الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محند أولحاج
- البويرة -
معهد التكنولوجيا

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Institut de Technologie



Département de Génie de l'Eau

Rapport de soutenance

En vue de l'obtention du diplôme de Licence professionnel en :

Hydraulique

Thème

Colmatage membranaire de la station dessalement par osmose inverse d'El Marsa, wilaya d'Alger

Réalisée par :

- **BEN YOUCEF SMAIL**
- **BEN KHEMMOU AMAYES**
- **TANSAOUT TARIK**

Encadré par :

- **Mme BALOUL Djouhra**

Année Universitaire : 2025/2026

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محند أولحاج
- البويرة -
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
ⵜⴰⵙⴷⴰⵡⵉⵜ ⴰⴽⵍⵉ ⵎⵓⵃⴻⵏⴷ ⵓⵍⵃⴰⵊ - ⵜⵓⴱⵉⵔⴻⵜ -

Spécialité : Génie de l'eau

Institut de Technologie

Autorisation de déposer un mémoire de Master / Licence pour soutenance

Je soussigné, l'enseignant (e) :
Baloul Djouhra
L'encadreur du mémoire de fin d'études des étudiants :

- **BEN YOUCEF SMAIL**
- **BEN KHEMMOU AMAYES**
- **TANSAOUT TARIK**

Ayant le mémoire de fin d'études de Master /Licence Intitulé :

Colmatage membranaire de la station dessalement par osmose inverse d'El Marsa, wilaya d'Alger

Promotion : **20**25/ **2026**

Et après voir et consulté le mémoire dans sa forme finale j'autorise les étudiants à l'imprimer et la déposer pour la soutenance.

Bouira le : 25/06/2026.

Signature du L'encadreur ***Signature du chef de département***



Résumé

Ce rapport présente l'étude du colmatage membranaire dans le procédé d'osmose inverse au niveau de la station de dessalement d'El Marsa à Alger. Il décrit le fonctionnement global de la station, depuis le captage de l'eau de mer jusqu'à la production d'eau potable conforme aux normes de qualité. Une attention particulière est accordée aux membranes d'osmose inverse, élément essentiel du processus de dessalement. L'étude met en évidence les différents types de colmatage : minéral, biologique et microbiologique. Elle analyse également l'influence de plusieurs paramètres tels que la température, le pH et la pression sur l'apparition et l'évolution du colmatage. Les conséquences observées concernent la diminution du rendement, l'augmentation de la consommation énergétique et la dégradation de la qualité de l'eau produite. Des analyses physico-chimiques réalisées sur différents racks ont permis d'évaluer les performances du système et de détecter d'éventuelles anomalies. Pour limiter ces problèmes, plusieurs méthodes préventives et curatives ont été présentées, notamment l'utilisation d'anti-scalants, de biocides et les nettoyages chimiques CIP. Le rapport aborde également les techniques de diagnostic telles que le mapping et le probing pour identifier les défauts des membranes. Enfin, des solutions innovantes comme les membranes biomimétiques et autonettoyantes sont proposées afin d'améliorer la durabilité et l'efficacité des installations de dessalement.

Mots-clés : *Station de dessalement d'El Marsa, osmose inverse, dessalement de l'eau de mer, colmatage membranaire, analyse des performances.*

SUMMARY

This report presents a study of membrane fouling in the reverse osmosis process at the El Marsa desalination plant in Algiers. It describes the overall operation of the plant, from seawater intake to the production of drinking water that meets quality standards. Particular attention is paid to the reverse osmosis membranes, an essential component of the desalination process. The study highlights the different types of fouling: mineral, biological, and microbiological. It also analyzes the influence of several parameters, such as temperature, pH, and pressure, on the onset and progression of fouling. The observed consequences include decreased efficiency, increased energy consumption, and a decline in the quality of the produced water. Physicochemical analyses performed on various racks were used to evaluate the system's performance and detect any anomalies. To mitigate these problems, several preventive and curative methods were presented, including the use of anti-scalant, biocides, and CIP chemical cleaning. The report also addresses diagnostic techniques such as mapping and probing to identify membrane defects. Finally, innovative solutions such as

biomimetic and self-cleaning membranes are proposed to improve the durability and efficiency of desalination plants.
Keywords: *El Marsa desalination plant, reverse osmosis, seawater desalination, membrane fouling, performance analysis*.

ملخص

يقدم هذا التقرير دراسةً حول تلوث الأغشية في عملية التناضح العكسي بمحطة تحلية المياه في المرسى بالجزائر العاصمة. ويصف التقرير التشغيل العام للمحطة، بدءًا من سحب مياه البحر وصولًا إلى إنتاج مياه شرب مطابقة لمعايير الجودة. ويولي التقرير اهتمامًا خاصًا لأغشية التناضح العكسي، باعتبارها عنصرًا أساسيًا في عملية التحلية. وتسلط الدراسة الضوء على أنواع التلوث المختلفة: المعدني والبيولوجي والميكروبيولوجي. كما تحلل تأثير عدة عوامل، مثل درجة الحرارة ودرجة الحموضة والضغط، على بدء التلوث وتطوره. وتشمل النتائج الملحوظة انخفاض الكفاءة، وزيادة استهلاك الطاقة، وتراجع جودة المياه المنتجة. وقد استُخدمت تحليلات فيزيائية وكيميائية أُجريت على وحدات مختلفة لتقييم أداء النظام والكشف عن أي خلل. وللتخفيف من هذه المشاكل، عُرضت عدة طرق وقائية وعلاجية، بما في ذلك استخدام مواد مانعة للترسبات، ومبيدات حيوية، ويتناول التقرير أيضًا تقنيات التشخيص، مثل رسم الخرائط والفحص، (CIP) والتنظيف الكيميائي في الموقع لتحديد عيوب الأغشية. وأخيراً، تم اقتراح حلول مبتكرة مثل الأغشية المحكية للأنظمة الحيوية والأغشية ذاتية التنظيف لتحسين متانة وكفاءة محطات تحلية المياه.

الكلمات المفتاحية :محطة تحلية المرسى، التناضح العكسي، تحلية مياه البحر، انسداد الأغشية، تحليل الأداء

Table des matières

Introduction générale.....**Error! Bookmark not defined.**
Introduction générale.....8
CHAPITRE I: Généralités sur le dessalement et le fonctionnement de la station.....10
I-1 Introduction.....11
I-2 Présentation de la station d'El Marsa.....11
I-2-1 historique et contexte du projet.....11
I-2-2 Localisation géographique de la station de dessalement d'el marssa.....12
I-3 Étapes de dessalement d'eau de mer au niveau de la station d'El Marsa.....13
I-3-1 Captage.....14
I-3-2 Le pré -traitement.....16
I-3-2-1 Coagulation et floculation.....16
I-3-3 Filtration.....18
I-3-4 Osmose inverse.....19
I-3-5 Reminéralisassions.....20
I-3-6 Les équipements et ouvrages annexes de la station de dessalement d'El Marsa.....20
I-4 Conclusion.....23
Chapitre II: Phénomène de colmatage et son impact sur les performances de la station d'El Marsa.....24
II-1 Introduction.....25
II-2 Différents types de colmatage.....25
II-2-1 Le colmatage minéral.....25
II-2-2 Colmatage biologique.....26
II-2-3 Le colmatage microbiologique.....26
II-3 Les paramètres influencent le colmatage.....27
II-3-1 La Température (T).....27
II-3-2 Le Potentiel Hydrogène (pH).....28
II-3-3 La Pression (P).....28
II-4 Impacts sur les performances.....29
II-4-1 Chute du débit de production (Le rendement).....29
II-4-2 Augmentation de la consommation énergétique.....29
II-4-3 Dégradation de la qualité de l'eau (Sélectivité).....30
II-4-4 Réduction de la durée de vie des équipements.....30
II-4-5 Surcoût lié aux produits chimiques et à la maintenance.....31
II-4-6 Augmentation de la consommation énergétique et de la pression différentielle.....31
II-4-7 Dégradation de la sélectivité et de la durée de vie des membranes.....31
II-4-7-2 Les causes principales.....31
II-4-7-3 Réduction de la Durée de Vie des Membranes.....32
I-5 Conclusion.....33
Chapitre III: Maintenance et contrôle de l'encrassement des membranes d'osmose inverse.....34
III-1 Introduction.....35
III-2 Traitement chimique préventif.....35
III-2-1 Les Anti-scalants (Anti-incrustants).....35
III-2-1-2 Mécanisme d'action.....35

1. Inhibition de seuil 35
2. Modification cristalline 35
3. Dispersion 35
III-2-1-3 Avantages 35
III-2-2 Les Biocides 36
III-2-2-1 Mode d'application 36
1. Injection en choc (Curatif/Préventif ponctuel) 36
2. Injection continu (Préventif strict) 36
III-3 Méthodes de diagnostic des membranes 36
III-3-1 Le mapping 36
III-3-2 Le Probing (Sondage) 37
III-3-2-1 Méthode de mesure 37
III-4 Nettoyage chimique des membranes (CIP) 37
III-4-1 Les étapes du cycle CIP 37
III-4-1-1 Prérinçage 37
III-4-1-2 Lavage Alcalin (pH élevé : 10 - 12) 37
III-4-1-3 Lavage Acide (pH bas : 2 - 4) 37
III-4-1-4 Rinçage intermédiaire 38
III-4-1-5 Désinfection (Optionnel) 38
III-4-1-6 Rinçage final 38
IV- Conclusion 38
Chapitre IV : Matériels et méthodes 39
IV-1 Introduction 40
IV-2 Prélèvement des échantillons 40
IV-3 Mode opératoire 41
IV-3-1 Matériels et équipements de mesure 41
Chapitre V: Résultats 43
V-1 Introduction 44
V-2 Résultats des analyses 44
V-3 Analyse comparative 46
V-3-1 Evolution du pH 46
V-3-2 Evolution de conductivité 46
V-3-3 Evolution de la turbidité 48
V-3-4 Evolution de conductivité 48
V.4 Contrôle de la qualité de l'anti-scalant 49
V.4.1 Résultats de l'analyse 50
V.5 Diagnostic des performances des membranes par mesure de conductivité 50
V.6 Conclusion 52
Conclusion 53
Bibliographie 54

Liste des figures

Figure II 1 Colmatage minérale de la membrane **25**
Figure II 2 Membrane colmatée biologiquement **26**
Figure II 3 Membrane colmate microbiologiquement **27**
Figure II 4 Evolution de la conductivité du tube de pression en fonction de la position de l'élément membranaire [16] **30**

Figure IV 1 point de prélèvement' échantillon du filtre a cartouche **40**
Figure V. 1 Description des points d'échantillonnage 44
Figure V. 2 Résultats des analyses du 10/02/2026 ..... **44**
Figure V. 3 Evolution du Ph **46**
Figure V. 4 Evolution de la conductivité **47**
Figure V. 4 Evolution de TDS **49**
Figure V. 5 Résultats de l'analyse de l'anti-scalant du 10/02/2026 ..... **50**
Figure V. 6 Tube dont les performances sont normales **51**
Figure V. 7 Tube dont les performances sont anormales **52**

Liste des tableaux

Tableau. I. 1 Données technique de la station [2] **12**
Tableau. I. 2. Valeurs requises par la station **12**
Tableau. I 3 Débits de conception de l'osmose inverse de la station d'El Marsa [1,5] **20**

Tableau II 1 Effet des paramètres sur le colmatage **29**

Tableau IV 1Synthèse des protocoles de mesure des paramètres physico-chimiques de l'eau (pH, conductivité électrique, TDS et turbidité). **42**

Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.

Introduction générale

Le stage de fin de cycle de licence constitue une étape essentielle dans le parcours universitaire, puisqu'il offre aux étudiants l'opportunité de mettre en pratique les connaissances théoriques acquises durant leur formation académique et de se confronter aux réalités du milieu professionnel.

Dans le cadre de notre stage effectué au sein de la station de dessalement d'El Marsa à Alger, nous avons eu l'occasion d'observer le fonctionnement quotidien de l'installation et de comprendre les différents procédés mis en œuvre pour la production d'eau dessalée. Cette expérience nous a également permis d'appréhender les principaux défis techniques liés à l'exploitation des unités de dessalement, notamment le phénomène de colmatage des membranes d'osmose inverse.

Le colmatage des membranes d'osmose inverse (OI) est l'un des principaux obstacles à l'efficacité et à la durabilité des procédés de dessalement et de traitement de l'eau. Ce phénomène, causé par l'accumulation de matières organiques, inorganiques, colloïdales et biologiques sur ou dans les membranes, entraîne une diminution du flux, une augmentation de la pression opérationnelle, une réduction de la durée de vie des membranes et une hausse des coûts d'exploitation [1]. Les mécanismes du colmatage sont complexes et dépendent fortement de la qualité de l'eau d'alimentation, des conditions opératoires et des propriétés physico-chimiques des membranes [2]. Les stratégies d'atténuation incluent le prétraitement (coagulation, ultrafiltration), le nettoyage physique ou chimique, ainsi que le développement de membranes antifouling. Malgré les avancées récentes en modélisation et en matériaux membranaires, le colmatage reste un défi majeur pour l'OI.

Ce stage nous a été bénéfique non seulement techniquement mais aussi professionnellement. Nous avons acquis de nouvelles compétences techniques, nous avons appris de nouvelles informations en matière de dessalement de l'eau et avons également amélioré notre savoir-faire grâce à l'expérience professionnelle acquise dans le milieu du dessalement de l'eau

À travers ce rapport, nous allons évoquer les diverses phases de notre intégration dans cette station de dessalement, les différents processus rencontrés mais aussi l'importance d'une gestion sérieuse de cette station.

Nous avions par conséquent l'opportunité de mettre à profit nos

compétences techniques, d'apprendre de nouvelles compétences professionnelles et d'améliorer notre savoir-faire dans ce domaine.

Le présent rapport est structuré comme suit :

respecter le format c'est à dire ecrire avec le même format

Introduction générale
Chapitre I : Généralités sur le dessalement et le fonctionnement de la station
Chapitre II : Phénomène de colmatage et son impact sur les performances de la station d'El Marsa
Chapitre III : Maintenance et contrôle de l'encrassement des membranes d'osmose inverse
Chapitre IV: Matériels et méthodes
Chapitre V: Résultats
Conclusion

CHAPITRE I: Généralités sur le dessalement et le fonctionnement de la station

I-1 Introduction

La station de dessalement d'El Marsa d'Alger, mise en service en 2022, constitue l'une des infrastructures stratégiques destinées à renforcer l'alimentation en eau potable de la région d'Alger. Cette station a pour principal objectif le traitement et le dessalement des eaux marines captées au niveau de la région d'Aïn Taya afin de répondre aux besoins croissants en ressources hydriques.

Face à la rareté des ressources en eau conventionnelles et à l'augmentation de la demande en eau potable, le dessalement de l'eau de mer représente aujourd'hui une solution technologique indispensable. Le procédé adopté au sein de la station repose principalement sur la technique de l'osmose inverse, reconnue pour son efficacité dans l'élimination des sels dissous et des impuretés présents dans l'eau de mer.

L'obtention d'une eau conforme aux normes de potabilité nécessite la mise en œuvre d'un ensemble d'étapes successives et complémentaires, allant du captage de l'eau brute jusqu'au traitement final de l'eau produite. Chaque étape du procédé joue un rôle essentiel dans l'optimisation des performances de la station, la protection des équipements et la garantie de la qualité de l'eau distribuée.

Dans ce chapitre, nous présenterons la station de dessalement d'El Marsa ainsi que les différentes étapes du processus de dessalement adoptées au sein de l'installation. Nous décrirons également les principaux équipements utilisés et leur rôle dans la production d'une eau potable répondant aux exigences techniques et sanitaires.

I-2 Présentation de la station d'El Marsa

I-2-1 historique et contexte du projet

Le tableau.I.1 présente les principales caractéristiques techniques de la station de dessalement d'eau de mer d'El Marsa. Il synthétise les données essentielles relatives à la capacité de production, à la localisation, aux infrastructures ainsi qu'aux acteurs impliqués dans la réalisation et l'exploitation du projet. Ces informations permettent de situer l'importance stratégique de l'installation et de mieux comprendre le cadre général dans lequel s'inscrit notre stage. *respecter l'interligne*

Tableau. I. 1 Données technique de la station [2]. a la fin de titre mettre un point

PROJET	USINE DE DESSALMENT D'EAU DE MER EL MARSA (WILAYA D'ALGER)
Capacite	60 000 m^3/j
Localisation	Commune d'El Marssa (Wilaya d'Alger)
Terrain d'assiette de la station	05 Hectares
Technologie utilisée	Osmose Inverse (RO)
Maître ouvrage	Algerian Energy Company (AEC Spa)
Maître d'œuvre	COSIDER Canalisations
Organisme de Contrôle	Organisme national de Contrôle Technique de la construction Hydraulique (CTH)
Date de mise en service	14 octobre 2022
Nombre de racks	05 racks

L'objectif principal du processus de dessalement de l'eau de mer est la production de 60000 m³/j d'eau potable d'une qualité conforme aux directives de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et aux normes algériennes en vigueur pour l'eau potable qui sont mentionnés dans le tableau I .2.

Tableau. I. 2. Valeurs requises par la station .

a la fin de titre mettre un point

Valeur du pH	7 < PH < 8.5
Alcalinité max	67 ppm en tant que $CaCO_3$
Dureté totale	50 < Dureté total < 75 mg/l
Concentration du total des solides dissous (TDS)	150 < TDS < 500 mg/l

I-2-2 Localisation géographique de la station de dessalement d'El Marssa

La station de dessalement est stratégiquement située dans l'EST de la wilaya d'Alger à la commune d'El Marsa offrant un accès facile à l'eau de mer

nécessaire au processus de dessalement. Son emplacement permet de fournir de l'eau potable aux zones environnantes [3].

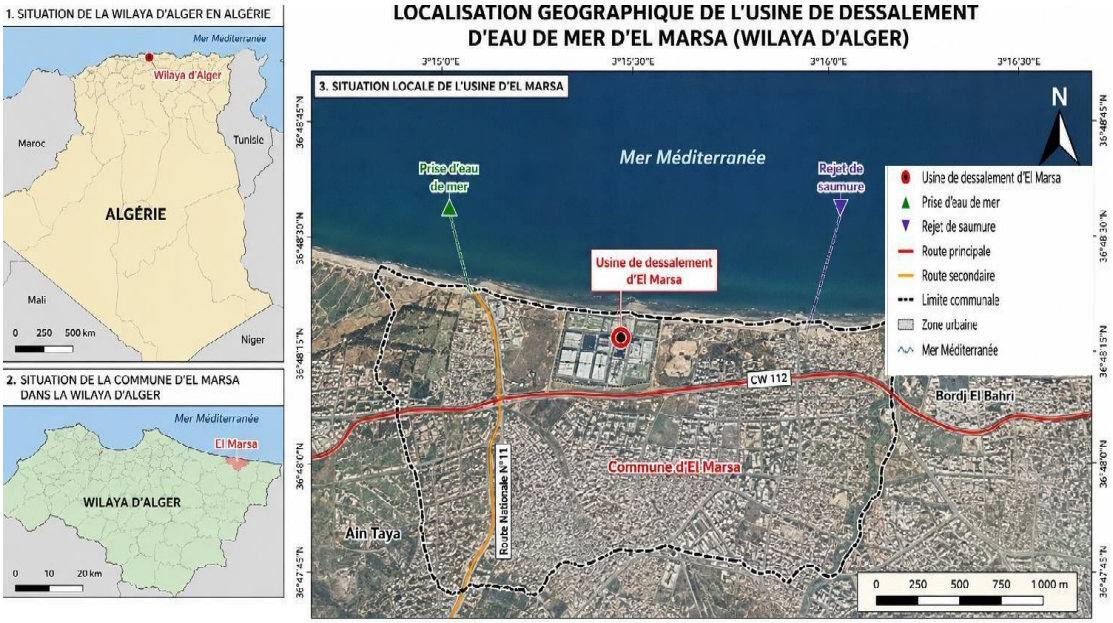

Figure I-1 Localisation géographique de la station de dessalement d'El Marssa .

a la fin de titre mettre un point

I-3 Étapes de dessalement d'eau de mer au niveau de la station d'El Marsa

respetcer l'interligne dans les titres

Afin d'assurer une eau potable, l'eau de mer traverse plusieurs étapes successives (figure I .2), à savoir le prétraitement de l'eau de mer pour éliminer les impuretés susceptibles d'endommager les membranes, la mise sous haute pression de l'eau prétraitée, la séparation de l'eau dessalée et de la saumure au niveau des membranes d'osmose inverse, puis le post-traitement du perméat afin de garantir sa conformité aux normes de qualité requises. Enfin, un système de récupération d'énergie permet de valoriser l'énergie résiduelle du concentrat et d'améliorer l'efficacité énergétique globale de l'installation.

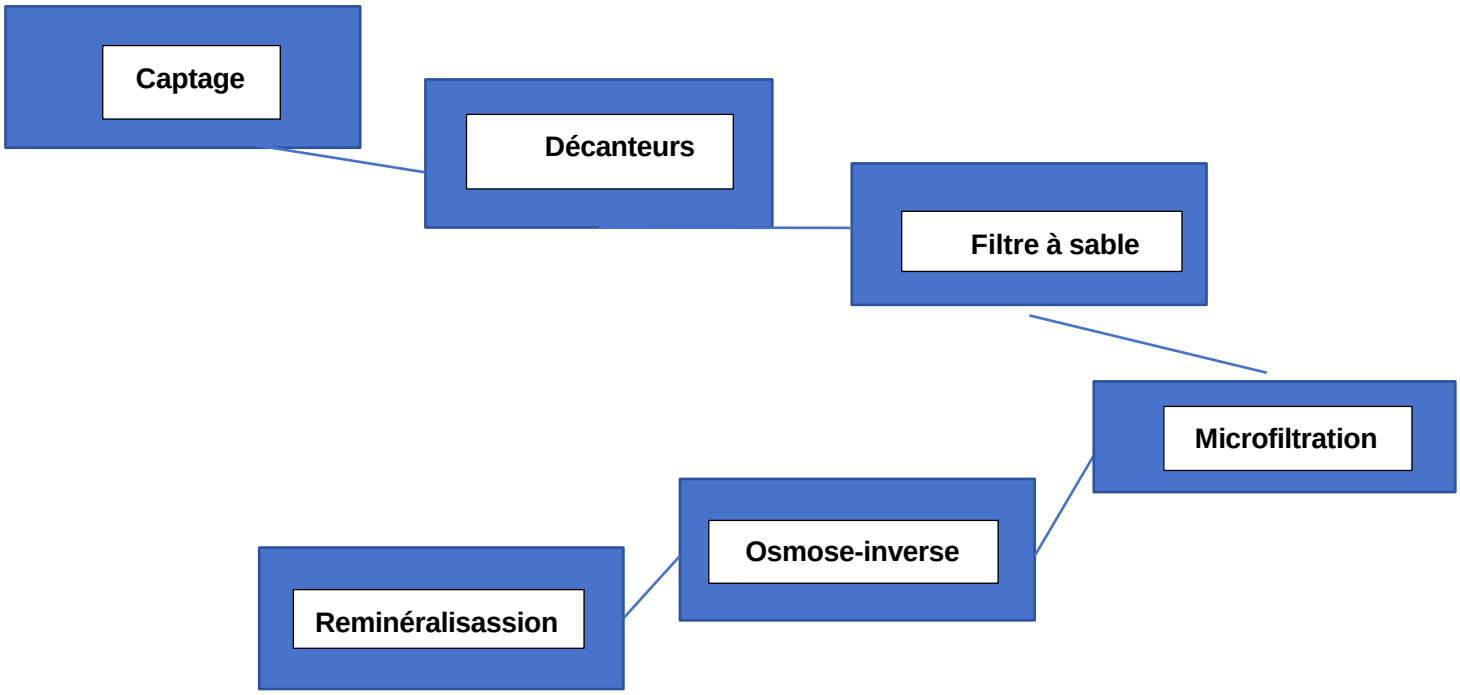

Figure I -2 Etapes de traitement au niveau de la station El Marsa

I-3-1 Captage

I-3-1-1 Pompage de l'eau de mer

Le pompage de l'eau se fait gravitaire ment de la station de captage situer au milieu de la mer a la station (plus exactement au niveau des dégrilleurs).

I-3-1-2 Dégrillage grossier

L'objectif du dégrillage grossier est d'éliminer les ordures, les débris et les déchets plus volumineux apportés par l'eau de mer entrant par la prise d'eau ouverte. Chaque dé grilleur est dimensionné pour 100% du débit de conception max. Cela permet un dégrillage grossier continu et non perturbé en cas de travaux de maintenance ou de réparation effectués sur un dé grilleur.



Figure I-3 dégrilleur grossier

I-3-1-3 Dégrillage fin

L'objectif du dégrillage fin est d'éliminer tous les solides dans l'eau de mer dont la taille dépasse 3 mm Cette mesure assure une protection importante de tous les équipements donne les membranes dans l'osmose inverse, pour éviter tous les risques de colmatage. Le dégrillage fin est effectué à l'aide de deux dés grilleurs de même conception et de même taille, chaque dé grilleur étant capable de travailler à 100 % du débit de conception



Figure I. 4 Dégrilleur fin

I-5-1-4 Pompes de relevage d’eau de mer :

Il y a quatre pompes de relevage d'eau de mer de même conception et de même taille, trois pompes de service et une pompe de secours. Les pompes sont de type centrifuge vertical, équipées de raccords de procès en ligne. Chaque pompe a un tuyau d'aspiration vertical, dont le bord d'entrée est placé à une profondeur suffisante (pour éviter l'entrée d'air et la cavitation) sous le niveau d'eau minimum du puisard de la pompe. Les pompes sont dimensionnées individuellement pour un débit de 1900 m^3/h à une hauteur manométrique totale de 50 m.



Figure I.-5 Pompes centrifuges de relevage d’eau de mer

I-3-2 Le pré -traitement

I-3-2-1 Coagulation et floculation

METTRE ICI UN ESPACE

I-3-2-1-1 Coagulation

La coagulation est une étape du processus dont les principaux objectifs sont la déstabilisation des liaisons ioniques des espèces dans l'eau de mer entrante, l'augmentation de la vitesse des particules en suspension et l'intensification des collisions entre particules. En conséquence, des flocons initiaux de matières en suspension se forment. La coagulation est un processus assisté chimiquement, avec du chlorure ferrique ($FeCl_3$) comme coagulant.



Figure I. 6 Pompe doseuses du coagulant.

I-3-2-1-2 Floculation

L'objectif principal de la floculation est l'agglomération des particules coagulées et la formation de macro flocons qui sont plus faciles

À éliminer dans les étapes suivantes. La floculation est également assistée chimiquement ; une solution de polymère cationique est injectée comme floculant.



Figure I.7 Pompe doseuse du polymère

I-3-3 Filtration

I-3-3-1 Filtre à sable

L'objectif principal de la filtration en profondeur à travers le milieu granulaire est l'élimination des plus grosses matières en suspension et des particules grossières de taille supérieure à 30/40 µm de ce qui reste dans l'eau clarifiée. La série de filtres à gravité à double couche (DMGF) comprend cinq unités de taille et de conception égales.

I-3-3-2 Bac de filtrat

Le bac de réception du filtrat est une structure couverte en béton armé, située à côté et en dessous des filtres DMG. L'objectif principal du bac est d'assurer des conditions de service stables et uniformes pour les pompes de transfert de filtrat reliées [4].

I-3-3-4 Filtres à cartouches

Avant d'atteindre les pompes HP d'OI, le filtrat des DMPF passe par une série

de 6 filtres à cartouche. Les filtres sont disposés en parallèle, et ils sont dimensionnés de façons que si un filtre ne fonctionne pas, les autres unités peuvent reprendre le plein débit d'entrée sans interrompre le processus.

I-3-4 Osmose inverse

L'étape d'osmose inverse (OI) est cruciale pour le processus de dessalement de l'eau de mer [1]. Son principal objectif est de minimiser la concentration de solides dissous dans l'eau de mer filtrée et de produire un permet au débit et à la qualité spécifiés. L'efficacité et les performances de l'étape d'OI influencent directement la taille de toutes les autres phases de traitement en amont et en aval.

Le système d'OI est conçu pour traiter l'eau de mer avec une concentration totale de solides dissous (TDS) d'environ 40300 mg/l. Il convient de noter que cette valeur est supérieure à la concentration réelle en TSS, qui est de l'ordre de 37500 38000 mg/l, ce qui contribue à la fiabilité et à la stabilité à long terme de la conception. Le système d'OI est configuré en un seul passage et une seule étape avec un taux de récupération du permet constant (efficacité) de 45% sur toute la gamme de températures de l'eau de mer (14 à 30°C).



Figure I-8 Membrane d'osmose inverse

Les débits de conception sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau. I 3 Débits de conception de l'osmose inverse de la station d'El Marsa [1,5]

Alimentation (total)	5555,6 m³/h (133333,3 m³/j)
Alimentation (par ligne)	1111,1 m³/h (26666,7 m³/j)
Perméat (total)	2500 m³/h (60000 m³/j)
Perméat (par ligne)	500 m³/h (12000 m³/j)
Saumure d'OI(total)	3055,6 m³/h (73333,3 m³/j)
Saumure d'OI (par ligne)	611,1 m³/h (14666,4 m³/j)

I-3-5 Reminéralisassions

En raison de la très faible concentration de minéraux importants, le per méat produit par le dessalement de l'eau de mer au moyen de la technologie des membranes d'OI n'est pas directement consommable. En outre, le per méat d'OI a un potentiel corrosif élevé en raison de son faible pH et de sa très faible alcalinité, ce qui limite considérablement la possibilité de le manipuler et de le transporter. La ré-minéralisation est l'aspect fondamental et le principal objectif du post-traitement de l'eau de mer dessalée. Les deux méthodes les plus utilises au niveau de la station de dessalement de ré-minéralisation de l'eau de mer dessalée sont les suivantes :

- addition de dioxyde de carbone, CO_2 et de carbonate de calcium, $CaCO_3$
- addition de CO_2 et de chaux, $Ca(OH)_2$.

I-3-6 Les équipements et ouvrages annexes de la station de dessalement d'El Marsa

Au-delà du procédé de dessalement proprement dit, le fonctionnement de la station d'El Marsa repose sur un ensemble d'ouvrages et d'équipements complémentaires assurant la prise d'eau de mer, le prétraitement, le dessalement, le post-traitement, le stockage ainsi que le rejet des saumures. Cette section présente les principales infrastructures constituant la station et leur rôle dans la chaîne de production de l'eau dessalée.

I-3-6-1 Laboratoire d'analyse

Le laboratoire d'analyse est un espace dédier a analysé les paramètres physico-chimiques pour le but de contrôler la qualité de l'eau traitée, cela est assuré par un

suivie journalier qui permet très souvent de remarquer un problème dans la station ou même un colmatage au niveau des membranes, et cela en remarquent une augmentation des paramètres suivant :

-La conductivité

-le pHpH

-la pression

I-3-6-2 Les appareilles de mesure

Les appareilles de mesure ont pour rôles de mesurer tous type de paramètre physico-chimique, et il existe au sein de cette station (d'El Marsa) deux type d'appareilles :

I-3-6-2-1 Les appareilles de mesure fixe

Ils sont directement installés au niveau de la station, ce qui facilite la prise d'information et permet d'avoir une mesure constante des paramètres



Figure I. 9 Appareilles de mesures fixe

I-3-6-2-2 Les appareilles portables

On les retrouve généralement directement au niveau du laboratoire, pour faciliter les mesures et le déplacement grâce à leur petite taille, elles sont set généralement pour les analyses quotidiennes de l'eau.

Pourquoi ce vide ?



Figure I. 10 Appareille de mesure de la conductivité

I-3-6-3 Les pompes PX

pourquoi ce vide

Dans le procédé d'osmose inverse, l'eau de mer est pressurisée à de très hautes pressions (souvent entre 60 et 80 bars) pour traverser les membranes. Une fois le sel filtré, il reste un flux de saumure (eau très concentrée en sel) qui sort du système en conservant la quasi-totalité de cette haute pression et c'est là qu'on aura besoin des pompe PX car elle récupère la pression hydraulique de la saumure rejetée et transfère directement cette énergie mécanique à l'eau de mer brute qui entre dans le système. Et grâce à cela on économise environ 60% d'énergie électrique.



Figure I. 11 Pompe échangeuse de pression (PX)

I-4 Conclusion

Le chapitre a permis de mettre en lumière l'organisation rigoureuse et la complexité technique de la station de dessalement d'El Marsa. De la phase initiale de captage en mer jusqu'à l'étape finale de ré-minéralisation, chaque procédé est dimensionné pour garantir une production journalière stable de 60 000 m^3 /j d'eau potable, conforme aux exigences sanitaires nationales et internationales.

Le cœur de cette performance repose sur la technologie de l'osmose inverse, soutenue en amont par un système de prétraitement et de filtration multicouche indispensable pour protéger les membranes. De plus, l'intégration d'équipements de pointe, tels que les récupérateurs d'énergie PX permettant de réduire de 60 % la consommation électrique, ou le suivi analytique constant en laboratoire, témoigne de la recherche d'une efficacité à la fois économique et qualitative.

Cependant, la durabilité et le rendement optimal de ce processus global dépendent intrinsèquement de l'intégrité des membranes d'osmose inverse. Comme le suggèrent les outils de mesure et le suivi quotidien des paramètres de conductivité et de pression, ces structures filtrantes font face à une menace opérationnelle majeure. C'est précisément cette problématique qui sera développée dans le chapitre suivant, dédié à l'étude approfondie du phénomène de colmatage et de ses différentes manifestations.

Chapitre II: Phénomène de colmatage et son impact sur les performances de la station d'El Marsa

II-1 Introduction

Le colmatage est un phénomène physico-chimique ou biologique complexe qui se traduit par l'obstruction progressive des pores d'un milieu filtrant ou d'une surface d'échange. Ce processus réduit la perméabilité du système et entraîne une diminution de l'efficacité des transferts de fluides.

II-2 Différents types de colmatage

II-2-1 Le colmatage minéral

Le colmatage minéral, plus connu sous le nom d'entartrage (*scaling*), est un phénomène chimique qui altère les membranes de filtration (ultrafiltration, nano filtration ou osmose inverse). Sa particularité réside dans son mécanisme : alors qu'un colmatage physique retient des particules déjà solides, l'entartrage provient de composés initialement dissous dans l'eau qui finissent par cristalliser à la surface ou au cœur même des pores de la membrane [6].



Figure II 1 Colmatage minérale de la membrane

II-2-2 Colmatage biologique

Le colmatage biologique, souvent appelé bio-encrassement (ou biofoulin), est un phénomène dû au développement et à l'accumulation de micro-organismes à la surface et à l'intérieur des pores de la membrane [7].



Figure II 2 Membrane colmatée biologiquement

II-2-3 Le colmatage microbiologique

On utilise souvent les termes de colmatage "biologique" et "microbiologique" comme des synonymes, mais il y a une nuance importante. Le colmatage microbiologique ne se résume pas à un simple dépôt de matière organique inerte. Ce phénomène est dicté par le vivant :

Ce sont les processus métaboliques de micro-organismes actifs, bactéries, champignons et algues qui sont responsables.[8]

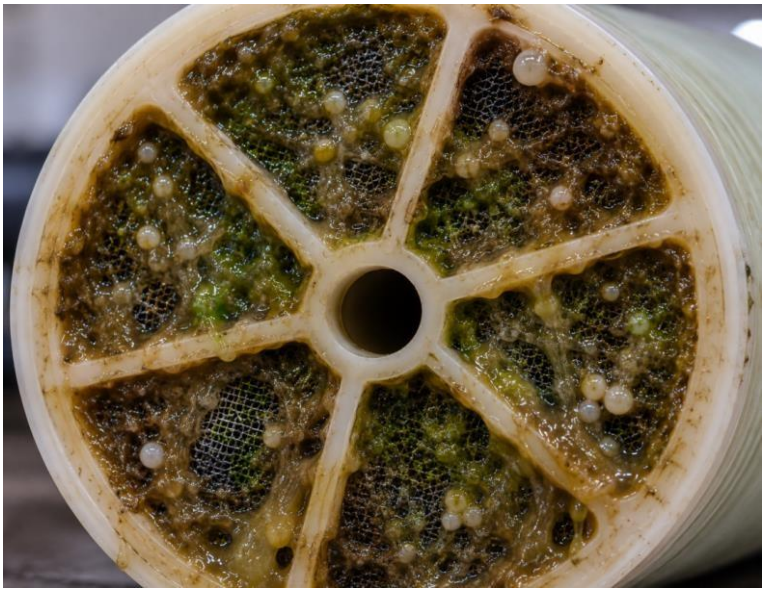

Figure II 3 Membrane colmate microbiologiquement

II-3 Les paramètres influencent le colmatage

II-3-1 La Température (T)

La température agit principalement sur la fluidité du liquide et la cinétique des réactions [9].

II-3-1-1 Viscosité : Plus la température augmente, plus la viscosité de l'eau diminue. Une eau plus fluide passe plus facilement à travers les pores, ce qui augmente le flux.

II-3-1-2 Colmatage Biologique : Une hausse de température (jusqu'à 30 ou 35 °C) accélère considérablement le métabolisme des bactéries. Le bio-colmatage est donc souvent beaucoup plus rapide en été ou dans les climats chauds.

II-3-1-3 Solubilité et Cristallisation : Pour la plupart des sels (comme le calcaire), la solubilité diminue quand la température augmente. Une eau chaude favorise donc la précipitation des minéraux (entartrage) sur la membrane [10].

II-3-2 Le Potentiel Hydrogène (pH)

Le pH est le paramètre critique pour le colmatage chimique et microbiologique. Il modifie la charge électrique des particules et la solubilité des substances [11].

II-3-2-1 Précipitation minérale

Un pH élevé (basique) favorise la précipitation du carbonate de calcium et des hydroxydes métalliques.

Un pH faible (acide) permet de maintenir ces minéraux sous forme dissoute, limitant ainsi l'entartrage.

II-3-3 La Pression (P)

La pression est la force motrice de la filtration, mais elle peut devenir l'ennemie de la membrane si elle est mal gérée [12].

II-3-3-1 Compactage du gâteau : Une pression trop élevée comprime les particules accumulées à la surface. Le "gâteau" de filtration devient plus dense, plus imperméable et beaucoup plus difficile à décoller lors du nettoyage.

II-3-3-2 Polarisation de concentration : Plus la pression est forte, plus l'eau traverse la membrane rapidement. Cela laisse une concentration très élevée de polluants juste devant la membrane. Cette "couche limite" sature plus vite, provoquant un colmatage immédiat.

II-3-3-3 Colmatage irréversible : Une pression excessive peut forcer des microparticules ou des molécules organiques à pénétrer profondément à l'intérieur des pores, rendant le lavage à contre-courant inefficace.

Tableau II 1 Effet des paramètres sur le colmatage

Paramètre	Augmentation du paramètre	Effet sur le colmatage
Température	↑	Favorise le bio-colmatage et l'entartrage, mais diminue la viscosité.
Ph	↑	Augmente fortement le risque de précipitation calcaire($CaCO_3$)
Pression	↑	Augmente le débit initial mais compacte les dépôts (colmatage sévère).

II-4 Impacts sur les performances

II-4-1 Chute du débit de production (Le rendement)

C'est la conséquence la plus immédiate. Le colmatage augmente la résistance au passage de l'eau.

Diminution du flux de per méat : Pour une pression donnée, la quantité d'eau douce produite par heure diminue progressivement.

Arrêts fréquents : Pour restaurer le débit, la station doit être arrêtée pour des cycles de nettoyage (CIP - Clean In Place). Ces temps d'indisponibilité réduisent la capacité de production annuelle globale de la station [13].

II-4-2 Augmentation de la consommation énergétique

Le dessalement est déjà un processus énergivore, mais le colmatage aggrave la situation [14] :

II-4-2-1 Surpression nécessaire : Pour compenser l'obstruction des pores et maintenir un débit constant, les pompes haute pression doivent travailler davantage.

II-4-2-2 Coût du m^3: L'énergie représentant environ 30% à 40% du coût opérationnel d'une station, toute augmentation de la pression se traduit directement

par une hausse du prix de l'eau produite.

II-4-3 Dégradation de la qualité de l'eau (Sélectivité)

Le colmatage ne se contente pas de bloquer l'eau, il peut aussi altérer la séparation chimique [15] :

II-4-3-1 Passage de sels : Le colmatage biologique ou chimique peut modifier la charge de surface de la membrane ou créer des zones de stagnation (polarisation de concentration). Cela favorise le passage des ions à travers la membrane, augmentant la conductivité (salinité) de l'eau produite.

II-4-3-2 Risque bactérien : En cas de bio-colmatage sévère, des micro-organismes peuvent finir par contaminer le côté eau douce si l'intégrité de la membrane est compromise.

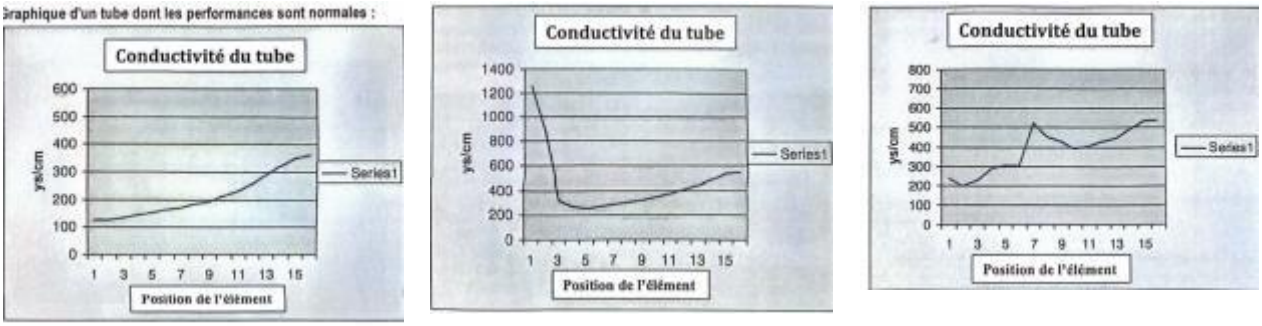

Figure II 4 Evolution de la conductivité du tube de pression en fonction de la position de l'élément membranaire [16]

La figure présente différents profils de conductivité mesurés le long d'un tube de pression d'osmose inverse. Dans le cas d'un fonctionnement normal, la conductivité du perméat augmente progressivement du premier au dernier élément en raison de l'augmentation de la concentration saline de l'eau d'alimentation. En revanche, l'apparition d'un pic de conductivité ou d'une valeur anormalement élevée sur un élément particulier traduit généralement une défaillance de membrane ou un défaut d'étanchéité. L'analyse de ces profils constitue un outil de diagnostic efficace pour la détection précoce des anomalies et l'évaluation de l'état des membranes au sein de l'installation de dessalement.

II-4-4 Réduction de la durée de vie des équipements

Le colmatage entraîne une usure prématurée du matériel [17].

II-4-4-1 Vieillissement des membranes

Les nettoyages chimiques répétés (utilisation d'acides et de bases fortes) agressent la

couche active des membranes. Une membrane colmatée de façon répétée devra être remplacée après 3 ans au lieu de 5 ou 7 ans.

II-4-4-2 Fatigue des pompes : Le travail à des pressions plus hautes que la normale use les composants mécaniques et les moteurs.

II-4-5 Surcoût lié aux produits chimiques et à la maintenance

II-4-5-1 Consommation de réactifs : Plus le colmatage est fréquent, plus la station consomme de produits de nettoyage (biocides, anti scalants, acides).
II-4-5-2 Gestion des effluents : Les eaux de lavage issues des nettoyages chimiques sont polluées et nécessitent un traitement spécifique avant d'être rejetées en mer, ce qui ajoute un coût environnemental et financier [18].

II-4-6 Augmentation de la consommation énergétique et de la pression différentielle

L'augmentation de la consommation énergétique et de l'élévation de la pression différentielle (ΔP) sont deux phénomènes étroitement liés dans les processus de dessalement, particulièrement en osmose inverse (OI) [19].
II-4-6-1 Valeur normale : Elle est généralement comprise entre 0,6 et 1,5 bar par étage de pression.

II-4-7 Dégradation de la sélectivité et de la durée de vie des membranes

II-4-7-1 Dégradation de la Sélectivité (Baisse du taux de rejet)

La sélectivité est la capacité de la membrane à retenir les sels tout en laissant passer l'eau. Une perte de sélectivité se traduit par une augmentation de la conductivité de l'eau produite (perméat) [20].

II-4-7-2 Les causes principales

La cause la plus fréquente de détérioration reste la dégradation chimique par

oxydation. Les membranes en polyamide affichent en effet une grande vulnérabilité face aux agents oxydants, à commencer par le chlore libre utilisé lors des phases de désinfection. Ce dernier s'attaque directement à la structure du matériau en rompant les liaisons polymères, ce qui génère des micro-perforations invisibles à l'œil nu qui laissent alors passer les ions.

II-4-7-2-1 Érosion mécanique

Des particules abrasives (sable, silice) mal filtrées en amont peuvent rayer la surface active de la membrane [21].

II-4-7-2-2 Colmatage irréversible

Certains polluants pénètrent si profondément dans la structure que les nettoyages chimiques ne suffisent plus, altérant les propriétés de transport de la membrane [22].

II-4-7-3 Réduction de la Durée de Vie des Membranes

En conditions optimales, une membrane d'osmose inverse dure entre 3 et 7 ans. Plusieurs facteurs peuvent réduire cette période à moins de 2 ans :

II-4-7-3-1 Nettoyages chimiques (CIP) trop fréquents ou agressifs

Bien que nécessaires, les nettoyages chimiques sont stressants pour le polymère.
L'utilisation de produits trop corrosifs ou des températures de nettoyage trop élevées accélèrent le vieillissement.
Si le système nécessite un CIP tous les mois au lieu de tous les 4 à 6 mois, la durée de vie sera divisée par deux.

II-4-7-3-2 Phénomène de Télescopage

Si la pression différentielle dont nous avons parlé précédemment devient trop importante, la force exercée sur la membrane peut provoquer sa déformation mécanique ou son éclatement à l'intérieur du tube de pression. On appelle cela le télescopage.

II-4-7-3-3 Mauvaise conservation (Arrêts prolongés)

Lorsqu'une installation est à l'arrêt, les membranes doivent être conservées dans une solution spécifique (souvent du méta bisulfite de sodium). Sans cela, le développement biologique (algues, bactéries) devient si dense que la membrane devient inutilisable [23].

II-5 Conclusion

L'impact du colmatage sur les performances de la station se traduit par une baisse progressive de la perméabilité des membranes (ou des milieux filtrants), imposant une hausse de la pression transmembranaire (PTM) pour maintenir le débit nominal. Cette dérive hydraulique entraîne une usure prématurée des équipements électromécaniques, une augmentation de la fréquence des cycles de rétro-lavage et une consommation accrue de réactifs chimiques. La maîtrise du facteur de colmatage reste le levier principal pour optimiser la disponibilité de la station et garantir la qualité constante de l'eau produite.

Chapitre III: Maintenance et contrôle de l'encrassement des membranes d'osmose inverse

III-1 Introduction

Les performances des installations de dessalement par osmose inverse dépendent fortement de l'état des membranes, qui constituent l'élément central du procédé de séparation. Au cours de leur fonctionnement, ces membranes sont soumises à différents phénomènes d'encrassement tels que le colmatage organique, biologique, particulaire ou minéral, susceptibles d'entraîner une diminution de la production d'eau dessalée, une augmentation de la consommation énergétique ainsi qu'une dégradation de la qualité du perméat.

Afin de préserver les performances du système et d'assurer la pérennité des membranes, plusieurs actions préventives et correctives sont mises en œuvre. Elles reposent notamment sur l'utilisation de traitements chimiques préventifs, le suivi de l'état des membranes à travers des méthodes de diagnostic telles que le Mapping et le Probing, ainsi que sur des opérations périodiques de nettoyage chimique en place (CIP). Ce chapitre présente les principales techniques employées dans la station de dessalement d'El Marsa pour prévenir, détecter et traiter les phénomènes d'encrassement des membranes d'osmose inverse.

III-2 Traitement chimique préventif

III-2-1 Les Anti-scalants (Anti-incrustants)

Leur rôle est d'empêcher la formation de dépôts minéraux (tartre) sur les surfaces de transfert ou les membranes. Ces dépôts sont généralement causés par des sels comme le carbonate de calcium $CaCO_3$, Le sulfate de calcium$CaSO_4$ Ou le silicium [24].

III-2-1-2 Mécanisme d'action

1. **Inhibition de seuil :** Maintient les sels en solution au-delà de leur limite de solubilité.
2. **Modification cristalline :** Déforme la structure des cristaux pour les empêcher d'adhérer aux parois.
3. **Dispersion :** Empêche l'agglomération des particules entre elles.

III-2-1-3 Avantages

1. Réduction de la fréquence des nettoyages chimiques (CIP)
2. Maintien d'un flux constant et réduction de la pression différentielle (Delta P).

III-2-2 Les Biocides

Ils sont utilisés pour contrôler le biofouling (encrassement biologique), qui est le développement de micro-organismes (bactéries, algues, champignons) créant un bio-film visqueux [25].

III-2-2-1 Mode d'application

1. **Injection en choc (Curatif/Préventif ponctuel):** Injection massive à intervalles réguliers.
2. **Injection continu (Préventif strict):** Injection à faible dose pour maintenir un environnement stérile.

III-3 Méthodes de diagnostic des membranes

Dans le cas d'augmentation de Δp ont fait recours a ce qu'on appels le Mapping et probing .

III-3-1 Le mapping

Le Mapping est une analyse plus globale et statistique, souvent réalisée à l'échelle d'un étage ou d'une installation complète, pour comprendre la répartition de l'encrassement ou des performances.

L'objectif est de créer une "carte" des performances hydrauliques et chimiques du système. Il consiste à collecter des données de pression, de débit et de qualité d'eau à l'entrée et à la sortie de chaque étage, et parfois sur des tubes témoins.

III-3-1-1 L'utilité

1. Identifier si l'encrassement est situé au premier étage (généralement un encrassement biologique ou colloïdal).
2. Identifier si l'entartrage se situe au dernier étage (là où la concentration en sel est la plus forte).
3. Permet de choisir le bon protocole de nettoyage (CIP) : acide pour le tartre ou alcalin pour la matière organique.

III-3-2 Le Probing (Sondage)

Le Probing est une technique de mesure effectuée pendant que l'installation est en service. Elle sert à identifier une membrane défectueuse ou un joint d'étanchéité défaillant sans avoir à démonter tout le tube. On insère un petit tube flexible (sonde) à l'intérieur du tube collecteur de perméat (l'eau produite).

III-3-2-1 Méthode de mesure

On fait glisser la sonde sur toute la longueur du tube de pression tout en mesurant la conductivité de l'eau à différents points.

III-4 Nettoyage chimique des membranes (CIP)

Le CIP est généralement effectué après le mapping et le probing, après avoir constaté une augmentation anormale de la conductivité.

III-4-1 Les étapes du cycle CIP

Le protocole suit généralement une séquence de 5 à 6 étapes.

III-4-1-1 Prérinçage

Le prérinçage a pour objectif d'éliminer l'eau de procédé résiduelle ainsi que les impuretés grossières présentes dans le système. Cette opération est réalisée à l'aide d'eau de ville ou d'eau filtrée, sans ajout de produits chimiques, circulant à basse pression avant son évacuation vers l'égout

III-4-1-2 Lavage Alcalin (pH élevé : 10 - 12)

Effectué par la soude caustique (NaOH) ou détergents spécifiques pour cibler les matières organiques, biofilms, huiles et graisses. Souvent chauffé entre 25°C et 30°C pour augmenter l'efficacité (selon la tolérance des membranes).

III-4-1-3 Lavage Acide (pH bas : 2 - 4)

Effectué par Acide citrique, acide chlorhydrique ou acide phosphorique ? pour cibler le tartre minéral (calcium, magnésium) et oxydes métalliques (fer).

III-4-1-4 Rinçage intermédiaire

Rinçage à l'eau claire entre les deux phases chimiques pour éviter la neutralisation des produits et la formation de précipités.

III-4-1-5 Désinfection (Optionnel)

Injection d'un biocide non-oxydant ou d'acide per acétique pour garantir une stérilité totale du système.

III-4-1-6 Rinçage final

Rinçage jusqu'à ce que le pH et la conductivité en sortie soient identiques à ceux de l'eau d'entrée.

III-5 Conclusion

L'exploitation durable des unités d'osmose inverse nécessite une gestion rigoureuse des phénomènes d'encrassement susceptibles d'affecter les membranes. Les traitements chimiques préventifs, notamment l'utilisation d'anti-scalants et de biocides, permettent de limiter respectivement l'entartrage et le développement biologique. En complément, les techniques de diagnostic telles que le Mapping et le Probing constituent des outils efficaces pour localiser les anomalies, identifier les membranes défectueuses et orienter les interventions de maintenance.

Lorsque les performances de l'installation se dégradent au-delà des limites admissibles, le nettoyage chimique en place (CIP) représente l'action corrective privilégiée pour restaurer les caractéristiques hydrauliques et la qualité du dessalement. Ainsi, l'association de mesures préventives, d'outils de diagnostic performants et de protocoles de nettoyage adaptés contribue à optimiser le fonctionnement de la station de dessalement d'El Marsa, à prolonger la durée de vie des membranes et à garantir une production d'eau dessalée conforme aux exigences de qualité.

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV-1 Introduction

Ce chapitre expose de manière détaillée l'approche méthodologique, les dispositifs expérimentaux ainsi que les protocoles opératoires appliqués durant notre période de stage au sein de la Station de Dessalement d'Eau de Mer (SDEM) d'El Marsa (Alger). L'objectif est de définir avec précision comment sont suivis les paramètres physico-chimiques des différents flux d'eau afin d'évaluer les performances de l'installation et de surveiller la cinétique de colmatage des membranes d'osmose inverse.

IV-2 Prélèvement des échantillons

Le prélèvement est une routine matinale stricte garantit la collecte d'échantillons représentatifs, évitant toute altération physico-chimique due à la stagnation.

Les flacons sont immédiatement acheminés vers les paillasses du laboratoire où sont regroupés les instruments fixes et portables pour une lecture instantanée.

Les échantillons pour effectuer les analyses physico-chimiques sont prélever directement dans la station, au niveau des point bien précis. Comme suit :

R : Osmose inverse
En prélève de l'eau directement des racks de l'osmose inverse pour effectuer des analyses de contrôle. Ce prélèvement est effectué par un petit tube qui sort directement des racks de l'osmose inverse (01,02,03,04,05) correspond respectivement aux racks ;
CFC : Filtre à cartouche
En prélève l'eau directement au niveau du filtre a cartouche qui se situe juste avant l'osmose inverse.



Figure IV 1 point de prélèvement' échantillon du filtre a cartouche

CFS: Filtre à sable

En prélève l’échantillon directement au niveau du filtre à sable par un tube en plastique.
S : Saumure : rejet concentré issu de l’osmose inverse.

IV-3 Mode opératoire

IV-3-1 Matériels et équipements de mesure

L'évaluation de la sélectivité des membranes et la détection précoce du colmatage reposent sur l'exploitation de deux types d'instrumentations complémentaires :

IV-3-1-1 Instrumentation industrielle en ligne (Fixe)

Des capteurs connectés en continu transmettent en temps réel les données hydrauliques et chimiques depuis les collecteurs des cinq (05) racks d'osmose inverse. Ils mesurent principalement les débits de production, la conductivité de sécurité et la pression différentielle (\Delta P), dont l'augmentation est le principal indicateur de l'accumulation d'un film colmatant sur les membranes.

IV-3-1-2 Équipements de laboratoire (Portables et de Paillasse)

Pour valider les données des capteurs industriels et analyser les échantillons ponctuels, nous avons utilisé :

Un pH-mètre de précision : Pour le contrôle de l'équilibre calco-carbonique et la prévention des dépôts de tartre minéral.

Un conductivimètre de table : Instrument indispensable pour quantifier la salinité globale global (TDS).

Un turbidimètre néphélométrique : Destiné à vérifier l'absence de matières en suspension dans l'eau filtrée avant son admission dans les modules de haute pression.
Les protocoles expérimentaux appliqués pour la détermination de ces paramètres sont résumés dans le tableau suivant

Tableau IV 1Synthèse des protocoles de mesure des paramètres physico-chimiques de l'eau (pH, conductivité électrique, TDS et turbidité).

Paramètre analysé	Objectif	Étapes principales du mode opératoire
PH	Suivre les variations d'acidité ou d'alcalinité susceptibles de favoriser la précipitation du carbonate de calcium.	**1. Étalonnage :** calibration avec des solutions tampons (pH 4,01 ; 7,00 ou 10,01). **2. Conditionnement :** rinçage et immersion de l'électrode dans une fraction de l'échantillon. **3. Mesure :** immersion de la sonde dans l'échantillon sous agitation lente jusqu'à stabilisation de la valeur affichée.
Conductivité électrique et TDS	Évaluer la charge saline globale et l'efficacité de rétention des sels par les membranes.	**1. Préparation :** vérification de la propreté de la cellule et activation de la compensation automatique de température (25 °C). **2. Mesure :** immersion directe de la cellule dans l'échantillon et lecture de la conductivité. **3. Détermination du TDS :** calcul automatique par l'appareil à partir d'un coefficient de conversion adapté.
Turbidité	Contrôler la clarté de l'eau et vérifier l'efficacité des filtres de prétraitement.	**1. Préparation de la fiole :** nettoyage et essuyage de la surface externe. **2. Remplissage :** introduction de l'échantillon jusqu'au trait de jauge en évitant la formation de bulles d'air. **3. Lecture :** insertion de la fiole dans le turbidimètre et enregistrement de la valeur en NTU.

ChapitreV: Résultats

Pourquoi ce vide ? et alors

V-1 Introduction

Dans le cadre du suivi de la qualité de l'eau et de l'évaluation des performances de la station de dessalement d'El Marsa, des campagnes d'analyses ont été réalisées à trois dates distinctes, à savoir les resultats des analyse **10 février 2026**, **12 février 2026** et **05 avril 2026**. Au niveau des points de prélèvement présentés dans le tableau V.1.

Les résultats obtenus ont permis d'étudier l'évolution des principaux paramètres physico-chimiques de l'eau aux différents stades du procédé de dessalement. Les paramètres étudiés sont le pH, la température, la conductivité électrique, la turbidité et les matières dissoutes totales (TDS).

Figure V. 1 Description des points d'échantillonnage

Point	Description
R01 à R05	Échantillons prélevés au niveau des racks d'osmose inverse
SFS	Sortie filtre à sable
SFC	Sortie filtre à cartouche
Eau de mer	Eau brute alimentant la station
Saumure	Rejet concentré issu de l'osmose inverse

V-2 Résultats des analyses

Figure V. 2 Résultats des analyses du 10/02/2026

Point de prélèvement	pH	T(°C)	Conductivité(µs/cm)	Turbidité (NTU)	TDS(PPM)
Ro1	6,17	17,4	490	0,11	257,9
Ro2	6,30	17,3	505	0,04	265,8
Ro3	6,43	17,1	645,1	0,02	339,7
Ro4	6,64	19,9	449,8	0,05	237
Ro5	6,63	16,9	458,7	0,04	2414
SFS	8,03	16,9	54400	0,04	37536
SFC	8,02	18,4	54100	0,03	37329
S	7,97	20,8	88800		61272

Interprétation

- pH des racks compris entre 6,17 et 6,64.
- Conductivité faible dans les racks, traduisant une bonne qualité de l'eau produite.

- Conductivité très élevée au niveau de l'eau de mer et de la saumure.
- Turbidité très faible dans tous les points analysés.

Tableau V. 3 Résultats des analyses du 12/02/2026

Point de prélèvement	pH	T(°C)	Conductivité(μs /cm)	Turbidité (NTU)	TDS(PPM)
Ro1	6,09	16,8	457	0,09	240,9
Ro2	6,71	17,1	442,7	0,06	233,2
Ro3	6,14	16,7	656,4	0,09	345,8
Ro4	5,92	17,1	428,3	0,11	225,6
Ro5	5,89	17,1	466,5	0,14	245,3
SFS	8,06	17	55100	0,15	38019
SFC	8,01	16,8	53400	0,09	36846
S	7,92	17,4	89400	1,11	61686

Interprétation

- Résultats similaires à ceux du 10/02/2026.
- Légère diminution de la conductivité dans plusieurs racks.
- Turbidité toujours très faible.
- Performances globalement stables du système.

Tableau V. 3 Résultats des analyses du 05/04/2026

Point de prélèvement	pH	T (°C)	Conductivité(μs /cm)	Turbidité (NTU)	TDS(PPM)
Ro1	/	/	/	/	/
Ro2	6,90	16,9	393,5	0,12	208,2
Ro3	6,45	16,9	615,1	0,03	325,6
Ro4	6,28	16,9	355,5	0,12	188,1
Ro5	6,18	17	461,4	0,04	244,1
SFS	8,13	16,6	53400	0,62	36264
SFC	8,09	16,5	55600	0,05	38364
S	8,44	16,8	87700	1,04	61013

Interprétation

- Maintien de bonnes performances des membranes.
- Baisse générale de la conductivité dans certains racks.
- Augmentation ponctuelle de la turbidité au niveau du filtre à sable (SFS).

- Valeurs de pH conformes au fonctionnement normal de la station.

V-3 Analyse comparative

V-3-1 Evolution du pH

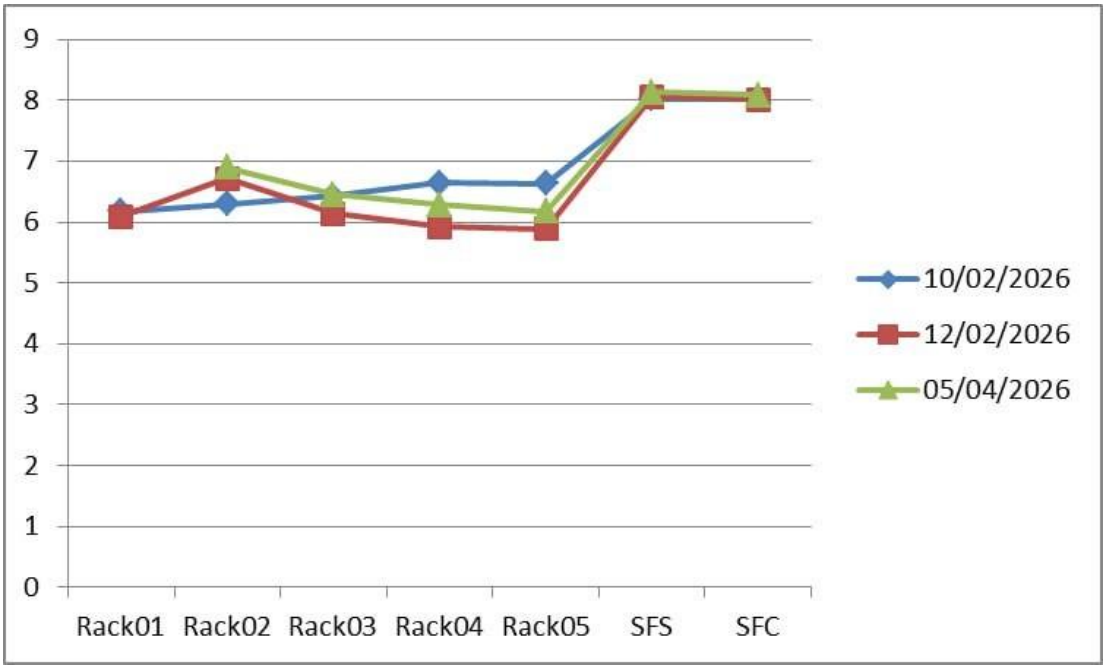

Figure V. 3 Evolution du pH

Les valeurs du pH demeurent relativement stables au niveau des racks d'osmose inverse avec des valeurs comprises entre 5,89 et 6,90. Les points SFS et SFC présentent des valeurs plus élevées proches de 8, traduisant les caractéristiques naturelles de l'eau avant traitement par osmose inverse.

V-3-2 Evolution de conductivité

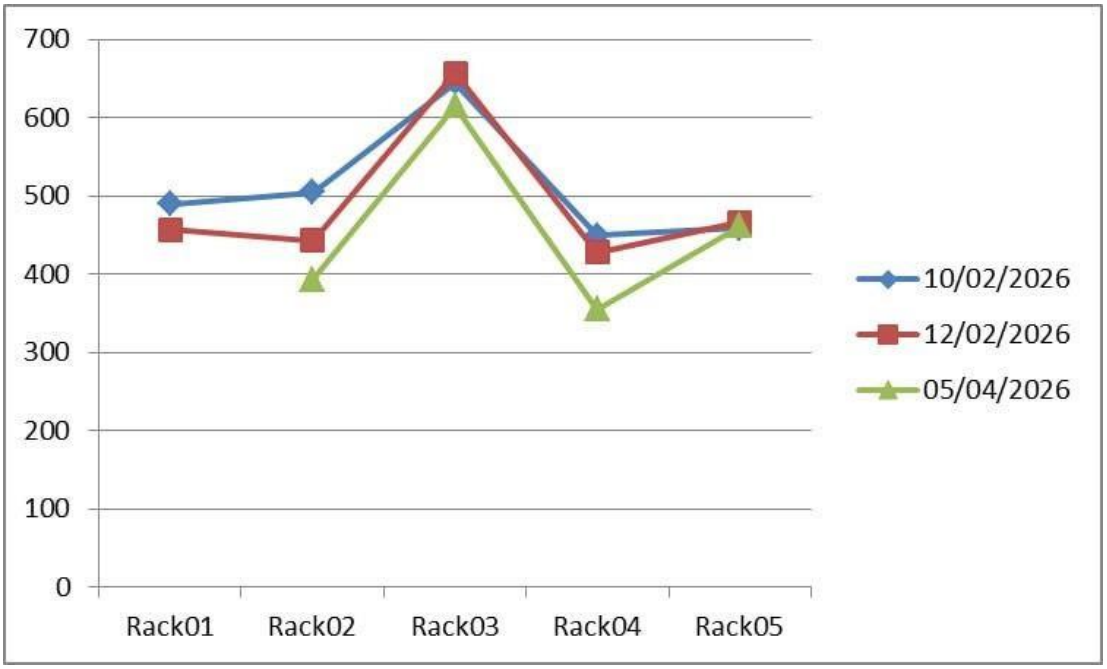

Figure V. 4Evolution de la conductivité

Ce graphique linéaire suit l'évolution d'un paramètre mesuré sur cinq équipements ou emplacements spécifiques (**Rack01 à Rack05**). Les données proviennent des trois mêmes campagnes de mesures en 2026 que le graphique précédent : le 10 février (bleu), le 12 février (rouge) et le 5 avril (vert). Contrairement au premier graphique, l'échelle de l'axe vertical est beaucoup plus élevée, s'étendant de **0 à 700**.
Le comportement le plus marquant est l'existence d'un pic très net sur le **Rack03** pour les trois dates. Les valeurs y grimpent massivement pour atteindre une fourchette située entre **610 et 655**. Le Rack03 subit manifestement une contrainte ou une charge bien supérieure aux autres.

Après le pic du Rack03, on observe une chute brutale des valeurs sur le **Rack04**, qui retombent à leur niveau le plus bas du réseau (entre **350 et 450** selon la date).·

10/02/2026 (Bleu) : Les valeurs globales sont les plus hautes (notamment sur Rack01, Rack02 et Rack04).

12/02/2026 (Rouge) : Une légère baisse générale s'amorce par rapport au 10 février.

05/04/2026 (Vert) : Deux mois plus tard, les valeurs affichent une diminution marquée sur presque tous les points, particulièrement visible sur **Rack02** (~390) et **Rack04** (~350). Le système subit une perte d'intensité ou d'efficacité globale à l'arrivée du printemps.

V-3-3 Evolution de la turbidité

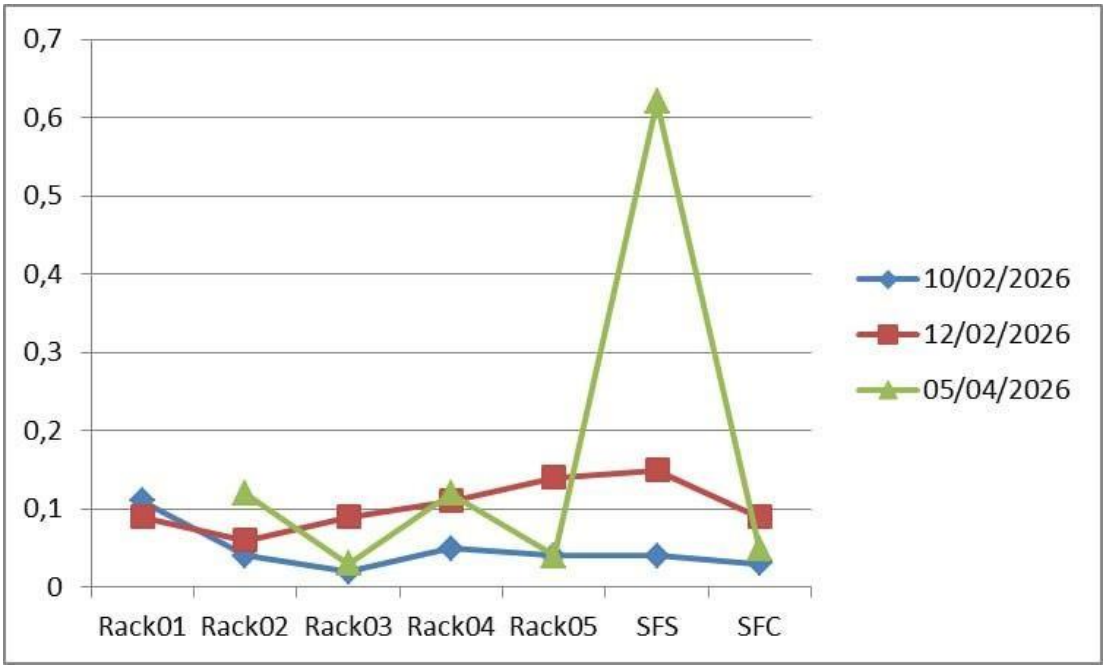

Figure V. 5 Evolution de la turbidité

Le graphique étudie l'évolution d'un paramètre (exprimé sur une échelle de valeurs faibles allant de **0 à 0,7**) au niveau des différents modules du système (**Rack01 à Rack05**) ainsi que sur les stations de contrôle **SFS** et **SFC**. Les mesures couvrent trois campagnes de suivi en 2026 : le 10 février, le 12 février et le 5 avril.

Les campagnes des 10/02 (bleu) et 12/02 (rouge) affichent un profil relativement stable et bas. Les valeurs oscillent dans une plage très faible comprise entre **0,02 et 0,15**. On note une très légère augmentation globale entre le 10 et le 12 février, mais le comportement reste homogène sur l'ensemble du réseau (Racks, SFS et SFC).
La campagne du 05/04 (vert) montre un comportement radicalement différent. Si les valeurs au niveau des Racks (01 à 05) et de la station SFC restent globalement dans la moyenne basse (inférieure à 0,15, malgré de légères fluctuations sur Rack02 et Rack04), on observe une **anomalie majeure et isolée au niveau du point SFS**, où la valeur subit une hausse exponentielle pour atteindre un pic à **0,62**.

V-3-4 Evolution de conductivité

Pourqoui ce vide

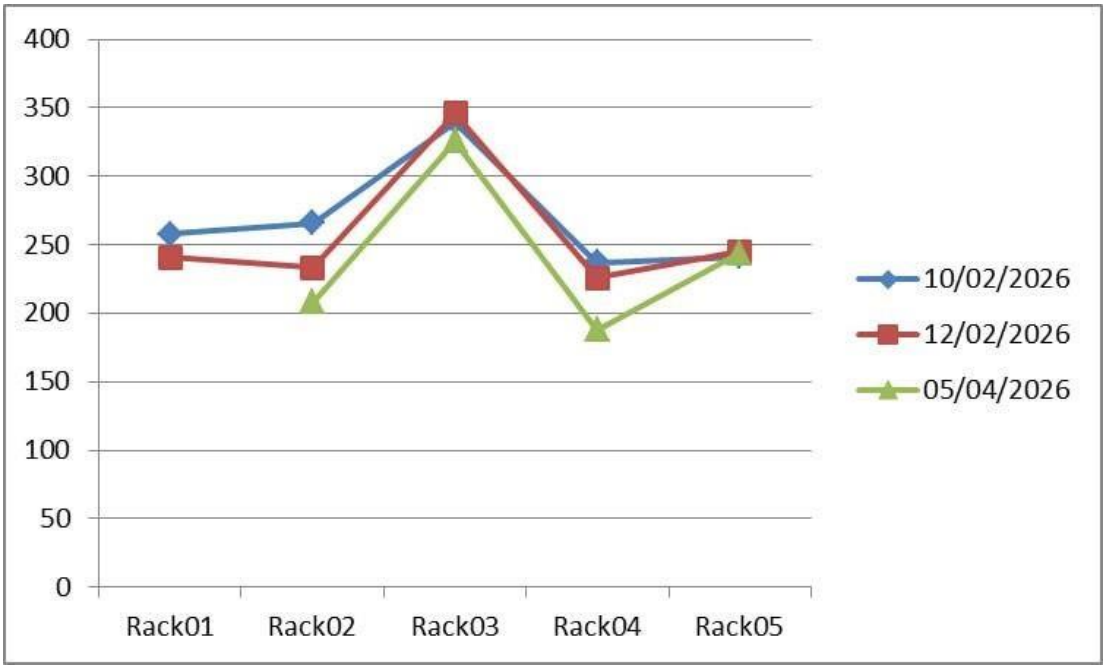

Figure V. 6 Evolution de TDS

Le graphique étudie l'évolution d'un paramètre (exprimé sur une échelle de valeurs faibles allant de **0 à 0,7**) au niveau des différents modules du système (**Rack01 à Rack05**) ainsi que sur les stations de contrôle **SFS** et **SFC**. Les mesures couvrent trois campagnes de suivi en 2026 : le 10 février, le 12 février et le 5 avril.

Les campagnes des 10/02 (bleu) et 12/02 (rouge) affichent un profil relativement stable et bas. Les valeurs oscillent dans une plage très faible comprise entre **0,02 et 0,15**. On note une très légère augmentation globale entre le 10 et le 12 février, mais le comportement reste homogène sur l'ensemble du réseau (Racks, SFS et SFC).

La campagne du 05/04 (vert) montre un comportement radicalement différent. Si les valeurs au niveau des Racks (01 à 05) et de la station SFC restent globalement dans la moyenne basse (inférieure à 0,15, malgré de légères fluctuations sur Rack02 et Rack04), on observe une **anomalie majeure et isolée au niveau du point SFS**, où la valeur subit une hausse exponentielle pour atteindre un pic à **0,62**.

V.4 Contrôle de la qualité de l'anti-scalant

L'anti-scalant est un produit chimique injecté en amont des membranes d'osmose inverse afin de prévenir la formation de dépôts minéraux susceptibles d'entraîner leur colmatage. Afin de vérifier la conformité du produit utilisé au niveau de la station de dessalement d'El Marsa, une analyse a été réalisée le 10 février 2026.

V.4.1 Résultats de l'analyse

Tableau V. 5 Résultats de l'analyse de l'anti-scalant du 10/02/2026

Paramètre	Valeur mesurée
pH pH	11,95
Température (°C)	28,2
Masse (P)	53 g
Volume (V)	50 ml
Densité (d = P/V)	1,0615 g/ml
Aspect	Liquide homogène

Interprétation

L'analyse de l'anti-scalant montre que la densité mesurée (1,0615 g/ml) est conforme à la valeur indiquée par le fabricant. Cela confirme la bonne qualité du produit et son aptitude à prévenir la formation des dépôts minéraux sur les membranes d'osmose inverse.

V.5 Diagnostic des performances des membranes par mesure de conductivité

La mesure de la conductivité le long des éléments membranaires constitue un outil de diagnostic permettant d'évaluer l'état de fonctionnement des membranes d'osmose inverse. L'évolution de ce paramètre renseigne sur l'efficacité du dessalement et permet de détecter d'éventuels phénomènes de colmatage ou de détérioration des membranes.

V.5.1 Cas d'un tube présentant un fonctionnement normal

La figure V.3 présente l'évolution de la conductivité mesurée le long des différents éléments d'un tube du rack fonctionnant normalement.

On observe une augmentation initiale de la conductivité, qui passe de 10,7 mS/cm au niveau du premier élément à une valeur maximale de 15,9 ms/cm au niveau du deuxième élément. Par la suite, la conductivité diminue progressivement pour atteindre environ 7,0 ms/cm à l'élément n°6.

À partir de l'élément n°7, la diminution devient plus faible et tend vers une valeur quasi stable de l'ordre de 4,3 ms/cm au niveau du dernier élément. Cette évolution traduit une bonne répartition des flux au sein du tube et une élimination progressive des sels dissous, indiquant ainsi un fonctionnement normal des membranes sans signe

apparent de colmatage.

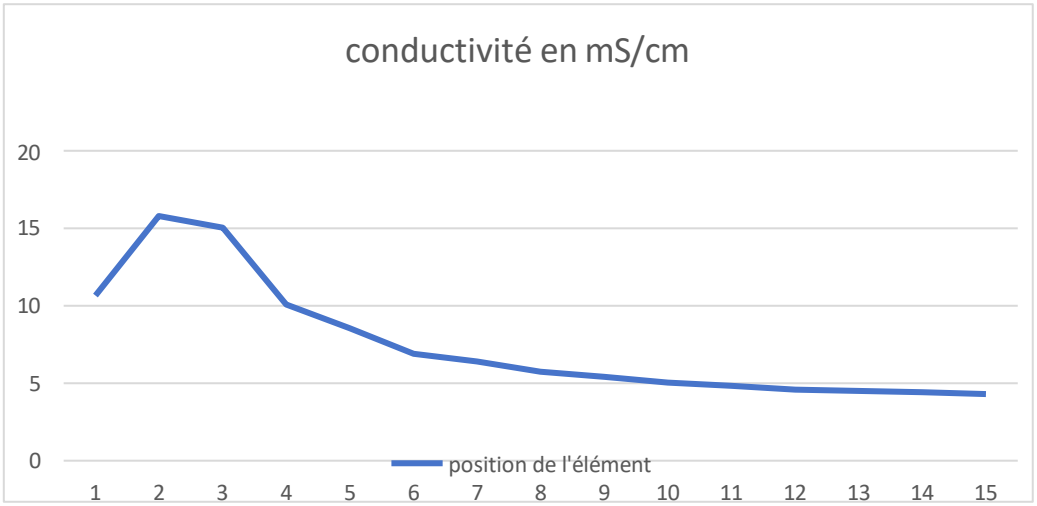

Figure V. 6 Tube dont les performances sont normales

V.5.2 Cas d'un tube présentant un fonctionnement anormal

La figure V.4 présente l'évolution de la conductivité mesurée dans un tube dont le comportement est considéré comme anormal.

Entre les éléments n°1 et n°9, la conductivité augmente progressivement de 124 à 193 ms/cm. Cette augmentation demeure relativement modérée et régulière. Cependant, à partir de l'élément n°9, une rupture de pente importante apparaît. La conductivité augmente alors rapidement pour atteindre une valeur maximale d'environ 360 ms/cm au niveau du quinzième élément.

Cette augmentation excessive de la conductivité peut être le signe d'un dysfonctionnement localisé, notamment un phénomène de colmatage, d'entartrage ou une dégradation des performances membranaires. Une inspection plus approfondie ainsi qu'une opération de nettoyage chimique (CIP) peuvent être envisagées afin de rétablir les performances du système.

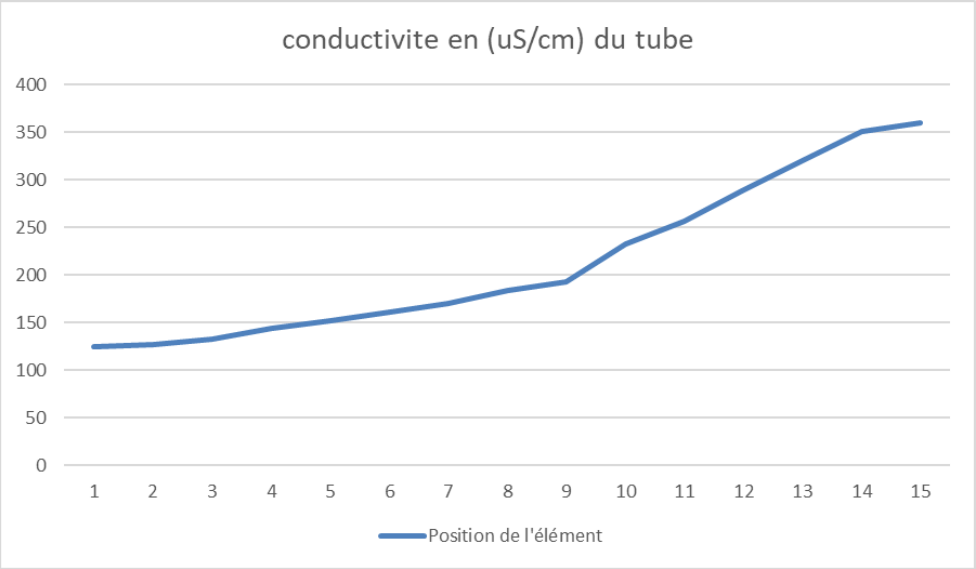

Figure V. 7 Tube dont les performances sont anormales

V. 6 Conclusion

L'analyse comparative des trois campagnes met en évidence une bonne stabilité des paramètres physico-chimiques de l'eau produite. Les faibles valeurs de conductivité, de turbidité et de TDS observées au niveau des racks confirment le bon fonctionnement des membranes d'osmose inverse et l'efficacité globale de la station de dessalement d'El Marsa. Quelques variations ponctuelles ont été observées, notamment au niveau de la turbidité du filtre à sable, sans toutefois remettre en cause les performances globales du système.

L'analyse réalisée sur l'anti-scalant a confirmé la conformité de ses caractéristiques physico-chimiques, notamment sa densité et son aspect. Ces résultats témoignent de la bonne qualité du produit et de son aptitude à protéger efficacement les membranes contre les dépôts minéraux, contribuant ainsi au maintien des performances du système de dessalement.

L'analyse de la conductivité le long des éléments membranaires a permis de distinguer un tube présentant un fonctionnement normal d'un tube présentant des anomalies de fonctionnement. Les résultats obtenus montrent que le suivi de ce paramètre constitue un indicateur pertinent pour la détection précoce du colmatage et pour l'optimisation des opérations de maintenance des membranes d'osmose inverse.

Conclusion générale

Ce travail a été réalisé au sein de la station de dessalement d'eau de mer d'El Marsa dans le but d'étudier les performances du procédé d'osmose inverse et d'évaluer les méthodes de contrôle et de maintenance mises en œuvre pour limiter l'encrassement des membranes.

Parmi les différentes technologies existantes, l'osmose inverse s'impose aujourd'hui comme la technique la plus répandue grâce à son rendement élevé et à sa consommation énergétique relativement maîtrisée.

Les analyses physico-chimiques réalisées lors des différentes campagnes de prélèvement ont montré une bonne qualité de l'eau produite. Les faibles valeurs de conductivité, de turbidité et de matières dissoutes totales (TDS) observées au niveau des racks d'osmose inverse confirment l'efficacité du procédé dans l'élimination des sels dissous et des particules en suspension. Les résultats obtenus témoignent également d'une stabilité globale du fonctionnement de l'installation malgré quelques variations ponctuelles observées au niveau de certains paramètres.

Le contrôle de la qualité de l'anti-scalant a révélé la conformité du produit utilisé aux spécifications du fabricant, ce qui garantit son efficacité dans la prévention de l'entartrage des membranes et contribue au maintien des performances de l'installation.

Par ailleurs, les techniques de diagnostic des membranes, notamment le probing basé sur la mesure de la conductivité le long des tubes membranaires, ont permis de distinguer les modules fonctionnant normalement de ceux présentant des anomalies susceptibles d'être liées à un phénomène de colmatage ou de dégradation. Ces outils constituent ainsi un moyen efficace de surveillance préventive et d'aide à la maintenance.

Enfin, cette étude a permis de mieux comprendre l'importance du suivi régulier des paramètres de fonctionnement, de l'application rigoureuse des traitements chimiques préventifs et de la mise en œuvre des opérations de maintenance pour assurer la pérennité des membranes et garantir une production continue d'eau dessalée conforme aux normes de qualité.

En perspective, il serait intéressant d'étendre cette étude par un suivi sur une période plus longue intégrant l'analyse des performances saisonnières de l'installation, l'évaluation des consommations énergétiques ainsi que l'optimisation des stratégies de nettoyage et de maintenance afin d'améliorer davantage la fiabilité et le rendement de la station de dessalement d'El Marsa.

Bibliographies

[1] VOUTCHKOV, N. Desalination Engineering: Planning and Design, McGraw-Hill, 2013.

[2] Algerian Ennery Company (AEC). Fiche technique de la station de dessalement d'El Marsa, 2024.

[3] COSIDER Canalisations. Rapport technique de réalisation de la station de dessalement d'El Marsa, 2022.

[4] Algerian Energy Compagnie (AEC). Documentation d'exploitation des stations de dessalement en Algérie, 2024.

[5] BAKER, R.W. Membrane Technology and Applications, 3e edition, Wiley, 2012.

[6] BAKER, R.W. Membrane Technology and Applications, Wiley, 2012.

[7] FANE, A.G., WANG, R., HU, M.X. Synthetic Membranes for Water Purification, Nature Reviews Materials, 2015.

[8] ELIMELECH, M., PHILLIP, W.A. The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology and the Environment, Science, 2011.

[9] MULDER, M. Basic Principles of Membrane Technology, Kluwer Academic Publishers, 1996.

[10] VOUTCHKOV, N. Desalination Engineering: Planning and Design, 2013.

[11] American Water Works Association (AWWA). Reverse Osmosis and Nano filtration, 2007.

[12] BODZEK, M., KONIECZNY, K. Membrane Techniques in Water and Wastewater Treatment, CRC Press, 2014.

[13] SCHNEIDER, R.P., TSUTIYA, M.T. Membrane Fouling and Cleaning in Reverse Osmosis Systems, IWA Publishing, 2010.

[14] ELIMELECH, M., PHILLIP, W.A. The Future of Seawater Désaliénation, Science, 2011.

[15] Organisation Mondiale de la Santé (OMS). Directives de qualité pour l'eau de boisson, 2017.

[16] American Water Works Association (AWWA). Reverse Osmosis and Nano filtration, 2007.

[17] SCHNEIDER, R.P., TSUTIYA, M.T. Membrane Fouling and Cleaning in Reverse Osmosis Systems, 2010.

[18] METCALF & EDDY. Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery, 2014.

[19] VOUTCHKOV, N. Desalination Engineering: Planning and Design, 2013.
[20] BAKER, R.W. Membrane Technology and Applications, 2012.
[21] BODZEK, M., KONIECZNY, K. Membrane Techniques in Water and Wastewater Treatment, 2014.
[22] SCHNEIDER, R.P., TSUTIYA, M.T. Membrane Fouling and Cleaning in Reverse Osmosis Systems, 2010.
[23] FANE, A.G., WANG, R., HU, M.X. Synthetic Membranes for Water Purification, 2015.
[24] VOUTCHKOV, N. Desalination Engineering: Planning and Design, 2013.
[25] SCHNEIDER, R.P., TSUTIYA, M.T. Membrane Fouling and Cleaning in Reverse Osmosis Systems, 2010.