      |
| <b>Énergie spécifique (kWh/m<sup>3</sup>)</b> | 2.89      | 2.84      | 2.79      | 2.75      | 2.71      | 2.68      | 2.65      |

L'augmentation du taux de conversion à 50 % entraîne une surpression moyenne de 6,5 bar, soit environ +11 % par rapport à la configuration standard. Chaque point supplémentaire de récupération exige en moyenne 1,35 bar de pression additionnelle.

Les pertes de charge affichent une amélioration significative, avec une réduction de 7,4 % par rapport au standard (0,85 bar à 16 °C et 0,81 bar à 28 °C). Cette stabilité hydraulique suggère une bonne adaptation du design membranaire malgré l'augmentation des contraintes.

Sur le plan énergétique, la consommation spécifique augmente de 5,7 % alors que la production progresse de 12 %, ce qui donne un ratio efficacité/coût de 2,11. Ce résultat met en évidence un point d'équilibre technique particulièrement intéressant pour l'optimisation du procédé.

#### 9.4 Configuration Maximale – Taux de récupération $Y = 52 \%$

Avec un taux de 52 %, le procédé maximise le débit de perméat et réduit fortement le débit de concentrat. Le rendement de récupération est alors très élevé, mais il s'accompagne d'une consommation énergétique spécifique accrue et d'une pression d'alimentation plus importante. Le risque de précipitation des sels peu solubles augmente fortement, ce qui peut accélérer l'entartrage des membranes et compromettre la durabilité du système. Cette configuration n'est donc envisageable qu'avec un prétraitement renforcé et un suivi opérationnel strict.

**Tableau 28:** Résultats de simulation pour  $Y = 52 \%$  avec logiciel Q+

| Température                              | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| La pression d'alimentation (bar)         | 70.45 | 69.14 | 68.02 | 67.03 | 66.15 | 65.36 | 64.67 |
| La perte de charge (bar)                 | 0.82  | 0.82  | 0.81  | 0.8   | 0.8   | 0.79  | 0.78  |
| Énergie spécifique (kWh/m <sup>3</sup> ) | 2.96  | 2.9   | 2.86  | 2.82  | 2.78  | 2.75  | 2.72  |

À 52 %, le système atteint la limite haute des performances avec une surpression moyenne de 9,9 bar, soit +16,7 % par rapport à la configuration standard. Chaque point supplémentaire de récupération exige environ 1,33 bar, valeur légèrement inférieure à celle observée à 50 %.

Les pertes de charge enregistrent une réduction notable de 12,2 % par rapport au standard, variant de 0,82 bar à 16 °C à 0,78 bar à 28 °C. Cette amélioration traduit une optimisation hydraulique maximale, suggérant que le système se rapproche de la limite technique de son design.

Sur le plan énergétique, la consommation spécifique augmente de 8,2 % tandis que la production progresse de 16,6 %. Le ratio efficacité/coût reste supérieur à 2 ( $\approx 2,02$ ), mais légèrement inférieur à celui obtenu avec  $Y = 50 \%$ , ce qui indique un rendement globalement intéressant mais moins équilibré.

Ce scénario maximise le débit de perméat mais impose des pressions très élevées et une consommation d'énergie qui peut compromettre l'efficacité économique et la durabilité des membranes.

### 9.5 Configuration Étendue – Taux de récupération $Y = 54 \%$

Avec un taux de récupération de 54 %, la station atteint un niveau de performance supérieur, mais également des contraintes opérationnelles plus fortes. La pression d'alimentation augmente de manière importante, passant de 73,35 bar à 16 °C à 67,39 bar à 28 °C, soit une baisse de 8,13 % liée à la diminution de la viscosité de l'eau avec l'augmentation de la température. Par rapport à la configuration standard ( $Y = 44,6 \%$ ), la surpression moyenne atteint environ +12,18 bar, soit +19,9 %, ce qui représente une sollicitation importante pour les membranes.

| Température                              | 16    | 18    | 20    | 22    | 24    | 26    | 28    |
|------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| La pression d'alimentation (bar)         | 73.35 | 72.03 | 70.86 | 69.83 | 68.91 | 68.06 | 67.39 |
| La perte de charge (bar)                 | 0.79  | 0.79  | 0.78  | 0.77  | 0.77  | 0.76  | 0.75  |
| Énergie spécifique (kWh/m <sup>3</sup> ) | 3.04  | 2.98  | 2.93  | 2.89  | 2.85  | 2.82  | 2.79  |

Les pertes de charge restent faibles et stables, variant entre 0,79 bar et 0,75 bar, ce qui indique une bonne stabilité hydraulique malgré le débit plus élevé.

Sur le plan énergétique, la consommation spécifique atteint 3,04 kWh/m<sup>3</sup> à 16 °C et diminue jusqu'à 2,79 kWh/m<sup>3</sup> à 28 °C, soit une amélioration de 8,2 % grâce à l'effet de la température sur la perméabilité membranaire. Bien que la consommation reste plus élevée que pour les configurations à 50 % et 52 %, le gain de production d'eau dessalée devient significatif.

Cette configuration montre qu'il est techniquement possible d'augmenter encore le taux de récupération tout en maintenant la stabilité du système. Toutefois, elle nécessite un prétraitement renforcé et un suivi strict de l'entartrage afin de préserver la durée de vie des membranes.

Grâce à cette performance améliorée, la station d'El Marsa serait en mesure de satisfaire les besoins en eau potable prévus à l'horizon 2055, en répondant à la croissance de la demande tout en maintenant une efficacité énergétique acceptable.

### 9.6 Analyse comparative globale

**Tableau 29:** Comparaison des résultats de la simulation avec logiciel Q+

| Taux de conversion (Y)   | Pression d'alimentation                                        | Pertes de charge                      | Consommation énergétique                              | Analyse globale                                                                 |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>44,6 % (standard)</b> | Diminue de 61,17 bar (16 °C) à 56,32 bar (28 °C), soit - 7,9 % | Très stable, 0,92 → 0,89 bar          | Diminue de 2,73 à 2,52 kWh/m <sup>3</sup>             | Configuration équilibrée, consommation modérée mais débit de concentra élevé.   |
| <b>48 %</b>              | Moyenne +4,0 bar par rapport au standard (+6,7 %)              | Réduction de 0,92 → 0,88 bar (-4,8 %) | Augmentation moyenne +3,8 %                           | Gain de production (≈ +7 %) supérieur au coût énergétique, compromis favorable. |
| <b>50 %</b>              | Moyenne +6 à 7 bar par rapport au standard                     | Stable autour de 0,85–0,81 bar        | Augmentation progressive (≈ +6 %)                     | Rendement amélioré mais pression plus élevée                                    |
| <b>52 %</b>              | Très élevée, 70,45 bar (16 °C) → 64,67 bar (28 °C)             | Stable autour de 0,82–0,78 bar        | Consommation maximale, proche de 3 kWh/m <sup>3</sup> | Production maximisée mais coût énergétique                                      |

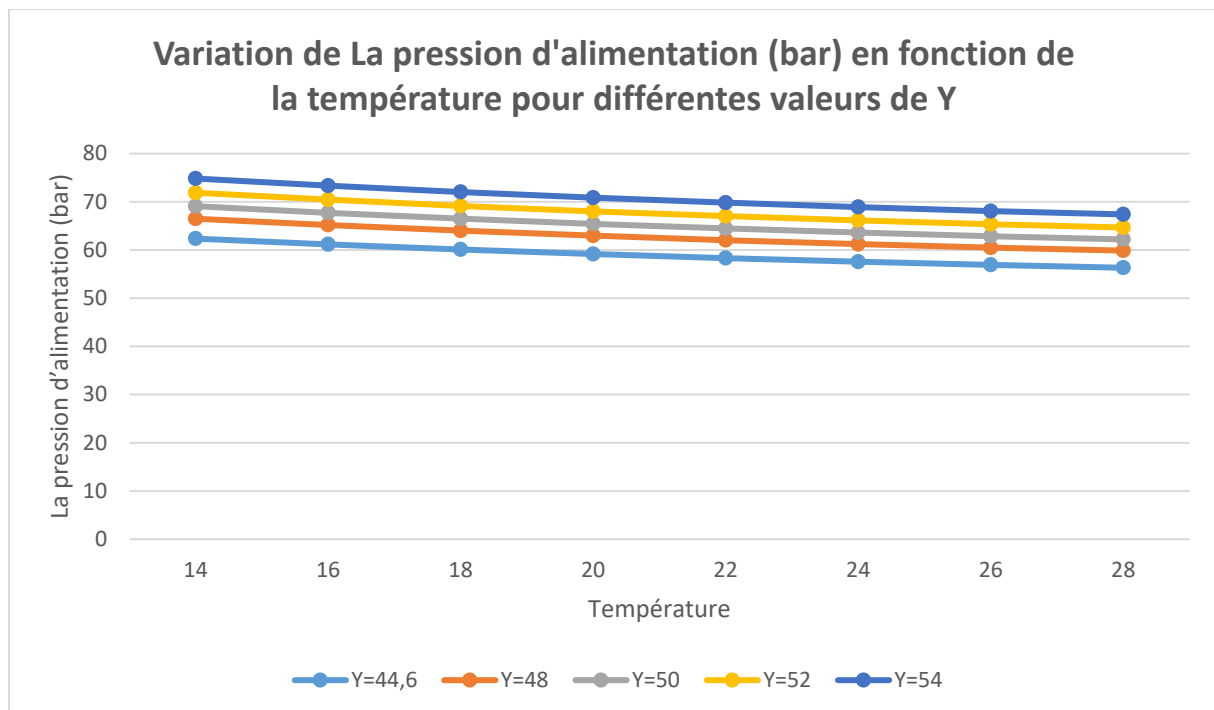


**Figure 36:** Variation de La pression d'alimentation (bar) en fonction de la température pour différentes valeurs de Y

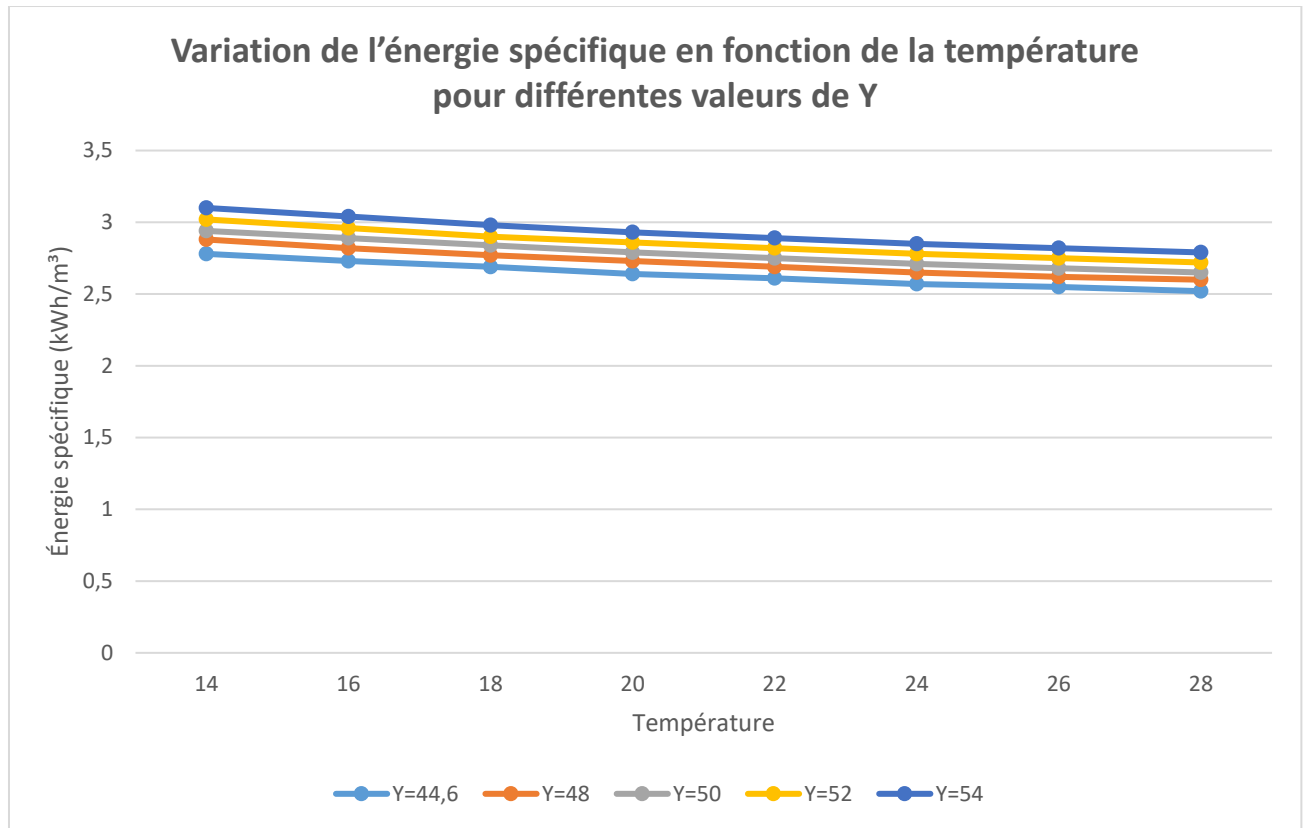


**Figure 37:** Variation de l'énergie spécifique en fonction de la température pour différentes valeurs de Y

- **Influence de la température :** dans tous les scénarios, une augmentation de la température entraîne une baisse de la pression d'alimentation et de la consommation énergétique. Cet effet positif est dû à l'amélioration de la perméabilité membranaire.
- **Influence du taux de récupération :** plus le taux de conversion augmente, plus la pression et l'énergie spécifique s'élèvent. Le compromis se situe entre une meilleure valorisation de l'eau brute et une augmentation des contraintes énergétiques et opérationnelles.
- **Équilibre optimal :** le taux de 45 % reste le plus sûr et le moins coûteux en énergie, tandis que 48 % et 50 % offrent un bon compromis entre production et performance énergétique. Le taux de 52 % apparaît difficile à exploiter en continu sans renforcer le prétraitement et les équipements.

## 9.7 La qualité d'eaux de production

Les résultats de simulation relatifs à la qualité de l'eau produite montrent que le TDS du perméat varie entre 94,54 mg/L et 222,7 mg/L selon la température et le taux de récupération. À 16 °C, les valeurs restent très faibles, proches de 90 mg/L, et diminuent légèrement lorsque le taux de récupération augmente, ce qui traduit une bonne capacité de rejet des membranes.

À 28 °C, le TDS est plus élevé, atteignant environ 220 mg/L, en raison de la baisse du pouvoir de séparation des membranes à température élevée. Néanmoins, même dans ce cas

défavorable, la qualité du perméat demeure excellente et largement conforme aux normes internationales de potabilité, puisque toutes les valeurs obtenues restent inférieures à 550 mg/L,

Ces résultats confirment que la station d'El Marsa assure une production d'eau dessalée de haute qualité, indépendamment des variations saisonnières de température et des scénarios de récupération testés.

**Tableau 30:** Résultats de simulation de TDS avec logiciel Q+

| Température   | 16    | 28     |
|---------------|-------|--------|
| <b>Y=44.6</b> | 94.54 | 222.7  |
| <b>Y=48</b>   | 92.49 | 218.49 |
| <b>Y=50</b>   | 91.74 | 218.49 |
| <b>Y=52</b>   | 91.27 | 216.24 |

- L'augmentation de la température dégrade la qualité du perméat (hausse du TDS), malgré une meilleure perméabilité hydraulique.
- L'augmentation du taux de récupération améliore légèrement la qualité de l'eau produite, mais l'effet reste limité comparé à l'influence de la température.
- Les valeurs obtenues ( $\approx 90\text{--}220$  mg/L) restent largement inférieures aux normes de potabilité de ( $< 550$  mg/L de TDS), ce qui confirme la conformité de l'eau produite pour une consommation humaine.

## 9.8 Efficacité Énergétique :

Dans le cas de la station de dessalement d'El Marsa, qui fonctionne avec cinq racks d'osmose inverse, l'évolution du taux de récupération influence directement le débit de production, la pression d'alimentation et la consommation énergétique spécifique.

**Tableau 31:** le pourcentage d'augmentation de l'énergie spécifique d'Y= 50 par rapport à Y=45

| Température | Y=45% | Y=50% | Augmentation (%) |
|-------------|-------|-------|------------------|
| 14°C        | 2.78  | 2.94  | +5.44%           |
| 16°C        | 2.73  | 2.89  | +5.54%           |

**Tableau 32:** le pourcentage d'augmentation de l'énergie spécifique d'Y= 52 par rapport à Y=45

| Température | Y=45% | Y=52% | Augmentation (%) |
|-------------|-------|-------|------------------|
| 18°C        | 2.69  | 2.90  | +7.24%           |
| 20°C        | 2.64  | 2.86  | +7.69%           |

|      |      |      |        |
|------|------|------|--------|
| 22°C | 2.61 | 2.82 | +7.45% |
| 24°C | 2.57 | 2.78 | +7.55% |
| 26°C | 2.55 | 2.75 | +7.27% |
| 28°C | 2.52 | 2.72 | +7.35% |

Pour une configuration standard à 45 %, la production globale atteint environ 60 000 m<sup>3</sup>/j, avec une consommation spécifique variant de 2,73 à 2,52 kWh/m<sup>3</sup> selon la température.

À 50 %, la production atteint près de 66 667 m<sup>3</sup>/j, soit une augmentation de 12 % par rapport au standard, avec une consommation comprise entre 2,89 et 2,65 kWh/m<sup>3</sup>, soit une hausse de 5,21 %. Représentant le meilleur compromis observé entre productivité et consommation.

Enfin, à 52 %, la production peut approcher 69 333 m<sup>3</sup>/j, soit un gain de 16,6 % par rapport à 45 %, mais la consommation atteint 2,96 à 2,72 kWh/m<sup>3</sup>, correspondant à une hausse de 7.45 %. Bien que le ratio efficacité/coût demeure supérieur à 2, cette configuration impose des pressions élevées et des contraintes opérationnelles importantes, qui limitent son exploitation en continu.

Les résultats obtenus montrent que lorsque la température de l'eau de mer augmente, la pression d'alimentation nécessaire diminue et la consommation énergétique spécifique devient plus faible. Cette tendance est particulièrement favorable durant la période estivale, où la demande en eau potable s'accroît en même temps que la température de la mer.

La station peut ainsi bénéficier de meilleures conditions énergétiques pour augmenter sa production et répondre aux besoins de consommation plus élevés.

L'exploitation de ces résultats ouvre la voie à une stratégie d'optimisation saisonnière, permettant d'ajuster le fonctionnement de la station afin de concilier disponibilité en eau et efficacité énergétique.

## 10 Adaptation du taux de récupération en fonction de la température

L'analyse des résultats de simulation montre qu'il est possible d'adapter le taux de récupération en fonction de la température de l'eau de mer afin d'optimiser le fonctionnement de la station.

Pour des températures basses, comprises entre 14 °C et 16 °C, le taux de récupération de 50 % constitue le choix le plus approprié. À 16 °C, la pression d'alimentation atteint 67,72 bar, l'énergie spécifique est de 2,89 kWh/m<sup>3</sup>, et la production globale s'élève à environ 66 667 m<sup>3</sup>/j, soit un gain notable par rapport à la configuration standard. En revanche, lorsque la température se situe entre 18 °C et 28 °C, l'exploitation à 52 % devient plus avantageuse. À 18 °C, la pression d'alimentation est de 69,14 bar pour une énergie spécifique de 2,90 kWh/m<sup>3</sup>, et la production atteint environ 69 333 m<sup>3</sup>/j. À 28 °C, les conditions sont encore plus favorables, avec une pression réduite à 64,67 bar, une consommation énergétique spécifique de 2,72 kWh/m<sup>3</sup>, et une production maintenue au même niveau, soit près de 69 333 m<sup>3</sup>/j.

Ces résultats confirment que l'adaptation du taux de récupération en fonction de la température permet d'accroître la production d'eau dessalée durant la période estivale, tout en bénéficiant d'une meilleure efficacité énergétique grâce à la baisse de la viscosité de l'eau.

## **11 Bénéfices techniques et opérationnels de l'étude**

Les résultats obtenus à travers cette étude offrent des bénéfices importants pour la gestion et l'optimisation de la station de dessalement d'El Marsa. D'un point de vue technique, ils mettent en évidence l'influence directe de la température et du taux de récupération sur la pression d'alimentation, la consommation énergétique spécifique et le débit de perméat, ce qui permet de mieux comprendre les limites opérationnelles du système.

Sur le plan hydraulique, les configurations à 48 % et 50 % et 52% apparaissent comme des solutions optimisées, car elles augmentent sensiblement la production d'eau dessalée pour vaincre le déficit lors des besoins maximaux et la consommation moyenne journalière à moyenne et long terme tout en maintenant une consommation énergétique relativement maîtrisée. Sur le plan économique, ces résultats contribuent à identifier les conditions dans lesquelles l'augmentation du rendement reste avantageuse par rapport au surcoût énergétique, ce qui aide à réduire les dépenses d'exploitation.

Enfin, sur le plan opérationnel, les simulations constituent un outil précieux pour anticiper les ajustements nécessaires en fonction des variations saisonnières de température, garantissant ainsi une exploitation plus fiable et plus durable de la station.

## **12 Recommandations**

### **Risques et Dégradations :**

- Concentration du rejet plus élevée
- Stress mécanique augmenté

### **Recommandations Opérationnelles :**

- Surveillance renforcée des paramètres de colmatage
- Optimisation du prétraitement pour gérer la polarisation
- Dosage antitartre ajusté pour les nouveaux indices de saturation
- Maintenance préventive renforcée due au stress opérationnel accru
- Monitoring en temps réel des pressions

## **13 Conditions de Faisabilité**

### **13.1 Prérequis Techniques :**

- Amélioration antitartrage : Dosage optimisé pour  $\text{CaF}_2$
- Monitoring renforcé : Surveillance continue des indices
- Procédures CIP : Adaptation des fréquences et produits
- Formation opérateurs : Gestion des nouveaux paramètres

### **13.2 Indicateurs de Performance Critiques**

- LSI concentrat :  $<2,5$  (seuil d'alerte)

- Fréquence CIP : <1/mois par rack
- TDS perméat : <300 mg/L (seuil qualité)
- Perte de charge : <1,0 bar (seuil encrassement)

## **14 Conclusion :**

L'étude de simulation menée avec le logiciel LG Q+ sur la station de dessalement d'El Marsa a permis de mettre en évidence l'influence déterminante de la température de l'eau d'alimentation et du taux de récupération sur les performances globales du procédé d'osmose inverse. Les résultats montrent que l'élévation de la température entraîne une diminution progressive de la pression d'alimentation et de la consommation énergétique spécifique, confirmant l'effet bénéfique de la baisse de viscosité de l'eau sur la perméabilité membranaire.

L'augmentation du taux de récupération améliore le débit de perméat et réduit le volume de concentrat rejeté, ce qui valorise davantage la ressource en eau brute. Toutefois, cette optimisation s'accompagne d'une hausse de la pression osmotique et donc de la consommation énergétique, ainsi que d'un risque accru d'entartrage et de colmatage des membranes. Les résultats comparatifs montrent que la configuration standard à 45 % reste la plus sécurisée, tandis que les scénarios à 48 % et 50 % offrent un bon compromis entre productivité et consommation énergétique. La configuration à 52 % représente une limite technique, exploitable sous certaines conditions de contrôle et de maintenance renforcées.

Ainsi, cette analyse met en avant l'importance de rechercher un équilibre entre efficacité hydraulique, performance énergétique et durabilité opérationnelle. Les enseignements tirés de ces simulations constituent une base solide pour orienter les choix d'optimisation et améliorer la gestion de la station d'El Marsa. Grâce à ces résultats, il est possible d'envisager une augmentation progressive du taux de récupération permettant à la station de satisfaire les besoins en eau potable prévus à l'horizon 2055, tout en maintenant une exploitation durable et économiquement maîtrisée.

# Conclusion générale

## Conclusion générale

À travers ce mémoire, nous avons abordé la problématique de la disponibilité et de la gestion des ressources hydriques en Algérie, en particulier dans la région d'Alger, où la demande en eau potable connaît une croissance soutenue face à une ressource naturelle limitée et vulnérable. Dans un premier temps, nous avons présenté l'état des ressources en eau en Algérie et mis en évidence les déséquilibres existants entre l'offre et la demande. Cette analyse a justifié le recours à des solutions alternatives comme le dessalement de l'eau de mer, devenu une stratégie incontournable pour garantir la sécurité hydrique du pays.

Nous avons ensuite étudié les principales technologies de dessalement, en insistant sur la prédominance de l'osmose inverse, qui allie efficacité, coût réduit et adaptabilité au contexte algérien. L'application pratique a été illustrée à travers la station de dessalement d'El Marsa, dont le fonctionnement et les caractéristiques techniques ont été analysés en détail. L'estimation de l'évolution des besoins en eau a mis en évidence la pression croissante sur cette infrastructure, soulignant la nécessité d'une optimisation continue de ses performances.

Le diagnostic de la station a révélé plusieurs contraintes, notamment les microcoupures électriques, les arrêts fréquents et certaines limites d'exploitation, qui influent sur son rendement global. Pour y remédier, une série de simulations réalisées avec le logiciel LG Q+ a permis d'optimiser les paramètres de fonctionnement. Ces travaux ont permis d'atteindre une production optimale de 60 000 m<sup>3</sup>/j en configuration standard, et de démontrer qu'une augmentation du taux de récupération entre 50 % et 52 % permet d'améliorer la production jusqu'à 69 333 m<sup>3</sup>/j, tout en maîtrisant la consommation énergétique.

Enfin, la configuration étendue à 54 % de taux de récupération a montré qu'il est possible d'atteindre une production encore plus élevée tout en maintenant une stabilité hydraulique et une efficacité énergétique acceptables. Cette performance permettrait à la station de dessalement d'El Marsa de satisfaire les besoins en eau potable prévus à l'horizon 2055, en répondant à l'augmentation continue de la demande tout en assurant une exploitation durable du système.

L'étude de l'impact environnemental du dessalement par osmose inverse a également rappelé que, bien que cette technologie soit une solution durable pour la disponibilité de l'eau potable, elle doit s'accompagner de mesures de réduction des impacts, notamment en matière de rejets salins et de consommation énergétique. Les perspectives futures résident dans l'intégration des énergies renouvelables, l'amélioration des membranes et le développement de systèmes hybrides permettant de réduire les coûts et l'impact écologique, tout en renforçant la sécurité hydrique du pays.

## ***Bibliographie :***

- [1] A. Maurel, Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, 2006.
- [2] P. Danis, « Dessalement de l'eau de mer », Techniques de l'ingénieur, Doc. J2700.
- [3] CultureScience Chimie, « Dessalement », [En ligne]. Disponible sur : <http://www.chimie.ens.fr/dossiers/dessalement>.
- [4] I. S. Park, S. M. Park, J. S. Ha, « Design and application of thermal vapour compressor for multi-effect desalination plant », 2005.
- [5] M. G. Marcovecchio, S. F. Mussati, P. A. Aguirre, N. J. Scenna, « Optimization of hybrid desalination processes including multi stage flash and reverse osmosis systems », Desalination, , 2005.
- [6] P. Fiorini, E. Sciubba, « Thermoeconomic analysis of a MSF desalination plant », 2005.
- [7] V. Renaudin, Le dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres, CNRS, Nancy, 2003.
- [8] K. Z. Al-Subaie, « Precise way to select a desalination technology », 2007.
- [9] SDEM, Manuel d'exploitation et maintenance – El Marsa.
- [10] « Dessaler l'eau nuit encore trop à l'environnement », [En ligne]. Disponible sur : <http://www.ecolife.fr>.
- [11] S. Lattemann, Le dessalement est-il écologique ? [En ligne]. Disponible sur : [www.larecherche.fr](http://www.larecherche.fr)
- [12] A. Rezig, « Comparaison technico-économique entre l'osmose inverse et l'électrodialyse dans la déminéralisation des eaux saumâtres », Mémoire ENSH de Blida, 2008.
- [13] M. Bessenasse, A. Guendouz, Algérie Équipement, n° 50.
- [14] A. Bisonnette, « Utilisation de nanomembranes pour le dessalement de l'eau et comparaison avec l'osmose inverse et la distillation », Université de Sherbrooke, janv. 2008.
- [15] Wikipédia, [En ligne]. Disponible sur : <http://www.wikipedia.com>.
- [16] G. Mutin, L'eau dans le monde arabe : enjeux et conflits, Paris : Éditions Ellipses, 2000.
- [17] ANRH, Bilan des ressources en eau en Algérie, 2005.
- [18] ADE, [En ligne]. Disponible sur : <http://www.ade.dz>.
- [19] Wikipedia, [En ligne].
- [20] « A State-of-the-Art Review », Cronfa, Swansea University.
- [21] European Union, Desalination – EU Blue Economy Observatory.

[22] Energy Requirements of Desalination Processes, Desware.

[23] Ministère de l'Énergie, Algérie, « Projet de dessalement de l'eau de mer », 2024.

[24] Agence Ecofin, « L'Algérie envisage la construction de stations mobiles de dessalement de l'eau de mer ». 2023.

[25] Radio Algérienne, « Dessalement d'eau de mer : 2 projets de grandes stations à El Tarf et Zeralda sont à l'étude », 24 déc. 2017.