

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل  
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES SCIENCES DE LA MER ET DE L'AMÉNAGEMENT DU  
LITTORAL



**Thèse**

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Docteur en Science

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Hydrobiologie marine et continentale

Spécialité : Sciences de la Mer

**Thème :**

---

**Approche intégrée du milieu marin anthropisé :  
caractérisation et suivi de l'impact  
environnemental de deux stations de dessalement  
de la côte algéroise**

---

Présentée par :

**Amina Amel Adem Fadel**

Soutenue publiquement le 24/06/2026, devant le jury composé de :

|                                   |                         |         |                     |
|-----------------------------------|-------------------------|---------|---------------------|
| <b>Mme Dahmani Nacera</b>         | Professeure             | ENSSMAL | Présidente          |
| <b>Mme Houma Bachari Fouzia</b>   | Professeure             | ENSSMAL | Directrice de thèse |
| <b>M. Amara Mourad</b>            | Professeur              | ENSNN   | Examineur           |
| <b>M. Driche Mohamed</b>          | Maître de Conférences A | ENSSMAL | Examineur           |
| <b>Mme Ghazi Malika</b>           | Maître de Conférences A | ENSSMAL | Examinatrice        |
| <b>Mme Belhouchet Nassima</b>     | Maître de Recherche A   | CNRDPA  | Examinatrice        |
| <b>M.Salah Eddine Ali Rahmani</b> | Maître de Conférences A | USTHB   | Examineur           |

**Année Universitaire 2025 - 2026**

## DÉDICACE

*À ma mère,*

*pour son amour inconditionnel et sa foi inébranlable en mes capacités.*

*À mon Père et Amine, en témoignage de ma reconnaissance.*

*À mon tendre mari,*

*mon meilleur compagnon, mon bras droit et mon pilier.*

*À mon fils, Anis,*

*mon petit trésor, ma plus grande source de joie et ma raison d'être.*

*À ma famille ; mon socle et mes amis fidèles qui ont rendu ce chemin plus  
léger.*

-----,

*Amina Amel*

## REMERCIEMENTS

Je remercie le Professeur **Houma Bachari Fouzia** d'avoir accepté de diriger ce travail.

Mes sincères remerciements s'adressent à Madame **Dahmani**, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury et pour son précieux soutien.

J'adresse mes vifs remerciements au Professeur **Amara Mourad**, à Madame **Ghazi**, Madame **Belhouchet**, Monsieur **Driche** et Monsieur **Ali Rahmani**, qui ont bien voulu examiner ce manuscrit, mais aussi pour leur grande disponibilité et leurs conseils avisés. L'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux, ainsi que leurs remarques constructives et éclairées, ont été essentiels pour l'enrichissement de cette thèse.

Je souhaite adresser mes remerciements, à Madame **Refes** ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont facilité le travail sur le terrain, notamment lors des campagnes de prélèvement.

Je tiens à remercier chaleureusement Messieurs **Mazouar** et **Bitam** pour leur aide et leur immense soutien.

Une mention spéciale aux ingénieurs et techniciens de la station de dessalement de Palm-Beach, ainsi qu'aux équipes du laboratoire de la SEAAL. Leur professionnalisme et leur bonne humeur quotidienne ont grandement fluidifié les étapes d'analyse.

Je remercie chaleureusement Messieurs **Saidi**, **Hamadouche**, et le Professeur **Hachemi** pour leur aide précieuse et leur accompagnement méthodologique, notamment durant la phase de stage et d'encadrement des étudiants.

Je remercie vivement **Nawel**, **Mehdia**, **Romaissa** et **Zakia** dont les conseils avisés et les encouragements continus m'ont permis d'aller jusqu'au bout de cette entreprise avec détermination.

Enfin, mes remerciements les plus chaleureux vont à **ma famille**, mon ancre et ma première source de motivation. Leur soutien sans borne, leur disponibilité et leur amour sont le moteur qui m'a aidé à tenir le cap et à avancer durant ces années.

Je remercie surtout **Amine** ; mon frère pour le temps passé à m'attendre tard le soir devant l'école, et pour les périples communs autour des stations de dessalement et sorties de terrain.

Je remercie **mon époux** d'avoir partagé les moments de doute et d'avoir allégé les périodes de stress par son soutien infaillible, sa patience et sa constante bonne humeur. Sans toi, ce chemin aurait été infiniment plus difficile.

Je remercie également mon petit **Anissou**, tes fous rires, tes sourires et tes câlins m'ont permis de me reconnecter à l'essentiel et de me ressourcer dans les moments les plus difficiles. Tu es ma plus belle réussite.

Merci au temps, cet enseignant exigeant, qui m'a appris l'humilité. Il a fallu des jours, des semaines, des mois, voire des années pour finaliser ce travail. Mais chaque heure investie m'a permis de grandir, non seulement en tant que chercheure, mais en tant que femme.

Cette thèse de doctorat, malgré toutes ces années de routes, de doutes et de déroutes, a été une aventure riche en apprentissages et en rencontres. Je suis profondément reconnaissante envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont jalonné ce parcours de combattant et ont rendu cette réalisation possible.



## RÉSUMÉ

Face au stress hydrique grandissant, l'Algérie a massivement investi dans le dessalement de l'eau de mer. En 2021, onze stations de grande capacité couvraient déjà 17 % de la consommation nationale. Toutefois, cette expansion s'accompagne d'un risque environnemental critique : les déversements directs de saumure hypersaline dans la mer. Ces rejets constituent une menace pour les écosystèmes côtiers méditerranéens, déjà vulnérables et soumis à de multiples pressions anthropiques.

Cette thèse vise à caractériser les rejets des installations de dessalement de Palm-Beach et Fouka 1, à évaluer leurs impacts sur le milieu récepteur, et à proposer des pistes d'optimisation pour le système de rejet de Fouka 1. La méthodologie de travail combine des analyses physico-chimiques et microbiologiques, des méthodes statistiques multivariées (ACP, classification hiérarchique, analyse spatiale) et une modélisation numérique de la dispersion des rejets à l'aide du logiciel CORMIX.

Les résultats ont montré que les rejets sont hautement concentrés en sels (salinité atteignant 61 psu à Palm-Beach et 69 psu à Fouka 1), provoquant une augmentation significative de la salinité du milieu récepteur. Un gradient de salinité anormal est clairement observable jusqu'à plusieurs dizaines de mètres autour du point de déversement. Aussi, l'étude des communautés phytoplanctoniques à Palm-Beach a révélé que l'hypersalinité affecte la diversité et l'abondance des espèces. On observe notamment une dominance des Dinoflagellés par rapport aux Diatomées, avec la présence d'espèces indicatrices de stress environnemental. Les analyses microbiologiques ont mis en évidence un dépassement des normes impératives en Streptocoques Fécaux pour la station de Palm-Beach, attestant d'une contamination fécale persistante dans la saumure rejetée. Les résultats de modélisation avec le logiciel CORMIX ont démontré une dilution insuffisante en champ proche (42,5 psu à 20 m) et une zone d'influence qui s'étend sur 150 mètres. L'analyse paramétrique a révélé le rôle déterminant de la vitesse du courant ambiant, de l'angle de rejet et du nombre de diffuseurs, ainsi que de la nécessité d'améliorer la configuration de l'émissaire de la station de Fouka 1.

**Mots-clés :** Stress hydrique, Algérie, Dessalement, Saumure, Salinité, Système de rejet, Milieu récepteur, Impacts, Modélisation, CORMIX, Palm-Beach, Fouka 1

## ABSTRACT

To address water stress, Algeria has massively invested in seawater desalination. In 2021, eleven large-capacity plants already covered 17% of national consumption. However, this expansion is accompanied by untreated hypersaline brine discharges released directly into the marine environment, constituting a major environmental threat to Mediterranean coastal ecosystems, which are particularly vulnerable and already subject to multiple anthropogenic pressures. This thesis aims to characterize the discharges from two desalination plants (Palm-Beach and Fouka 1), to assess their impacts on the receiving environment, and to optimize the discharge system of the Fouka 1 plant. The methodology combines in situ physicochemical and microbiological analyses, multivariate statistical methods (PCA, hierarchical clustering, spatial analysis), and numerical modeling of discharge dispersion using CORMIX software.

The results showed that the discharges are highly concentrated in salts (salinity reaching 61 psu at Palm-Beach and 69 psu at Fouka 1), causing a significant increase in the salinity of the receiving environment. An abnormal salinity gradient is clearly observable up to several tens of meters around the discharge point. Furthermore, the study of the phytoplankton communities at Palm-Beach revealed that hypersalinity affects species diversity and abundance. Notably, a dominance of Dinoflagellates over Diatoms was observed, along with the presence of species indicative of environmental stress. Microbiological analyses highlighted an exceedance of mandatory standards for Fecal Streptococci at the Palm-Beach plant, confirming persistent fecal contamination in the discharged brine.

The modeling results using CORMIX software demonstrated insufficient dilution in the near field (42.5 psu at 20 m) and an influence zone extending over 150 meters. The parametric analysis revealed the decisive role of ambient current velocity, discharge angle, and the number of diffusers, highlighting the necessity of improving the outfall configuration at the Fouka 1 plant.

**Keywords:** Water stress, Algeria, Desalination, Brine, Salinity, Discharge system, Receiving environment, Impacts, Modeling, CORMIX, Palm-Beach, Fouka 1

## ملخص

لمواجهة الإجهاد المائي، استثمرت الجزائر بشكل كبير في تحلية مياه البحر. في عام 2021، كانت إحدى عشرة محطة ذات سعة كبيرة تغطي بالفعل 17% من الاستهلاك الوطني. ومع ذلك، يصاحب هذا التوسع تصريف مياه شديدة الملوحة (محلول ملحي) غير معالجة تُطلق مباشرة في البيئة البحرية، مما يشكل تهديدًا بيئيًا كبيرًا للنظم الإيكولوجية الساحلية في البحر الأبيض المتوسط، وهي نظم هشة بشكل خاص وتخضع بالفعل لضغوط بشرية متعددة.

تهدف هذه الأطروحة إلى توصيف التصريفات من محطتين لتحلية المياه (بالم بيتش وفوكة 1)، وتقييم تأثيراتها على البيئة المستقبلية، وتحسين نظام التصريف الخاص بمحطة فوكة 1. تجمع المنهجية بين التحليلات الفيزيائية الكيميائية، التجميع الهرمي، PCA والميكروبيولوجية الموقعية، والأساليب الإحصائية متعددة المتغيرات (تحليل المكونات الرئيسية، CORMIX التحليل المكاني)، والنمذجة العددية لانتشار التصريف باستخدام برنامج أظهرت النتائج أن التصريفات عالية التركيز بالملح (حيث وصلت الملوحة إلى 61 جزء في بالم بيتش و 69 جزء في فوكة 1)، مما تسبب في زيادة كبيرة في ملوحة البيئة المستقبلية.

يمكن ملاحظة تدرج غير طبيعي في الملوحة على مسافة تمتد إلى عدة عشرات من الأمتار حول نقطة التصريف. كما كشفت دراسة المجتمعات النباتية العالقة في منطقة بالم بيتش أن فرط الملوحة يؤثر سلبًا في تنوع الأنواع ووفرتها. ويلاحظ، على وجه الخصوص، هيمنة الصوطيات الدوارة (الدينوفلاجيلات) على الدياتومات، مع وجود أنواع تعد مؤشرًا على تعرض الوسط لضغوط. أبرزت التحليلات الميكروبيولوجية تجاوز المعايير الإلزامية للمكورات العقدية البرازية في محطة بالم بيتش، مما يؤكد استمرار التلوث البرازي في المحلول الملحي المصرف.

أظهرت نتائج النمذجة باستخدام برنامج CORMIX تخفيفًا غير كافٍ في المجال القريب (42.5 جزء في الألف على بعد 20 مترًا) ومنطقة تأثير تمتد لأكثر من 150 مترًا. كشف التحليل البارامتري عن الدور الحاسم لسرعة التيار المحيط، وزاوية التصريف، وعدد الناشرات (diffusers)، مما يسلط الضوء على ضرورة تحسين تكوين المصب في محطة فوكة 1.

**الكلمات المفتاحية:** الإجهاد المائي، الجزائر، تحلية المياه، المحلول الملحي (الرجيع)، الملوحة، نظام التصريف، الوسط المتلقي،

التأثيرات، النمذجة، CORMIX، بالم بيتش، فوكا 1

## TABLE DES MATIÈRES

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| INTRODUCTION GÉNÉRALE.....                                             | 1  |
| CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....                             | 5  |
| 1. Notions générales sur le dessalement.....                           | 6  |
| 2. Technologies de dessalement de l'eau de mer.....                    | 7  |
| 2.1. Principe de l'osmose inverse .....                                | 10 |
| 3. Inconvénients de la technologie de dessalement .....                | 12 |
| 3.1. Émissions atmosphériques .....                                    | 12 |
| 3.2. Rejets de saumure .....                                           | 13 |
| 3.3. Rejets chimiques .....                                            | 16 |
| 3.4. Occupation du sol.....                                            | 19 |
| 3.5. Bruits et vibrations .....                                        | 19 |
| 3. Impacts environnementaux.....                                       | 19 |
| 4. Situation du dessalement de l'eau de mer en Algérie .....           | 22 |
| 4.1. Capacités installées .....                                        | 22 |
| 4.2. Difficultés rencontrées .....                                     | 24 |
| CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES.....                                | 26 |
| 1. Présentation des sites d'étude .....                                | 27 |
| 1.1. Station de Palm-Beach .....                                       | 28 |
| 1.1.1. Situation géographique .....                                    | 28 |
| 1.1.2. Caractéristiques techniques de la station de dessalement.....   | 28 |
| 1.1.2.1. Système de captage et de stockage de l'eau de mer brute ..... | 30 |
| 1.1.2.2. Traitement préliminaire de l'eau brute .....                  | 30 |
| 1.1.2.3. Processus d'osmose inverse.....                               | 32 |
| 1.1.2.4. Post-traitement .....                                         | 33 |
| 1.1.2.5. Système de stockage des rejets.....                           | 33 |
| 1.2. Station de Fouka 1 .....                                          | 34 |
| 1.2.1. Situation géographique.....                                     | 34 |
| 1.2.2. Caractéristiques techniques de la station de dessalement .....  | 35 |
| 1.2.2.1. Système de prise et de stockage de l'eau de mer.....          | 35 |
| 1.2.2.2. Système de prétraitement et de filtration .....               | 36 |
| 1.2.2.3. Unité d'osmose inverse.....                                   | 37 |
| 1.2.2.4. Post-traitement (reminéralisation) .....                      | 38 |

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.2.2.5. Stockage des effluents .....                                                        | 38 |
| 2. Données d'études et travaux effectués .....                                               | 38 |
| 2.1. Stratégie d'échantillonnage .....                                                       | 39 |
| 2.2. Prélèvements et mesures in-situ .....                                                   | 41 |
| 2.3. Traitement des échantillons et techniques d'analyses .....                              | 43 |
| 2.3.1. Mesure de la turbidité .....                                                          | 43 |
| 2.3.2. Analyse de la matière en suspension .....                                             | 43 |
| 2.3.3. Mesure de la matière organique particulaire .....                                     | 44 |
| 2.3.4. Dosage des sels nutritifs .....                                                       | 44 |
| 2.3.5. Dosage des chlorures .....                                                            | 44 |
| 2.3.6. Dosage des solides dissous totaux.....                                                | 45 |
| 2.3.7. Analyse microbiologique .....                                                         | 45 |
| 2.3.8. Étude du phytoplancton .....                                                          | 46 |
| 2.4. Analyse statistique .....                                                               | 46 |
| 2.5. Analyse spatiale .....                                                                  | 46 |
| CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS .....                                                | 48 |
| I- Section 1. Caractérisation des rejets de l'unité de Palm-Beach et du milieu récepteur.... | 49 |
| 1. Qualité des rejets de saumure et de l'eau d'alimentation .....                            | 49 |
| 1.1. Variation de la température .....                                                       | 51 |
| 1.2. Variation de la salinité .....                                                          | 52 |
| 1.3. Variation de la conductivité.....                                                       | 53 |
| 1.4. Variation du pH.....                                                                    | 54 |
| 1.5. Variation de l'oxygène dissous.....                                                     | 55 |
| 1.6. Variation de la turbidité .....                                                         | 57 |
| 1.7. Variation de la matière en suspension.....                                              | 59 |
| 1.8. Variation de la matière organique particulaire.....                                     | 60 |
| 1.9. Variation des sels nutritifs.....                                                       | 61 |
| 1.10. Variation des paramètres microbiologiques.....                                         | 63 |
| 1.11. Étude des communautés phytoplanctoniques .....                                         | 65 |
| 2. Propriétés physico-chimiques des eaux de surface.....                                     | 68 |
| 2.1. Variation de la température.....                                                        | 69 |
| 2.2. Variation de la salinité.....                                                           | 69 |
| 2.3. Variation de la conductivité.....                                                       | 69 |
| 2.4. Variation du pH.....                                                                    | 70 |

|                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.5. Variation de l'oxygène dissous.....                                                                                     | 70  |
| 2.6. Variation de la turbidité.....                                                                                          | 70  |
| 2.7. Variation de la matière en suspension.....                                                                              | 71  |
| 2.8. Variation de la matière organique particulaire.....                                                                     | 71  |
| 2.9. Variation des sels nutritifs .....                                                                                      | 73  |
| 2.10. Étude des communautés phytoplanctoniques.....                                                                          | 76  |
| II- Section 2. Caractérisation du milieu récepteur et des rejets de la station de Fouka 1.....                               | 79  |
| 1. Composition des rejets de saumure et de l'eau d'alimentation .....                                                        | 79  |
| 2. Caractéristiques du milieu récepteur .....                                                                                | 80  |
| 2.1. Vent et conditions hydrodynamiques .....                                                                                | 80  |
| 2.2. Propriétés physico-chimiques des eaux de mer de surface .....                                                           | 85  |
| 2.2.1. Variation de la température .....                                                                                     | 88  |
| 2.2.2. Variation de la salinité .....                                                                                        | 89  |
| 2.2.3. Variation de la conductivité .....                                                                                    | 90  |
| 2.2.4. Variation du pH.....                                                                                                  | 91  |
| 2.2.5. Variation de l'oxygène dissous .....                                                                                  | 92  |
| 2.2.6. Variation des chlorures .....                                                                                         | 93  |
| 2.2.7. Variation des solides dissous totaux .....                                                                            | 93  |
| 2.2.9. Variation de la matière en suspension .....                                                                           | 94  |
| III- Section 3. Analyses statistiques.....                                                                                   | 95  |
| 1. Résultats de l'analyse en composantes principales de la station de Palm-Beach.....                                        | 95  |
| 2. Résultats de l'analyse en composantes principales de la station de Fouka 1.....                                           | 97  |
| 3. Résultats de la classification hiérarchique de la station de Fouka 1.....                                                 | 101 |
| CHAPITRE IV : MODÉLISATION DE L'EFFLUENT DE LA STATION DE FOUKA 1<br>ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'ÉMISSAIRE MARIN ..... | 104 |
| 1. Gestion des rejets de saumure .....                                                                                       | 106 |
| 2. Modélisation des panaches d'effluents en milieu marin .....                                                               | 107 |
| 3. Simulation des rejets de saumure de la station de Fouka 1 .....                                                           | 109 |
| 3.1. Présentation des outils numériques.....                                                                                 | 109 |
| 3.1.1. Présentation du RO-Discharge-Calculator.....                                                                          | 109 |
| 3.1.2. Présentation du modèle CORMIX .....                                                                                   | 109 |
| 3.2. Paramètres de calcul.....                                                                                               | 110 |
| 4. Présentation et interprétation des résultats de simulation.....                                                           | 111 |
| 4.1. Caractérisation des jets de saumure.....                                                                                | 111 |
| 4.2. Analyse des résultats de simulation.....                                                                                | 115 |

|                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.2.1. Dilution en champ proche selon la vitesse du courant .....  | 115 |
| 4.2.2. Dilution en champ proche selon le nombre de diffuseurs..... | 116 |
| 4.2.3. Dilution en champ proche selon l'angle de rejet.....        | 117 |
| 4.2.4. Dilution en champ lointain selon la vitesse du courant..... | 118 |
| 4.3. Optimisation de l'émissaire .....                             | 119 |
| CONCLUSION .....                                                   | 121 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....                                  | 125 |
| ANNEXES .....                                                      | 180 |

## LISTE DES ABRÉVIATIONS

| Abréviation | Signification |
|-------------|---------------|
|-------------|---------------|

|                        |                                                                                                    |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ACP</b>             | Analyse en Composantes Principales                                                                 |
| <b>ADE</b>             | ADE Algérienne Des Eaux                                                                            |
| <b>BEA</b>             | Bile Esculine Azide                                                                                |
| <b>CAH</b>             | Classification Ascendante Hiérarchique                                                             |
| <b>CORMIX</b>          | Cornell Mixing Zone Expert System (Système expert de modélisation des zones de mélange)            |
| <b>CV</b>              | Coefficient de Variation                                                                           |
| <b>DBO</b>             | Demande Biochimique en Oxygène                                                                     |
| <b>DCO</b>             | Demande Chimique en Oxygène                                                                        |
| <b>ED</b>              | Électrodialyse                                                                                     |
| <b>EDR</b>             | Electrodialysis Reversal (Électrodialyse à inversion de polarité)                                  |
| <b>EIE</b>             | Évaluation d'Impact Environnemental                                                                |
| <b>GIS</b>             | Geographic Information System (Système d'Information Géographique)                                 |
| <b>IDW</b>             | Inverse Distance Weighting (Pondération par distance inverse)                                      |
| <b>MD</b>              | Membrane Distillation (Distillation membranaire)                                                   |
| <b>MED</b>             | Multi-Effect Distillation (Distillation à multiples effets)                                        |
| <b>MES</b>             | Matières En Suspension                                                                             |
| <b>MLD</b>             | Minimisation des Rejets Liquides                                                                   |
| <b>MO</b>              | Matière Organique                                                                                  |
| <b>MOP</b>             | Matière Organique Particulaire                                                                     |
| <b>MSF</b>             | Multi-Stage Flash (Distillation par détente successive)                                            |
| <b>NA</b>              | Non Analysé                                                                                        |
| <b>NF</b>              | Nanofiltration                                                                                     |
| <b>OD</b>              | Oxygène Dissous                                                                                    |
| <b>OI</b>              | Osmose Inverse                                                                                     |
| <b>ONM</b>             | Office National de Météorologie                                                                    |
| <b>PCA</b>             | Principal Component Analysis (Analyse en Composantes Principales)                                  |
| <b>RO</b>              | Reverse Osmosis (Osmose inverse)                                                                   |
| <b>RS</b>              | Station de Référence                                                                               |
| <b>SED</b>             | Single Effect Distillation (Distillation à simple effet)                                           |
| <b>SIG</b>             | Système d'Information Géographique                                                                 |
| <b>SWAN</b>            | Simulating Wave Nearshore (Modèle de simulation des vagues côtières)                               |
| <b>SWRO</b>            | Seawater Reverse Osmosis (Osmose inverse d'eau de mer)                                             |
| <b>TDS</b>             | Total Dissolved Solids (Solides dissous totaux)                                                    |
| <b>USEPA</b>           | United States Environmental Protection Agency (Agence américaine de protection de l'environnement) |
| <b>VC</b>              | Vapor Compression (Distillation par compression de vapeur)                                         |
| <b>X<sub>max</sub></b> | Position horizontale de la crête de la ligne centrale (m)                                          |
| <b>X<sub>i</sub></b>   | Position horizontale au point d'impact (m)                                                         |
| <b>Z<sub>max</sub></b> | Hauteur maximale d'élévation (m)                                                                   |



## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1 :</b> Tendence du dessalement au niveau mondial selon le nombre, la capacité totale et les unités de dessalement opérationnelles.....                                           | 6  |
| <b>Figure 2 :</b> Localisation géographique des stations de dessalement en fonction de la capacité de production et du secteur d'activité .....                                             | 7  |
| <b>Figure 3 :</b> Schéma général du processus de dessalement basé sur les entrées et les sorties .....                                                                                      | 8  |
| <b>Figure 4 :</b> <i>Procédés de dessalement thermiques et membranaires</i> .....                                                                                                           | 9  |
| <b>Figure 5 :</b> <i>Technologies de dessalement utilisées dans le monde</i> .....                                                                                                          | 10 |
| <b>Figure 6 :</b> <i>Principe de l'osmose et de l'osmose inverse</i> .....                                                                                                                  | 11 |
| <b>Figure 7 :</b> <i>Structure interne d'un module spiralé</i> .....                                                                                                                        | 12 |
| <b>Figure 8 :</b> <i>Facteurs influençant la composition physicochimique de la saumure</i> .....                                                                                            | 14 |
| <b>Figure 9 :</b> Localisation géographique des méga stations de dessalement opérationnelles le long de la côte algérienne et leur capacité de production en m <sup>3</sup> /jour.....      | 22 |
| <b>Figure 10 :</b> Localisation géographique des stations monobloc de dessalement opérationnelles le long de la côte algérienne et leur capacité de production en m <sup>3</sup> /jour..... | 23 |
| <b>Figure 11 :</b> Localisation géographique des sites d'étude .....                                                                                                                        | 27 |
| <b>Figure 12 :</b> Localisation géographique de l'installation de dessalement de Palm-Beach .....                                                                                           | 28 |
| <b>Figure 13 :</b> Schéma général du procédé de dessalement par osmose inverse .....                                                                                                        | 29 |
| <b>Figure 14 :</b> <i>Diagramme fonctionnel de l'unité de dessalement de Palm-Beach</i> .....                                                                                               | 29 |
| <b>Figure 15 :</b> <i>Crépine du système de captage de l'usine de dessalement de Palm-Beach</i> .....                                                                                       | 30 |
| <b>Figure 16 :</b> <i>Illustration des filtres à sables de la station de dessalement de Palm-Beach</i> .....                                                                                | 31 |
| <b>Figure 17 :</b> <i>Représentation du système de microfiltration de la station de dessalement de Palm-Beach</i> .....                                                                     | 32 |
| <b>Figure 18 :</b> <i>Modules d'osmose inverse employés à la station de dessalement de Palm-Beach</i> .....                                                                                 | 32 |
| <b>Figure 19 :</b> <i>Rack de tubes de pression d'osmose inverse de la station de dessalement de Palm-Beach</i> .....                                                                       | 33 |
| <b>Figure 20 :</b> <i>Photographies des rejets en bord de mer de l'unité de dessalement de Palm-Beach</i> .....                                                                             | 34 |
| <b>Figure 21 :</b> Situation géographique de la station de dessalement de Fouka 1 et de la zone de rejet....                                                                                | 34 |
| <b>Figure 22 :</b> <i>Dispositif de prise d'eau de mer de la station de dessalement de Fouka 1</i> .....                                                                                    | 36 |
| <b>Figure 23:</b> Schéma des principales phases de prétraitement utilisée par la station de dessalement de Fouka 1 .....                                                                    | 36 |
| <b>Figure 24 :</b> <i>Représentation de la filière d'osmose inverse de l'unité de dessalement de Fouka 1</i> .....                                                                          | 37 |
| <b>Figure 25 :</b> <i>Illustration de l'émissaire de la station de Fouka 1 (Brahimi et Dine 2018)</i> .....                                                                                 | 38 |
| <b>Figure 26 :</b> Localisation des points de prélèvement autour de la zone de rejet de la station de dessalement de Palm-Beach.....                                                        | 40 |
| <b>Figure 27 :</b> Répartition spatiale des stations de prélèvement au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 .....                                                              | 41 |
| <b>Figure 28 :</b> Variation de la température de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach .....                                          | 51 |
| <b>Figure 29 :</b> Variation de la température de la saumure et de l'eau d'alimentation au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach .....                                               | 51 |
| <b>Figure 30 :</b> Variation de la salinité de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach .....                                             | 52 |
| <b>Figure 31 :</b> Variation de la salinité de la saumure et de l'eau d'alimentation au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach .....                                                  | 53 |
| <b>Figure 32 :</b> Variation de la conductivité de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach .....                                         | 53 |
| <b>Figure 33 :</b> Variation de la conductivité de la saumure et de l'eau d'alimentation au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach .....                                              | 54 |
| <b>Figure 34 :</b> Variation du pH de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach .....                                                      | 54 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 35 :</b> Variation du pH de la saumure et de l'eau d'alimentation au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach .....                                                                                                                                        | 55 |
| <b>Figure 36 :</b> Variation de l'oxygène dissous de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach .....                                                                                                                    | 56 |
| <b>Figure 37 :</b> Variation de l'oxygène dissous de la saumure et de l'eau d'alimentation au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach .....                                                                                                                         | 57 |
| <b>Figure 38 :</b> Variation de la turbidité de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach .....                                                                                                                         | 58 |
| <b>Figure 39 :</b> Variation de la turbidité de la saumure et de l'eau d'alimentation durant au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach .....                                                                                                                       | 58 |
| <b>Figure 40 :</b> <i>Variation de la matière en suspension de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach</i> .....                                                                                                      | 59 |
| <b>Figure 41 :</b> <i>Variation de la matière en suspension de la saumure et de l'eau d'alimentation au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach</i> .....                                                                                                           | 60 |
| <b>Figure 42 :</b> <i>Variation de la matière organique particulaire de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach</i> .....                                                                                             | 61 |
| <b>Figure 43 :</b> <i>Variation de la matière organique particulaire de la saumure et de l'eau d'alimentation au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach</i> .....                                                                                                  | 61 |
| <b>Figure 44 :</b> <i>Variation des teneurs en sels nutritifs de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach.</i> .....                                                                                                   | 63 |
| <b>Figure 45 :</b> <i>Variation des paramètres microbiologiques recherchés dans la saumure et l'eau d'alimentation de la station de Palm-Beach</i> .....                                                                                                                 | 64 |
| <b>Figure 46 :</b> <i>Résultats de l'étude qualitative et quantitative des groupes phytoplanctoniques inventoriés au niveau de la station de dessalement de Palm-Beach</i> .....                                                                                         | 67 |
| <b>Figure 47 :</b> Variation de la température, de la salinité, de la conductivité, du pH, de l'oxygène dissous, de la turbidité, des MES et des MOP du milieu marin récepteur pendant le fonctionnement de la station de dessalement de Palm-Beach.....                 | 72 |
| <b>Figure 48 :</b> Variation de la température, de la salinité, de la conductivité, de la turbidité, des MES et des MOP du milieu marin récepteur durant l'arrêt de la station de dessalement de Palm-Beach.....                                                         | 73 |
| <b>Figure 49 :</b> Variation des sels nutritifs des eaux de mer superficielles durant l'arrêt de la station de dessalement de Palm-Beach .....                                                                                                                           | 75 |
| <b>Figure 50 :</b> Distribution des densités cellulaires totales (cell/l) des peuplements phytoplanctoniques des échantillons prélevés dans la zone de rejet de la station de dessalement de Palm-Beach.....                                                             | 76 |
| <b>Figure 51 :</b> Planche de quelques espèces identifiées au niveau des échantillons prélevés dans la station de dessalement de Palm-Beach et le milieu marin récepteur .....                                                                                           | 78 |
| <b>Figure 52 :</b> <i>Roses des vents annuelle et mensuelle de la station météorologique de Bou Haroun de 2005 - 2018. (a) mai, (b) août, (c) septembre, (d) décembre et (e) annuel (ONM, 2019)</i> .....                                                                | 82 |
| <b>Figure 53 :</b> <i>Champs des courants au voisinage de la station de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de mai 2016 (a), août 2016 (b), et septembre 2017(c).</i> .....                                                                                      | 83 |
| <b>Figure 54 :</b> <i>Champs des courants au voisinage de la station de Fouka 1 mesurés durant la campagne de décembre 2018</i> .....                                                                                                                                    | 84 |
| <b>Figure 55 :</b> <i>Rose des vagues représentant la hauteur significative des vagues et la direction au voisinage de la station de Fouka 1 de 2008 jusqu'à 2018</i> .....                                                                                              | 85 |
| <b>Figure 56 :</b> <i>Distribution spatiale de la température de surface des eaux de côtières au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de mai 2016 (a), septembre 2016 (b), août 2017(c) et décembre 2018 (d).</i> ..... | 88 |
| <b>Figure 57 :</b> <i>Distribution spatiale de la salinité de surface des eaux de côtières au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de mai 2016 (a), septembre 2016 (b), août 2017(c) et décembre 2018 (d).</i> .....    | 89 |

|                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Figure 58 :</b> <i>Distribution spatiale de la conductivité des eaux de surface au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de mai 2016 (a), septembre 2016 (b), août 2017(c) et décembre 2018 (d).</i> ..... | 90  |
| <b>Figure 59 :</b> <i>Distribution spatiale du pH des eaux de surface au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de mai 2016 (a), septembre 2016 (b), août 2017(c) et décembre 2018 (d).</i> .....              | 91  |
| <b>Figure 60 :</b> <i>Distribution spatiale de l'oxygène dissous dans les eaux de surface au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de mai 2016 (a), septembre 2016 (b), et août 2017(c).</i> .....            | 92  |
| <b>Figure 61 :</b> <i>Distribution spatiale des chlorures dans les eaux de surface au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de septembre 2016 (b), et août 2017(c).</i> .....                                 | 93  |
| <b>Figure 62 :</b> <i>Distribution spatiale des TDS dans les eaux de surface au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de septembre 2016 (b), et août 2017(c).</i> .....                                       | 93  |
| <b>Figure 63 :</b> <i>Distribution spatiale des MES dans les eaux de surface au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de mai 2016 (a), septembre 2016 (b), et août 2017(c).</i> .....                         | 94  |
| <b>Figure 64 :</b> <i>Cercles de corrélation des variables explicatives étudiés au niveau du site de la station de dessalement de Palm-Beach</i> .....                                                                                                        | 97  |
| <b>Figure 65 :</b> <i>Distribution des paramètres étudiés au niveau du site de la station de dessalement de Fouka 1 sur le plan factoriel PC1 et PC2</i> .....                                                                                                | 101 |
| <b>Figure 66 :</b> <i>Distribution des paramètres étudiés au niveau du site de la station de dessalement de Fouka 1 sur le plan factoriel PC1 et PC2</i> .....                                                                                                | 103 |
| <b>Figure 67 :</b> <i>Représentation schématique d'un jet à flottabilité négative d'un émissaire marin installé sur un fond incliné</i> .....                                                                                                                 | 108 |
| <b>Figure 68 :</b> <i>Trajectoires d'un jet de saumure pour différents angles de rejet</i> .....                                                                                                                                                              | 113 |
| <b>Figure 69 :</b> <i>Évolution de la portée horizontale <math>X_{max}</math> (a), de la hauteur maximale <math>Z_{max}</math> (b), et de la zone d'influence (c) en fonction de l'angle</i> .....                                                            | 114 |
| <b>Figure 70 :</b> <i>Évolution de la salinité en fonction de la distance en champ proche selon la vitesse du courant ambiant</i> .....                                                                                                                       | 116 |
| <b>Figure 71 :</b> <i>Évolution de la salinité en fonction de la distance en champ proche selon le nombre de diffuseurs</i> .....                                                                                                                             | 117 |
| <b>Figure 72 :</b> <i>Évolution de la salinité en fonction de la distance en champ proche selon l'angle de rejet</i> .....                                                                                                                                    | 118 |
| <b>Figure 73 :</b> <i>Évolution de la salinité en fonction de la distance en champ lointain selon la vitesse du courant ambiant porté</i> .....                                                                                                               | 119 |

## LISTE DES TABLEAUX

|                                                                                                                                                                                       |          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Tableau 1 :</b> Principaux procédés de dessalement d'eau                                                                                                                           | 9        |
| <b>Tableau 2 :</b> Consommation énergétique des stations de dessalement selon le type de procédé                                                                                      | 13       |
| <b>Tableau 3 :</b> Émissions atmosphériques des stations de dessalement pour la production d'un m <sup>3</sup> d'eau dessalée                                                         | 13       |
| <b>Tableau 4 :</b> Composition chimique de la saumure produite par les stations de dessalement                                                                                        | 15       |
| <b>Tableau 5 :</b> Produits chimiques retrouvés dans les rejets des usines de dessalement                                                                                             | 18       |
| <b>Tableau 6 :</b> Impact de la saumure issue des installations de dessalement sur les écosystèmes marins                                                                             | 21       |
| <b>Tableau 7 :</b> Liste des stations de dessalement installées en Algérie                                                                                                            | 24       |
| <b>Tableau 8 :</b> Cas d'études sur les impacts environnementaux du dessalement en Algérie                                                                                            | 25       |
| <b>Tableau 9 :</b> Collecte des échantillons, méthodes de conservation et mesures réalisées pendant les campagnes                                                                     | 42       |
| <b>Tableau 10 :</b> Milieux d'isolement et conditions d'incubation des germes recherchés                                                                                              | 46       |
| <b>Tableau 11 :</b> Qualité physico-chimique de l'eau de mer brute et de la saumure concentrée de l'unité de Palm-Beach                                                               | 50       |
| <b>Tableau 12 :</b> Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques mesurés dans le milieu marin récepteur au voisinage de la station de dessalement de Palm-Beach         | 68       |
| <b>Tableau 13 :</b> Statistiques descriptives des résultats d'analyse des sels nutritifs effectuées dans les eaux de surface au voisinage de la station de dessalement de Palm- Beach | 74       |
| <b>Tableau 14 :</b> Propriétés physico-chimiques de l'eau d'alimentation et des rejets de saumures de la station de                                                                   | 80       |
| <b>Tableau 15 :</b> Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques de l'eau de mer de surface au voisinage de la station de Fouka 1                                       | 86<br>87 |
| <b>Tableau 16 :</b> Matrice de corrélation des variables étudiées au niveau du site de la station de dessalement de Palm- Beach                                                       | 96       |
| <b>Tableau 17 :</b> Matrice de corrélation des variables mesurées en mai 2016 ( $\alpha = 0.05$ level)                                                                                | 98       |
| <b>Tableau 18 :</b> Matrice de corrélation des variables mesurées en septembre 2016 ( $\alpha = 0.05$ level)                                                                          | 99       |
| <b>Tableau 19 :</b> Matrice de corrélation des variables mesurées en août 2017 ( $\alpha = 0.05$ level)                                                                               | 100      |
| <b>Tableau 20 :</b> Matrice de corrélation des variables mesurées en décembre 2018 ( $\alpha = 0.05$ level)                                                                           | 100      |
| <b>Tableau 21 :</b> Matrice de corrélation des variables mesurées en décembre 2018 ( $\alpha = 0.05$ level)                                                                           | 102      |
| <b>Tableau 22 :</b> Méthodes d'élimination et de gestion de la saumure produite par les installations de dessalement                                                                  | 106      |
| <b>Tableau 23 :</b> Données d'entrée pour les simulations CORMIX                                                                                                                      | 111      |
| <b>Tableau 24 :</b> Paramètres clés mesurés à l'aide du RO- Discharge-Calculator                                                                                                      | 111      |
| <b>Tableau 25 :</b> Paramètres caractéristiques du jet de saumure ( $Z_{max}$ , $X_{max}$ , $Z/X$ , zone d'influence) pour différents angles de rejet                                 | 112      |

# ***INTRODUCTION***

## INTRODUCTION

L'Algérie, à l'instar des nations du Maghreb est souvent confrontée aux pénuries d'eau.

Cette situation résulte de la sécheresse récurrente et de la baisse des précipitations annuelles (estimée à 40 % depuis les années 1970), en raison de son climat aride et semi-aride, malgré le climat méditerranéen dont bénéficie le littoral (HAMLAT et GUIDOUM, 2018; OUHAMDOUCH *et al.*, 2018). Ainsi que de la pression anthropique provoquée par l'essor démographique et industriel, et la dégradation des ressources en eau (DROUCHE *et al.*, 2012; HAIED *et al.*, 2023; SADI et KEHAL, 2003).

Les tensions exercées sur les ressources hydriques devraient s'intensifier à cause des effets du changement climatique (augmentation des températures, modification des régimes pluviométriques) (ELAMINE *et al.*, 2022; TAREKEGN *et al.*, 2022).

Afin d'assurer la sécurité hydrique, les stratégies adoptées se sont concentrées sur la diversification des approvisionnements. Cela comprend des méthodes non conventionnelles comme la réutilisation des eaux usées, la réalimentation artificielle des aquifères et la collecte des eaux pluviales, ainsi que l'exploitation des ressources non douces par déminéralisation ou dessalement des eaux de mer ou saumâtre (FARSI et ROSEN, 2022; HUSSAIN *et al.*, 2019; MOROTE *et al.*, 2019; SALAMI *et al.*, 2016).

Depuis 2002 et en réponse aux sécheresses répétées, l'Algérie a engagé un vaste programme de dessalement. Il s'agit d'un programme d'urgence qui a conduit à la construction de plusieurs usines le long de ses 1 600 km de côtes, avec l'objectif de couvrir au moins 50 % de la consommation nationale en eau d'ici 2030 (AMMOUR *et al.*, 2018; BESSENASSE *et al.*, 2010; DROUCHE *et al.*, 2022).

La majorité des unités opérationnelles reposent sur le procédé d'osmose inverse (AL FODHIL *et al.*, 2019).

Actuellement, pas moins de 11 usines de grande capacité ; produisant de 70 000 à 500 000 m<sup>3</sup>/jour sont en service, auxquelles s'ajoutent sept petites unités. En 2021, la production totale s'élevait à 561 millions de m<sup>3</sup>/an, représentant environ 17 % de la consommation nationale (NAIMI-AIT-AOUDIA *et al.*, 2014; OULMANE, 2022).

Bien que le dessalement soit une solution stratégique, il soulève de sérieuses préoccupations environnementales. Ses effets négatifs sont multiples : altération du paysage (utilisation des terres), bilan énergétique défavorable, pollutions acoustiques et atmosphériques, et surtout, un

impact majeur sur le milieu marin (ALSHAHRI, 2017; AZIZ et HANAFIAH, 2021; BAALLOUSHA, 2016; YANG et WANG, 2023).

L'impact écologique est directement attribuable au rejet de saumure, dont les caractéristiques (composition et débit) varient selon le procédé employé (ALAMEDDINE et EL-FADEL, 2007; FERNÁNDEZ-TORQUEMADA et LUIS SÁNCHEZ-LIZASO, 2007; MOHAMED *et al.*, 2005).

Les effluents résultants du procédé d'osmose inverse sont caractérisés par une teneur en sels extrêmement élevée, atteignant 1,5 à 2 fois la concentration initiale de l'eau de mer (Cambridge *et al.*, 2017; Sahu, 2021). Ils peuvent contenir des produits de traitement tels que les agents antitartres, les anti-encrassements, la chaux et des biocides (comme le chlore et l'acide sulfurique) utilisés lors des étapes de pré- et post-traitement, et des métaux lourds (nickel, cuivre, molybdène, fer, zinc) issus de la corrosion (AL-MUTAZ, 1991; ROBERTS *et al.*, 2010; KRESS *et al.*, 2020). Ces substances sont souvent déversées sans traitement dans le milieu marin (LOYA-FERNÁNDEZ *et al.*, 2012).

Il est établi que la saumure dense tend à stagner sur le fond marin, dégradant ainsi l'écosystème local et perturbant les facteurs abiotiques comme la salinité, le pH, et la température (BELATOUI *et al.*, 2017; MISSIMER et MALIVA, 2018).

S'inscrivant dans la continuité des travaux menés en Algérie sur les impacts du dessalement (AMOKRANE et SALMI, 2021; BELATOUI *et al.*, 2017; BELKACEM, 2017; BENAÏSSA *et al.*, 2020, BENAÏSSA *et al.*, 2017; FILALI *et al.*, 2018), cette recherche s'intéresse à deux sites distincts : l'installation monobloc de Palm-Beach et l'installation de grande capacité de Fouka 1. Les objectifs principaux de cette étude sont les suivants :

- déterminer la nature et les propriétés des effluents produits par les deux stations de dessalement ;
- caractériser l'état initial et l'évolution de la qualité du milieu marin récepteur ;
- évaluer l'étendue et les conséquences environnementales des rejets dans la zone de mélange ;
- modéliser la dispersion du panache de saumure pour comprendre sa dynamique ;
- proposer des mesures pour optimiser l'efficacité du système d'évacuation des rejets de l'installation de Fouka 1.

La démarche méthodologique s'appuie sur la collecte et l'analyse de données *in situ*, portant à la fois sur les propriétés physico-chimiques, microbiologiques et biologiques des effluents et des

masses d'eau réceptrices, ainsi que sur l'étude du comportement du panache de ces effluents par modélisation.

Afin de dégager des tendances et d'identifier les différences significatives entre les variables mesurées, nous avons eu recours à des méthodes statistiques multivariée.

L'Analyse en Composantes Principales, la classification Hiérarchique, et l'analyse spatiale ont été mobilisées pour évaluer les corrélations et structurer le regroupement des données selon les degrés d'exposition aux rejets, visualiser l'étendue de l'influence des rejets de saumure et identifier les facteurs agissant sur la variabilité spatiale des paramètres étudiés.

Cette recherche apporte des contributions originales majeures en fournissant des données inédites sur la composition des effluents de deux unités de dessalement algériennes. Elle établit également l'évaluation de leurs éventuels impacts sur le milieu marin récepteur, qui pourrait constituer une base scientifique pour l'élaboration de réglementations sur les effluents des installations de dessalement.

Le document présent est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre introductif dresse un panorama complet du dessalement, en examinant les technologies existantes, leurs contraintes opérationnelles et leurs répercussions environnementales, avec un éclairage particulier sur le contexte algérien.

Dans le deuxième chapitre, sont décrit les deux sites d'étude (stations de dessalement de Palm-Beach et Fouka 1), leurs caractéristiques techniques, la stratégie d'échantillonnage, les techniques d'analyses (physico-chimiques et microbiologiques, analyses statistique et spatiale) employées.

Le troisième chapitre est dédié au traitement et à l'analyse des données collectées in situ sur les deux sites. Cette analyse englobe l'étude de la qualité des effluents de saumure, la caractérisation des propriétés des eaux de surface, l'étude des communautés phytoplanctoniques et l'évaluation globale des impacts sur l'écosystème marin récepteur.

Enfin, dans le quatrième chapitre en complément à l'analyse des données de terrain, nous avons eu recours à la modélisation numérique afin d'étudier le comportement du panache de saumure de l'installation de Fouka 1.

Ce dernier volet de l'étude est consacré à la simulation de la dispersion des effluents, à l'évaluation objective de l'efficacité du système de rejet existant, et à l'identification de pistes d'amélioration en vue d'optimiser la performance de l'émissaire de cette station de dessalement.



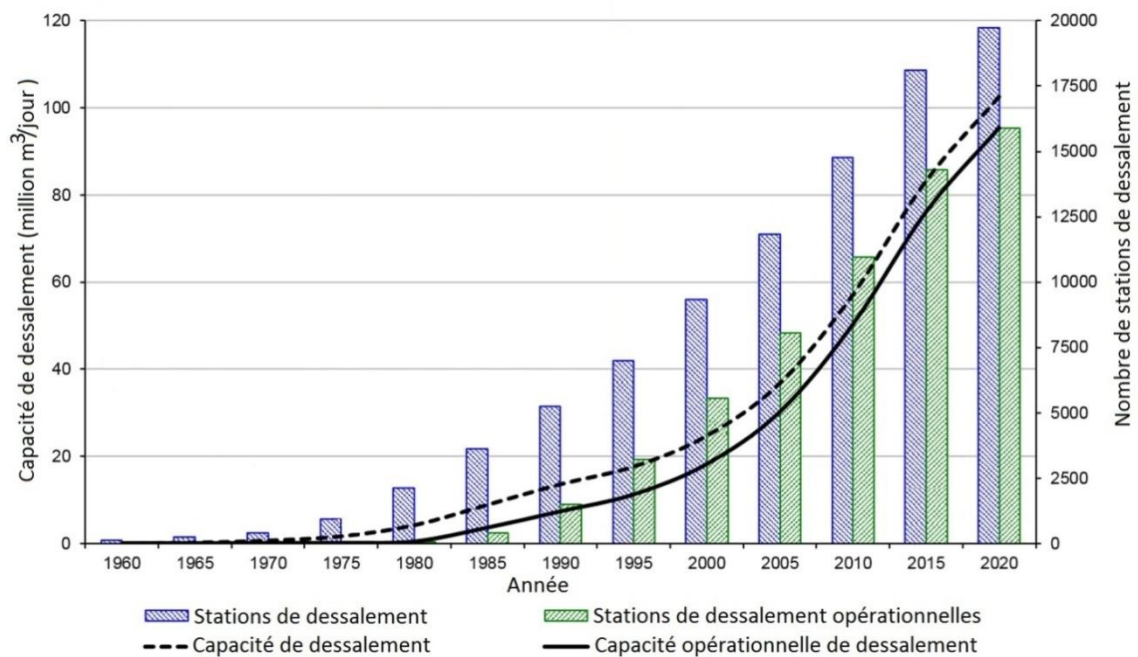
***CHAPITRE I :***  
***SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE***

## 1. Notions générales sur le dessalement

Le processus de dessalement, également désigné par les termes de désalinisation ou de dessalage, est une technique qui remonte à l'Antiquité (OMERSPAHIC *et al.*, 2022). Déjà utilisée par les navigateurs grecs pour approvisionner leur flotte (YFANTIS et YFANTIS, 2020), cette méthode contemporaine d'obtention d'eau potable permet l'élimination des sels et minéraux dissous, notamment ceux présents dans les eaux marines et saumâtres (FAWAL, 2016).

Aujourd'hui, grâce aux progrès technologiques dans le domaine du dessalement, il est possible de fournir plus de 100 million de mètre cube d'eau par jour.

La capacité de production mondiale de dessalement a connu une croissance exponentielle, passant de 326 m<sup>3</sup>/jour en 1945 à plus de 35 millions de m<sup>3</sup>/jour en 2004 (ZOTALIS *et al.*, 2014). D'après (JONES *et al.*, 2019), la capacité totale des installations de dessalement a connu une croissance supérieure à 9 % par an entre 2010 et 2016 (Figure 1).



**Figure 1 :** Tendence du dessalement au niveau mondial selon le nombre, la capacité totale et les unités de dessalement opérationnelles (JONES *et al.*, 2019)

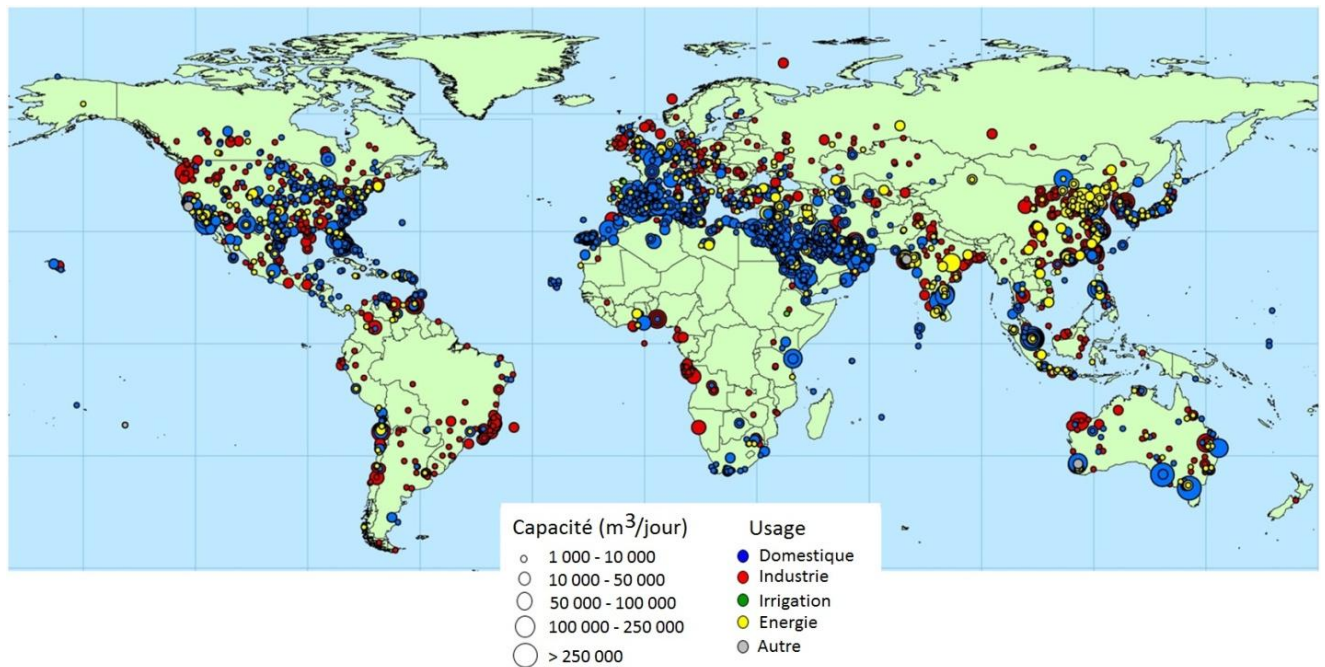
En 2015, plus de 18 426 usines de dessalement étaient installées dans 150 pays et fournissaient près de 86,8 millions de mètres cubes d'eau douce chaque jour à 300 millions de personnes (ELSAIE *et al.*, 2022).

En 2019, la production mondiale s'élevait à environ 95 millions de m<sup>3</sup> / jour d'eau dessalée et est passée en 2020 à 114,9 millions de mètres cubes d'eau par jour (EKE *et al.*, 2020).

Le marché du dessalement ne cesse de s'accroître, notamment au Moyen-Orient et en Afrique du

## CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Nord (MENA), où ces installations génèrent principalement de l'eau destinée à la consommation humaine (Figure 2) (ANGELAKIS *et al.*, 2021; JONES *et al.*, 2019).



**Figure 2 :** Localisation géographique des stations de dessalement en fonction de la capacité de production et du secteur d'activité (JONES *et al.*, 2019)

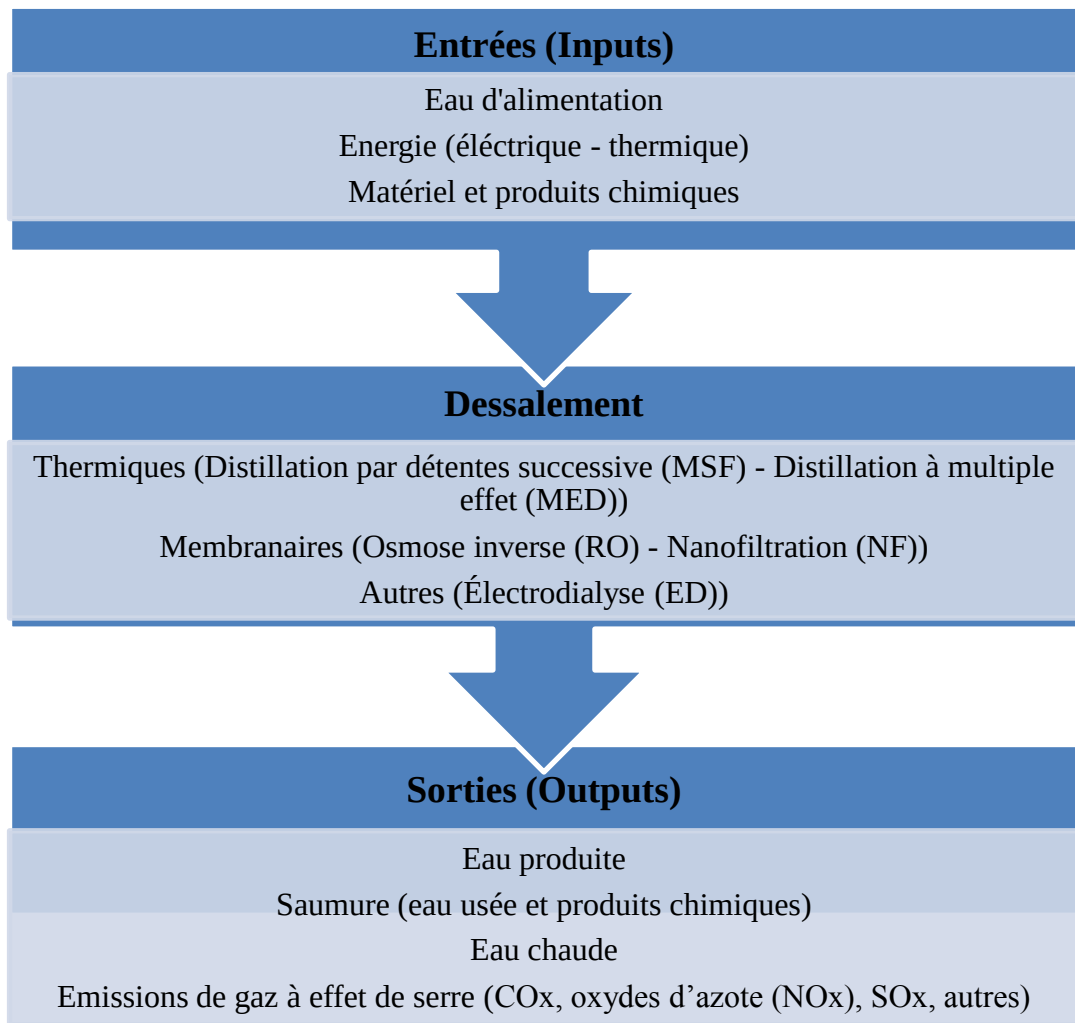
### 2. Technologies de dessalement de l'eau de mer

Le concept de dessalement englobe un large éventail de procédés d'élimination ou de séparation des sels des eaux naturelles de salinités différentes, à l'exception de la mer morte (BASHITALSHAER, 2009; DUNGLAS, 2014).

Le processus de dessalement de l'eau se fait habituellement en quatre phases :

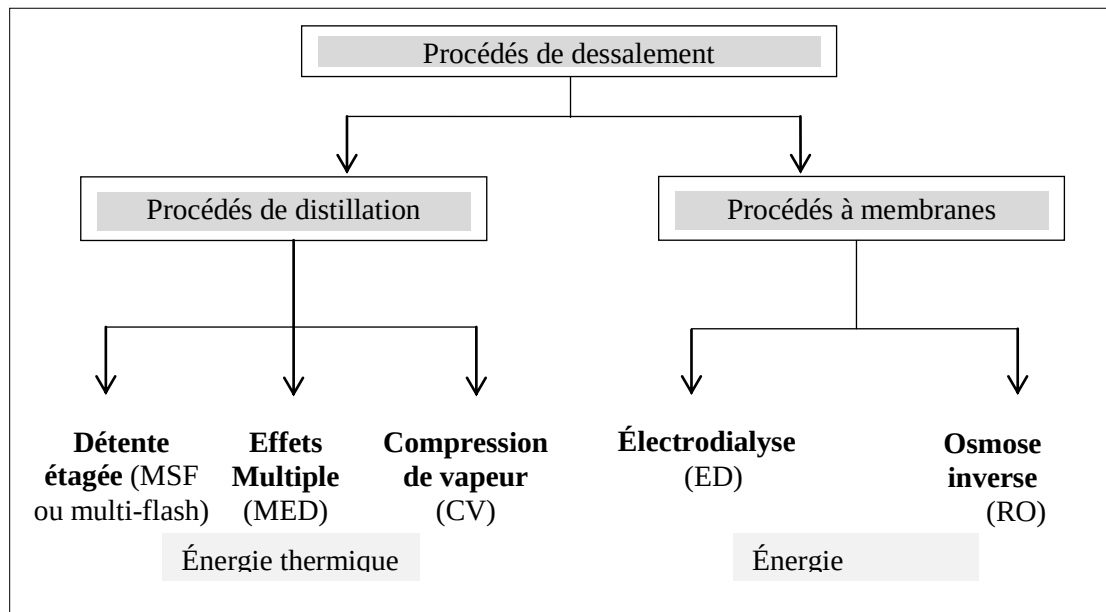
- la captation ou la prise de l'eau brute (eau de mer ou eau saumâtre) ;
- le prétraitement, pour préparer l'eau ;
- le procédé de dessalement proprement dit ;
- le post-traitement ou la reminéralisation, essentiel pour ajuster la qualité de l'eau produite (permeat) avant distribution (MAUREL, 1979).

Les différentes phases du processus en termes d'entrées et de sorties, sont schématisées dans la Figure 3.



**Figure 3 :** *Schéma général du processus de dessalement basé sur les entrées et les sorties*  
(ELSAID et al., 2020)

Les procédés de dessalement commercialisés sont généralement groupés en deux grandes catégories : procédés thermiques et procédés membranaires (Figure 4) (FAR et al., 2022; OMERSPAHIC et al., 2022). D'autres technologies existent ; telles que : l'électrodialyse, la congélation, la distillation solaire directe, la nano-filtration, l'électro-déionisation, et l'ultrafiltration, mais sont peu utilisées ou en cours de développement (IHSANULLAH et al., 2021).



**Figure 4 :** *Procédés de dessalement thermiques et membranaires* (MAUREL, 2006)

Une liste non-exhaustive des différentes techniques de dessalement existantes est donnée dans le Tableau 1. Celles-ci peuvent être classées en fonction de l'énergie utilisée : thermique, mécanique, électrique ou chimique, ou du procédé employé (ALKAIS I et al., 2017).

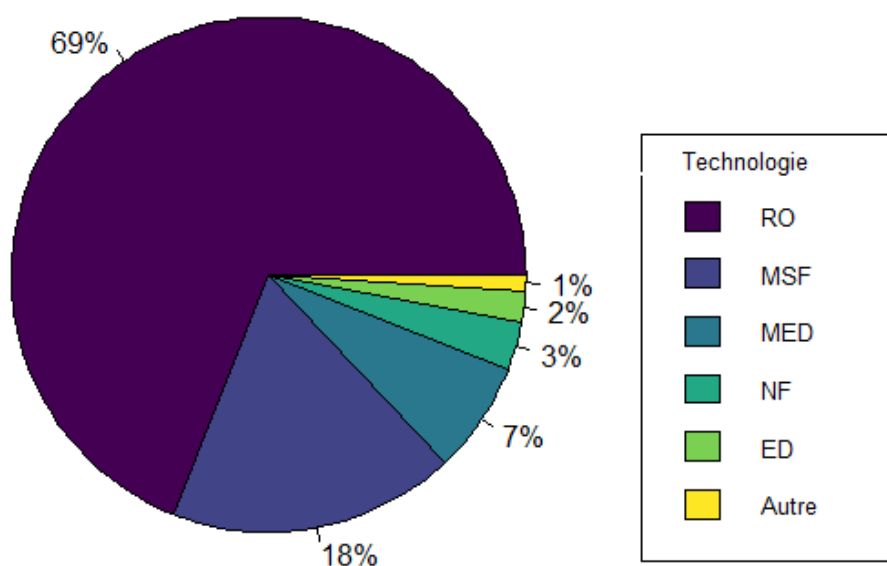
**Tableau 1:** *Principaux procédés de dessalement d'eau* (ALKAIS I et al., 2017; CURTO et al., 2021)

| Séparation    | Énergie    | Processus                 | Méthode                                   |
|---------------|------------|---------------------------|-------------------------------------------|
| Eau des sels  | Thermique  | Évaporation               | Distillation simple                       |
|               |            |                           | Distillation à multiple effet (MED)       |
|               |            |                           | Thermo-compression à vapeur               |
|               |            |                           | Distillation par détente successive (MSF) |
|               |            |                           | Distillation solaire                      |
|               | Mécanique  | Filtration et évaporation | Congélation                               |
|               |            |                           | Formation d'hydrates                      |
|               |            |                           | Distillation par membranes                |
|               |            |                           | Compression mécanique de vapeur           |
|               |            |                           | Osmose inverse (RO)                       |
| Sels de l'eau | Électrique | Filtration sélective      | Nanofiltration (NF)                       |
|               |            |                           | Électrodialyse (ED)                       |
|               |            |                           | Échange d'ions                            |

## CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

À l'échelle globale, l'osmose inverse et la distillation par détente successives sont les procédés les plus utilisés (Figure 5). En effet, sur les 16 000 stations de dessalement opérationnelles, le procédé d'osmose inverse représente la majorité (69 %) du volume total d'eau dessalée produit à l'échelle mondiale avec une capacité de production estimée à 65,5 millions de mètres cubes par jour (JONES et al., 2019).

Ce procédé est largement employé surtout en raison de sa faible consommation énergétique (MUÑOZ et al., 2023).



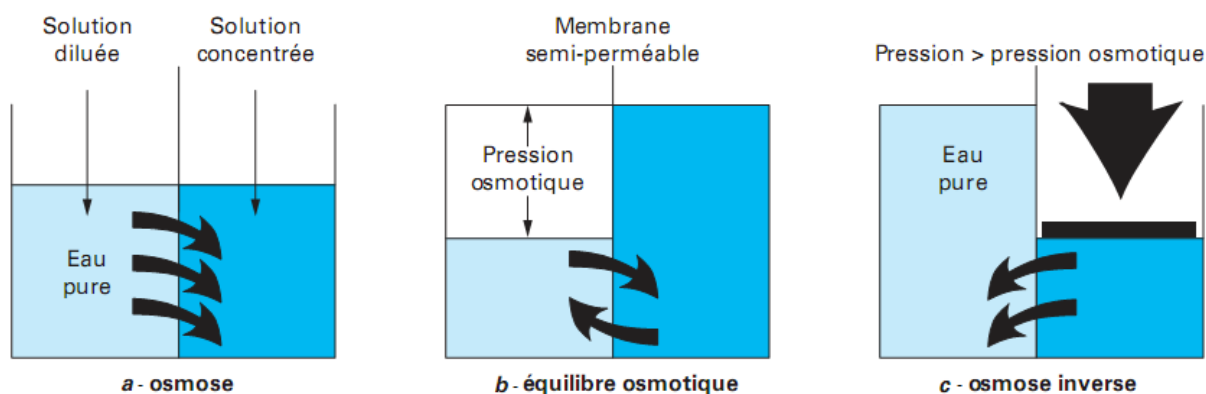
**Figure 5 :** Technologies de dessalement utilisées dans le monde (JONES et al., 2019)

### 3. Principe de l'osmose inverse (OI, Reverse Osmosis en anglais)

L'osmose est un processus physique au cours duquel le solvant circule de manière spontanée à travers une membrane semi-perméable, dans le but d'égaliser les concentrations en soluté de chaque côté (BERLAND et JUERY, 2002).

Lorsqu'elle est interposée entre deux solutions de salinités distinctes et soumises à une pression identique, la membrane induit un mouvement spontané du solvant. L'eau migre ainsi naturellement du milieu le moins concentré vers le milieu le plus concentré, sous l'effet de la pression osmotique naturelle (Figure 6-a), laquelle peut atteindre environ 24,1 bars pour une eau dont la salinité est de l'ordre de 35 g/l.

Pour obtenir le phénomène d'osmose inverse (OI), une pression externe supérieure à la pression osmotique doit être exercée sur la solution la plus concentrée (Figure 6-c). Sous cette contrainte, le sens de circulation de l'eau est inversé, permettant au flux d'eau pure de migrer vers la solution diluée. Le traitement de l'eau de mer requiert des pressions particulièrement élevées, souvent situées entre 54 et 80 bars (MAUREL, 2007; MOUDJEBER, 2015).



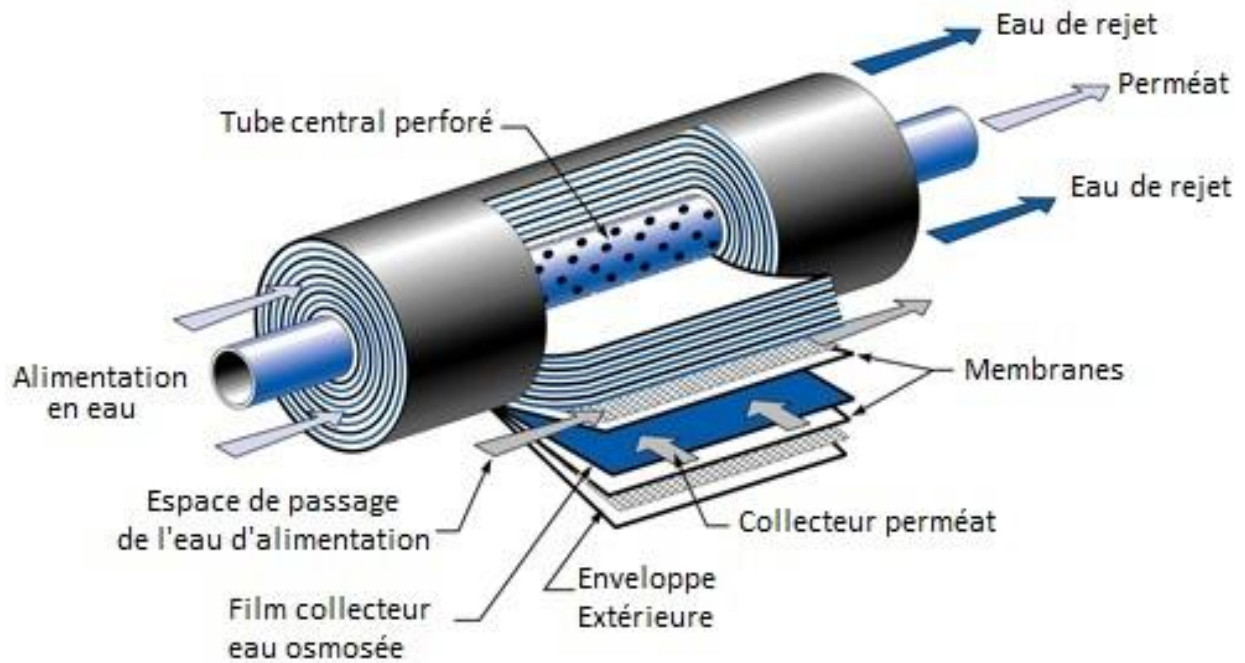
**Figure 6 :** *Principe de l'osmose et de l'osmose inverse (AIMAR et al, 2010)*

Le dessalement par osmose inverse (OI) repose sur l'utilisation de membranes semi-perméables intégrées dans des modules. Les configurations les plus courantes sont de type spirale ou fibres creuses (Figure 7) (Liou, 1998). Contrairement aux membranes utilisées en électrodialyse, qui sont imperméables à l'eau, les membranes d'OI agissent comme des barrières sélectives, retenant efficacement les sels dissous et les matières organiques (DANIS, 2003).

Cependant, les membranes d'OI présentent une résistance chimique limitée en raison de leur composition organique. Le fonctionnement optimal de ces membranes est soumis à des contraintes opérationnelles strictes. Elles ne sont stables que dans une gamme de pH étroite, typiquement entre 2 et 11, tout dépassement pouvant entraîner l'hydrolyse des liaisons amides. De surcroît, la température de l'eau d'alimentation doit impérativement être maintenue en dessous de 50°C (CHAUFER *et al.*, 1998; LIOU, 1998).

En pratique, ce procédé sépare les substances dissoutes d'une solution saline soumise à pression en forçant l'eau pure à traverser la membrane. Pendant la diffusion de l'eau, la salinité de la fraction résiduelle (le concentrât) s'élève. Un rejet constant d'une partie de l'eau d'alimentation est donc requis. Cette évacuation de la saumure est essentielle pour prévenir l'entartrage et l'encrassement, qui résulteraient de la précipitation des sels sursaturés et de l'augmentation conséquente de la pression osmotique à l'interface de la membrane (DACH, 2008; PNUE, 2001).

Enfin, afin d'améliorer l'efficacité énergétique, les installations de dessalement par OI sont souvent équipées de systèmes destinés à récupérer l'énergie hydraulique du concentrât sous haute pression. Cette récupération est typiquement effectuée au moyen de turbines Pelton ou de systèmes échangeurs de pression (DANIS, 2003; MAUREL, 2007).



**Figure 7 :** *Structure interne d'un module spirale* (WAGNER, 2001)

#### 4. Inconvénients de la technologie de dessalement

En dépit des bénéfices indéniables du dessalement et sa contribution essentielle aux ressources en eau, cette technologie soulève d'importantes problématiques liées à son empreinte environnementale (PORTO PEREIRA *et al.*, 2024; ROSNER *et al.*, 2023).

En effet, les technologies de dessalement présentent plusieurs inconvénients majeurs, principalement liés à la nature des rejets : la saumure concentrée (qui peut être surchauffée), la consommation énergétique considérable des usines, responsable des émissions de gaz à effet de serre, ainsi que le rejet des effluents contenant les produits chimiques utilisés pour le traitement de l'eau d'alimentation (BOMBAR *et al.*, 2016; KENIGSBERG *et al.*, 2020; ROBERTS *et al.*, 2010).

##### 4.1. Émissions atmosphériques

Le dessalement est une industrie énergivore (Tableau 2). Le recours fréquent aux énergies fossiles pour (Bombar *et al.*, 2016), est la cause directe d'émissions importantes de polluants atmosphériques (Tableau 3). Les substances émises sont composées de divers contaminants gazeux, incluant notamment l'oxyde de soufre (SOx), l'oxyde d'azote (NOx), du monoxyde de carbone (CO), ainsi que des résidus solides comme les poussières et les hydrocarbures imbrûlés (AL-MUTAZ, 1991; DAWOUD ET AL MULLA, 2012).



**Tableau 2 :** *Consommation énergétique des stations de dessalement selon le type de procédé (DAWOUD et al., 2020)*

| Procédé                            | Énergie totale (kWh/m <sup>3</sup> ) |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| MSF (sans perte de chaleur)        | 55 – 57                              |
| MSF (avec perte de chaleur)        | 10 – 16                              |
| MED (sans perte de chaleur)        | 40 – 43                              |
| MED (avec perte de chaleur)        | 6 – 9                                |
| SWRO (eau de mer)                  | 3 – 6                                |
| SWRO (avec récupération d'énergie) | 2 – 3                                |
| BWRO                               | 0,5 – 2,5                            |
| Technologies innovantes/Hybride    | <2                                   |

Les émissions de gaz sont plus élevées pour les usines utilisant la distillation ; où la désaération est nécessaire contre la corrosion, que pour celles employant l'osmose inverse ; où l'on utilise des membranes de dégazage (PNUE, 2001).

**Tableau 3:** *Émissions atmosphériques des stations de dessalement pour la production d'un mètre cube d'eau (RALUY et al., 2006)*

| Technologie | CO <sub>2</sub> (kg) | SO <sub>x</sub> (g) | NO <sub>x</sub> (g) | Poussière/PM10 (g) |
|-------------|----------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| <b>RO</b>   | 1.78                 | 10.68               | 3.87                | 2.07               |
| <b>MED</b>  | 18.05                | 26.49               | 21.41               | 1.02               |
| <b>MSF</b>  | 23.41                | 23.41               | 27.92               | 2.04               |

**PM10 :** pour *Particulate Matter* de 10 micromètres ; désignent les particules fines en suspension dans l'air dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres.

#### 4.2. Rejets de saumure

L'effluent concentré, communément désigné sous le terme de saumure, constitue le flux de déchet le plus important généré par l'industrie du dessalement (ALAMEDDINE et EL-FADEL, 2007).

Des estimations révèlent qu'environ 142 millions de m<sup>3</sup> de saumure sont produites tous les jours, dont 100 millions de m<sup>3</sup>/jour sont produits au Moyen-Orient et en Afrique du Nord (JONES et al., 2019; SOLIMAN et al., 2021).

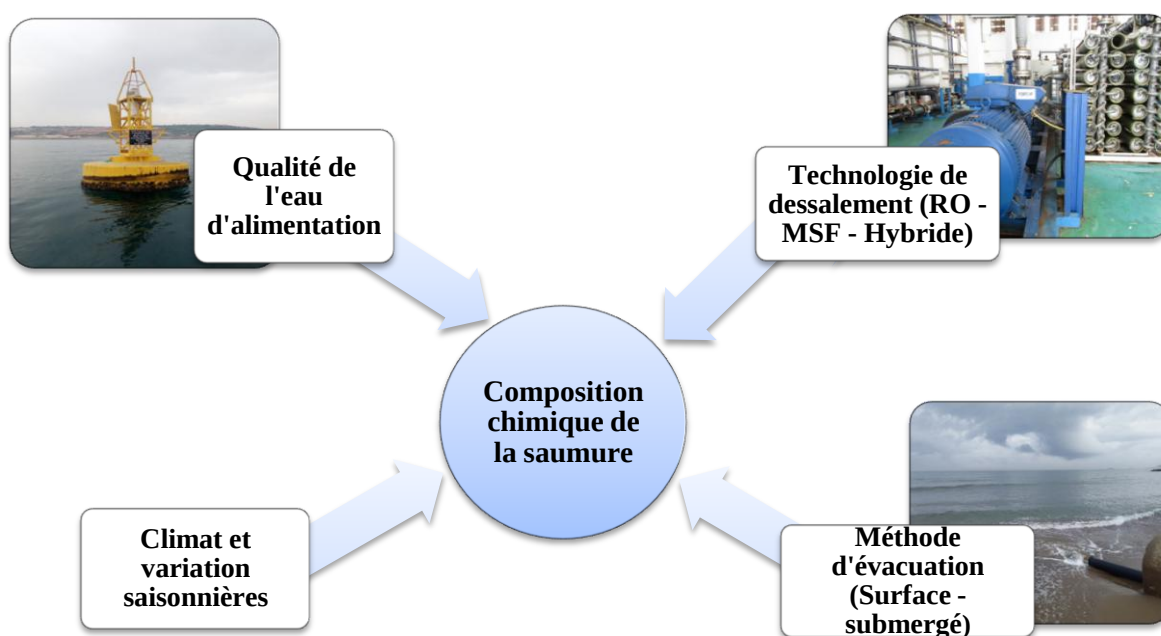
La saumure produite par les usines de dessalement d'osmose inverse est nettement plus concentrée en sels dissous (44 – 90 psu), elle en contient deux fois plus que l'eau d'alimentation

## CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

(ELIMELECH et PHILLIP, 2011; FERNÁNDEZ-TORQUEMADA *et al.*, 2009; MORTON *et al.*, 1997).

Dans le cas des procédés de distillation le concentrât peut avoir une concentration en sels 1,5 fois supérieure à celle de l'eau d'appoint. La saumure est diluée par l'eau de refroidissement ; contrairement aux procédés membranaires, ceci implique une augmentation de sa température d'environ 10 à 15°C (YOUNOS, 2005).

La saumure qui est un sous-produit inévitable de la technologie du dessalement a des caractéristiques qui dépendent de nombreux facteurs (Figure 8) tels que le procédé employé, les conditions climatiques et saisonnières, la qualité de l'eau d'alimentation ainsi que la mode d'évacuation des rejets (OMERSPAHIC *et al.*, 2022).



**Figure 8 :** Facteurs influençant la composition physicochimique de la saumure  
(OMERSPAHIC *et al.*, 2022)

Les caractéristiques physico-chimiques des rejets saumures de différentes stations de dessalement à travers le monde en fonction de la source d'eau et du procédé utilisé sont présentées dans le Tableau 4.

Les saumures caractérisées par une forte charge minérale et ionique ont une composition qui varie d'une région à l'autre. Les rejets issus de l'eau saumâtre avec le procédé d'osmose inverse se distinguent par exemple par une forte concentration en sulfates, alors que ceux issus de l'eau de mer sont très chargés en sodium ( $\text{Na}^+$ ) et chlorure ( $\text{Cl}^-$ ).

**Tableau 4:** Composition chimique de la saumure produite par les stations de dessalement (BELLO et al., 2021; BRIKA et al., 2016; OMERSPAHIC et al., 2022; SOLIMAN et al., 2021)

| Eau d'appoint | Station (localisation)            | Type de procédé | TDS (mg/L) | Ca <sup>2+</sup> (mg/L) | Mg <sup>2+</sup> (mg/L) | Na <sup>+</sup> (mg/L) | K <sup>+</sup> (mg/L) | Cl <sup>-</sup> (mg/L) | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L) | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L) |
|---------------|-----------------------------------|-----------------|------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Eau saumâtre  | Cameron Co. (US – Texas)          | RO              | 14 800     | 612                     | 326                     | 3 922                  | 62                    | 4 440                  | 3 964                                | 1 354                                |
| Eau saumâtre  | Calabri (Italie)                  | RO              | –          | 635                     | 2 020                   | 15 500                 | –                     | 28 800                 | 3 060                                | 199                                  |
| Eau de mer    | Lab scale<br>Hefei, Anhui (Chine) | RO              | –          | 0,306                   | 6,193                   | 159,4                  | 0,4830                | –                      | –                                    | –                                    |
| Eau de mer    | Local Plant (Qatar)               | MSF             | 57 400     | 521                     | 1 738                   | 18 434                 | 491                   | 32 127                 | 4 025                                | –                                    |
| Eau de mer    | Oman                              | RO              | 48 510     | 1 020                   | 1 980                   | 15 300                 | 668                   | 77 335                 | 6 139                                | 859                                  |
| Eau de mer    | Libye                             | RO              | 49 330     | 420                     | 1 740                   | 13 230                 | 452                   | 22 500                 | 2 800                                | 134                                  |
| Eau de mer    | Qidfa II<br>Fujairah (UAE)        | RO              | –          | 631                     | 2 096                   | 18 293                 | –                     | 31 905                 | 4 800                                | 149,5                                |
| Eau de mer    | Canary Islands (Espagne)          | RO              | –          | 814                     | 2 751                   | 20 657                 | 814                   | 37 639                 | 6 139                                | 452                                  |

### 4.3. Rejets chimiques

La saumure des installations de dessalement est problématique non seulement par sa concentration en sels, mais aussi par sa température potentiellement élevée et les divers contaminants chimiques qu'elle peut contenir. Ces derniers proviennent de plusieurs étapes du processus, incluant l'utilisation de produits lors du prétraitement et du post-traitement, les résidus des opérations de nettoyage des membranes, ainsi que les produits de la corrosion des circuits (LATTEMANN et HÖPNER, 2008).

Certains agents chimiques sont ajoutés pour empêcher la formation de mousses ou de tartre, ou encore éviter la détérioration des membranes et limiter la croissance bactérienne (Meerganz von MEDEAZZA, 2005).

On y retrouve des agents antitartre, des matières organiques, du chlore employé autant qu'agent anti-encrassement biologique dans les procédés d'osmose inverse, ainsi que des métaux lourds (HOEPNER et LATTEMANN, 2003; ROBERTS *et al*, 2010; SADHWANI *et al.*, 2005).

Les rejets de dessalement ne se résument pas à de l'eau fortement salée (saumure). Ils contiennent une grande variété de résidus chimiques. Le procédé d'osmose inverse rejette davantage de produits liés à la filtration, tandis que la distillation (MSF) génère des rejets liés à la température et au transit thermique (Tableau 5).

Les principaux produits chimiques susceptibles d'être retrouvés dans les effluents des stations de dessalement sont :

- Les additifs de prétraitement et de conditionnement de l'eau ; ils sont injectés en continu ou de manière régulière pour optimiser le fonctionnement de l'usine comme :
  - **Additifs anti-salissures (ex : Chlore)** : utilisés pour lutter contre l'encrassement biologique (*biofouling*) ; en osmose inverse ils sont neutralisés avant d'atteindre les membranes (pour éviter de les dégrader).
  - **Substances organiques** : présentes à faible concentration dans les procédés d'osmose inverse, leur concentration est variable en MSF, où l'on note principalement la formation de **trihalométhanes** (sous-produits de désinfection).
  - **Coagulants (ex : Chlorure de fer III) et Floculants (ex : Polyacrylamide)** : en osmose inverse ils sont indispensables lors de la phase de prétraitement de l'eau brute.

## CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Des résidus se retrouvent dans les eaux de lavage des filtres et peuvent colorer l'effluent s'ils ne sont pas neutralisés. Alors que dans les procédés de distillation par détentes successives (MSF) ils sont totalement absents.

- **Additifs antitartres (ex : Phosphates polymères) :** ils sont utilisés pour éviter les dépôts de calcaire sur les membranes ou les parois. Pour les deux technologies (RO et MSF), leur teneur dans les rejets reste globalement faible.
- **Agents antimousse (ex : Détergents, polyglycols) :** en osmose inverse ils sont absents, et sont présents à faible concentration en MSF pour éviter le moussage lié à l'ébullition de l'eau de mer.
- **Acides (Acide sulfurique -  $H_2SO_4$ ) :** l'acide sulfurique est souvent utilisé pour ajuster le pH et limiter le tartre. Dans les rejets des deux technologies l'acide sulfurique est absent (ou neutralisé), car l'acidité est rapidement consommée par l'alcalinité naturelle de l'eau de mer et qu'il se transforme souvent en produits bénins (eau et sulfates).  
Le pH final des rejets de saumure est donc proche de la normale, étant égal ou légèrement inférieur à celui du milieu récepteur.
- **Les contaminants liés à la corrosion et à la maintenance :** il s'agit de polluants non désirés issus de l'usure des installations ou des opérations de nettoyage ponctuel.  
On y retrouve des :
  - **Métaux lourds :** leur présence dans la saumure dépend directement de la qualité des matériaux de construction de l'usine. Pour les unités par RO il y a le risque de rejets de fer, de chrome, de nickel et de molybdène si l'acier inoxydable utilisé est de qualité médiocre. En MSF il y a un risque de rejets de cuivre et de nickel en raison de la corrosion des échangeurs thermiques si les matériaux sont inappropriés.
  - **Produits chimiques de nettoyage :** ce sont des rejets intermittents mais potentiellement agressifs issus du lavage chimique des installations. En osmose inverse les effluents contiennent des solutions très alcalines ( $11 < \text{pH} < 12$ ) ou très acides ( $2 < \text{pH} < 3$ ), accompagnées de détergents (laurylsulfate de sodium), d'agents complexants, d'oxydants (perborate de sodium) et de biocides (formaldéhyde). Alors que pour les procédés MSF les rejets consistent en une solution acide ( $\text{pH} = 2$ ) contenant des inhibiteurs de corrosion spécifiques comme le benzotriazole (Tableau 5).

**Tableau 5:** *Produits chimique retrouvés dans les rejets des usines de dessalement (MISSIMER et MALIVA, 2018)*

| Produit                                               | Osmose inverse (RO)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Distillation multi-étages flash (MSF)                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Additifs anti-salissures<br>(ex : chlore)             | Prévient l'encrassement biologique (neutralisé avant l'entrée de l'eau dans les membranes)                                                                                                                                                                                                                                          | Dosage d'environ 10 - 25% de l'eau d'alimentation                                                                                                                    |
| Substances organiques                                 | Faible concentration                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Concentration variable, principalement les trihalométhanes                                                                                                           |
| Coagulants<br>(ex : chlorure de fer III)              | Présents lors du traitement de l'eau d'alimentation. Peuvent colorer l'effluent s'ils ne sont pas neutralisés.                                                                                                                                                                                                                      | Absents (traitement non requis)                                                                                                                                      |
| Floculants<br>(ex : polyacrylamide)                   | Issus du traitement de l'eau d'alimentation et les résidus présents dans les eaux de lavage.                                                                                                                                                                                                                                        | Absents (traitement non requis)                                                                                                                                      |
| Additifs antitartres<br>(ex : phosphates polymère)    | Teneur généralement faible en dessous des niveaux toxiques                                                                                                                                                                                                                                                                          | Teneur généralement faible en dessous des niveaux toxiques                                                                                                           |
| Acide sulfurique<br>(H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) | Absent puisque l'acide utilisé se transforme au contact de l'eau de mer en des produits bénins (eau et sulfates). L'eau de mer, naturellement alcaline, assure la consommation de l'acidité, garantissant une neutralisation rapide. Le pH de la décharge est généralement égal ou légèrement inférieur à celui du milieu récepteur | Absent. L'acidité est consommée par l'eau de mer naturellement alcaline (le pH du rejet- est généralement égale ou légèrement inférieur à celui du milieu récepteur) |
| Agents antimousse<br>(ex : détergents et polyglyco)   | Absents (traitement non requis)                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Faible concentration                                                                                                                                                 |
| Métaux lourds                                         | Peut contenir des niveaux élevés de fer, chrome, nickel, molybdène si l'acier inoxydable utilisé est de qualité médiocre.                                                                                                                                                                                                           | Peut contenir des niveaux élevés de cuivre et de nickel si des matériaux inappropriés sont utilisés pour les échangeurs thermiques.                                  |
| Produits chimiques de nettoyage                       | Solutions alcalines (11 < pH < 12) ou acides (2 < pH < 3) et des additifs : détergents (laurylsulfate de sodium), agents complexants, oxydants (perborate de sodium), biocides (formaldéhyde)                                                                                                                                       | Solution acide (pH = 2) contenant des inhibiteurs de corrosion (benzotriazole)                                                                                       |

### 4.4. Occupation du sol

L'osmose inverse est une technologie qui requiert une emprise foncière.

À titre de comparaison, une station d'une capacité de 5 000 ou 10 000 m<sup>3</sup> d'eau/jour occupe approximativement 10 000 m<sup>2</sup> de surface au sol (SADHWANI *et al.*, 2005).

Leur mise en place implique une modification de l'occupation du sol, une destruction d'espaces verts, une fragmentation des habitats, et une modification du comportement des aquifères côtiers souterrains (BOMBAR *et al.*, 2016; EL AMINE, 2023).

### 4.5. Bruits et vibrations

Durant la phase de construction d'une installation de dessalement, les travaux de terrassement et les engins de transport sont à l'origine du bruit et des vibrations (LOIZIDE, 2003).

Au-delà des rejets liquides, l'exploitation quotidienne des usines de dessalement est une source de nuisances sonores et de vibrations considérable (pouvant dépasser les 90 dB(A)). Ces nuisances sont principalement engendrées par l'opération des pompes haute pression, des turbines et des systèmes de récupération d'énergie, et sont susceptibles d'induire des effets néfastes tant sur les organismes marins que sur les populations humaines riveraines (AZIZ et HANAFIAH, 2021; IHSANULLAH *et al.*, 2021).

## 5. Impacts environnementaux

L'empreinte environnementale des usines de dessalement est liée à l'ensemble du cycle du projet, résultant à la fois des travaux de construction et de l'exploitation de l'installation.

Les impacts observés durant la phase de construction se limitent, spatialement et temporellement au site et à la période des travaux, ceux associés à la seconde phase sont quant à eux plus préoccupants et sont principalement dus aux rejets (ALAMEDDINE et EL-FADEL, 2007).

Avant même de produire de l'eau potable, le pompage initial de l'eau de mer cause un impact biologique majeur et destructeur via deux phénomènes : l'impaction, où les gros organismes (comme les poissons) se heurtent ou se bloquent contre les grilles de protection, et l'entraînement, où la micro-biomasse essentielle (œufs, larves, plancton) est entièrement aspirée et détruite dans le système de traitement, menaçant la base de la chaîne alimentaire (SHOKRI et SANAVI, 2022).

## CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Une étude récente a expliqué que les rejets d'eaux usées émis par ces usines concentrent des métaux lourds et des produits chimiques. Ces rejets altèrent la qualité de l'eau, contribuent au changement climatique, menacent la santé humaine et entraînent la mort d'organismes marins

À l'échelle mondiale, la majorité des usines de dessalement (notamment au Moyen-Orient et en Afrique du Nord) fonctionnent encore grâce aux énergies fossiles. Elles contribuent ainsi de manière significative aux émissions globales de gaz à effet de serre, alimentant indirectement le réchauffement climatique et l'acidification globale des océans (PANAGOPOULOS, 2025).

Le déversement de la saumure sans dilution préalable peut modifier les propriétés physico-chimiques du milieu récepteur (DE-LA-OSSA-CARRETERO *et al*, 2016; OMERSPAHIC *et al*, 2022) et entraîner des effets non négligeables sur les écosystèmes marins tels qu'ils ont été démontrés dans plusieurs travaux (Tableau 6).

Pour chaque litre d'eau douce produit par osmose inverse, environ 1 à 1,5 litre de saumure (eau hyper-salée) est rejeté dans le milieu marin. L'hypersalinité de la saumure presque double de celle de l'eau de mer naturelle. Étant plus dense, elle coule directement au fond de l'eau, formant une nappe salée qui asphyxie le milieu. Un effondrement de la diversité des diatomées benthiques et la disparition des espèces sténohalines (comme les étoiles de mer ou les herbiers de Posidonie en Méditerranée) qui ne tolèrent pas les variations de sel ont déjà été démontrés (FERNÁNDEZ-TORQUEMADA *et al*. 2005a, 2019b).

Bien entendu, l'ampleur des impacts dépend entre autres du type de procédé utilisé, de l'emplacement de l'installation et du mode d'évacuation des rejets (AL-MUTAZ *et al.*, 1991; PALOMAR *et al.*, 2011; BELATOUI *et al.*, 2017).

En Algérie, une étude réalisée en 2021 a permis d'analyser la dispersion en surface des rejets de saumure de l'usine de dessalement d'eau d'El Hamma. Cette analyse a révélé que les rejets de saumure affectaient les eaux de la baie d'Alger, la rendant plus salée et augmentaient la présence de métaux lourds (AMOKRANE et SALMI, 2021 ; GUPTA *et al*, 2025).



## CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

**Tableau 6:** Conséquences des effluents concentrés (saumure) des installations de dessalement sur le milieu marin (Omerspahic et al., 2022, modifié)

| Température      | Salinité       | pH            | Polluant                                   | Impact                                                                                                                                                                                                 | Pays                            | Référence                           |
|------------------|----------------|---------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 27,5°C           | NA             | 5,8 ± 0,25    | NA                                         | Réduction et disparition de nombreuses espèces de poissons<br>Les coraux et les espèces planctoniques étaient totalement absents du site touché                                                        | Égypte                          | (Mabrook, 1994)                     |
| NA               | 41,6           | NA            | NA                                         | Disparition des échinodermes après la mise en service de la station                                                                                                                                    | Alicante, Espagne               | (Fernández-Torquemada et al., 2005) |
| 25,23°C          | 59             | NA            | NA                                         | Faible abondance des espèces benthique dans la zone de rejet en comparaison avec le site de référence                                                                                                  | Beni Saf et Mostagane m Algérie | (Belatoui et al., 2017a)            |
| 31,633°C ± 0,058 | 42,353 ± 0,006 | 7,081         | NA                                         | Perte de 65% du récif corallien                                                                                                                                                                        | Marsa Humira, Égypte            | (Nasr et al., 2019)                 |
| 33,36°C ± 0,165  | 43,210 ± 0,139 | 7,887 ± 0,085 | Phosphate, silice, fer et magnésium        | Blanchiment du corail                                                                                                                                                                                  | Shalateen, Égypte               | (Nasr et al., 2019)                 |
| 16,06°C          | 40,65          | 8,24          | Acides inclus dans les Cycles de Nettoyage | Accroissement des processus de biotransformation et stimulation des systèmes enzymatiques impliqués dans la défense antioxydante<br>Dommages moléculaires chez les patelles ( <i>Patella rustica</i> ) | Bousfer-Oran, Algérie           | (Benaissa et al., 2020)             |

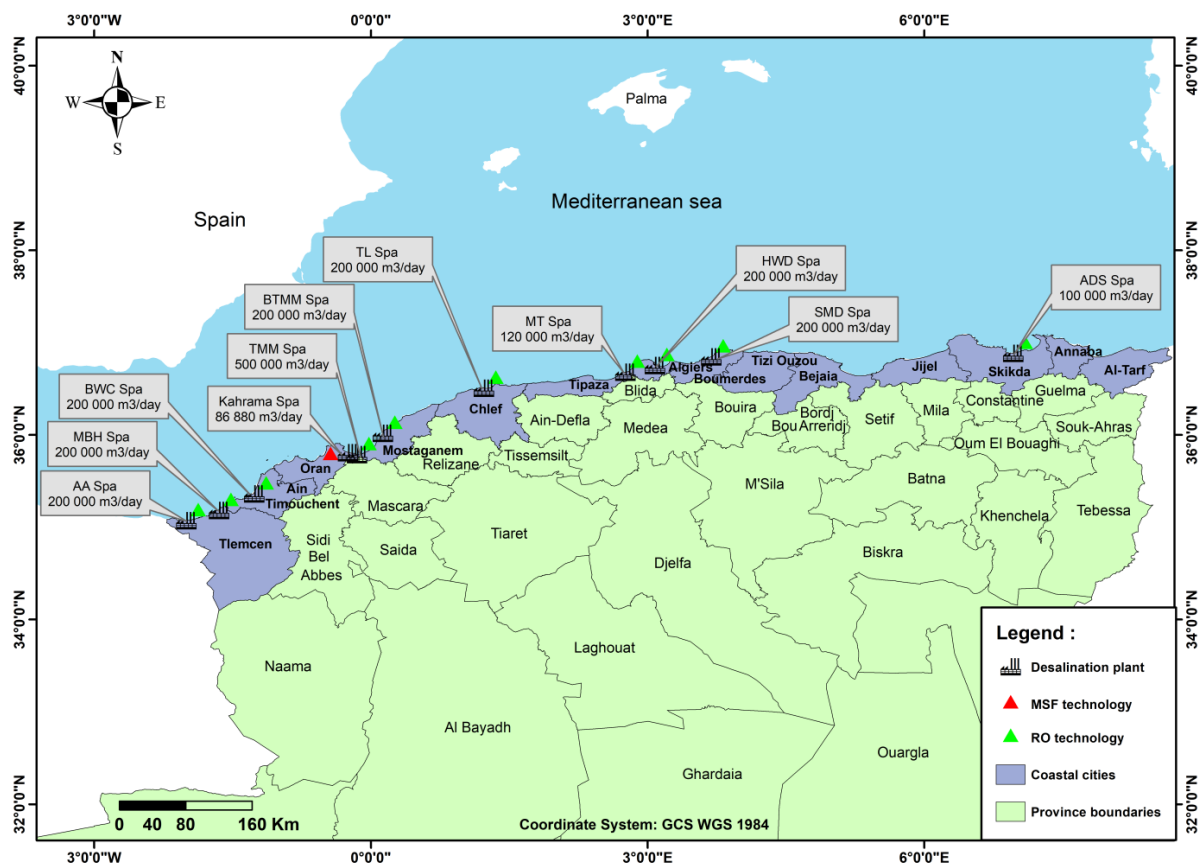
## 6. Situation du dessalement de l'eau de mer en Algérie

### 6.1. Capacités installées

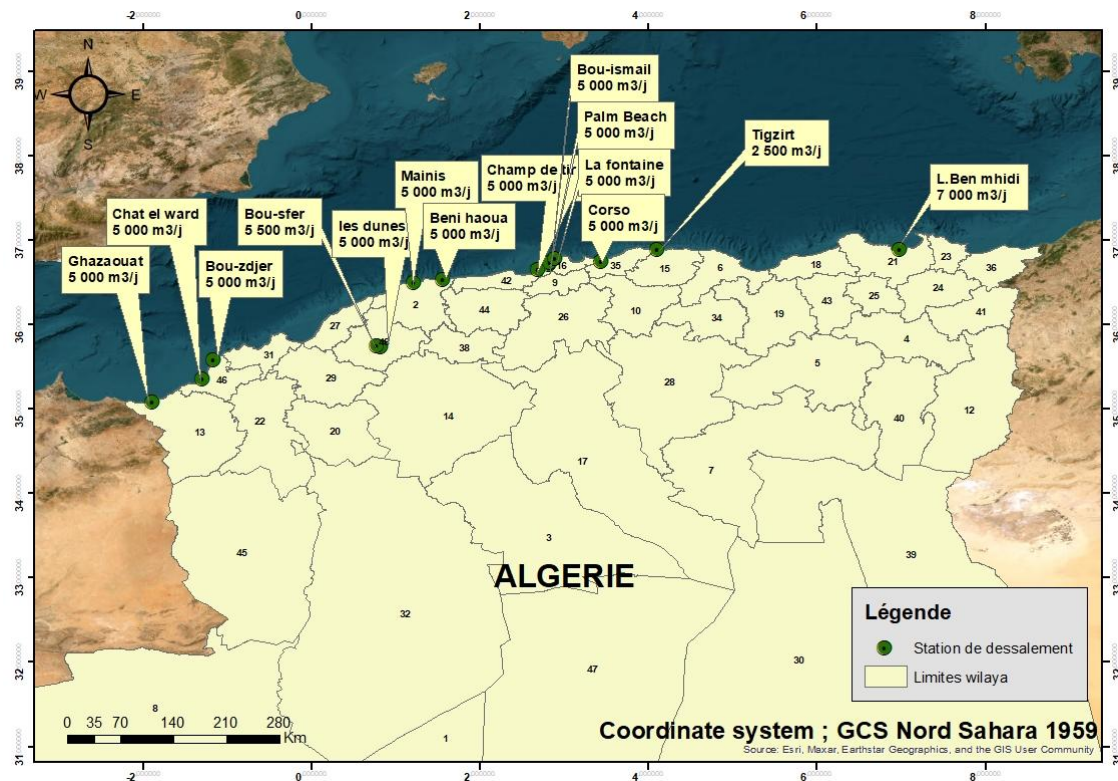
En Algérie, la technologie de dessalement était essentiellement utilisée en industries pétrolière et sidérurgique.

La production d'eau à usage domestique n'avait été envisagée sérieusement qu'à partir des années 2000 ; où un programme d'urgence de dessalement avait été lancé pour faire face aux pénuries d'eau. C'est ainsi que seize (16) stations de dessalement monobloc et de 13 méga stations de dessalement avec une production globale d'environ 2 millions  $m^3/j$  (BESSENASSE *et al*, 2010). Une station de dessalement monobloc (également qualifiée de station conteneurisée) est un système pré-assemblé qui peut être livré et mis en service en quelques jours pour les situations d'urgence ou les besoins industriels (ZANIOLO *et al.*, 2026)

En 2023, onze (11) méga installations de dessalement d'eau de mer (Figure 9) d'une capacité de production de 2,2 millions  $m^3/j$  ; permettent d'assurer 18 % de l'alimentation en eau potable globale, sans compter les unités de dessalement monobloc (Figure 10).



**Figure 6 :** Localisation géographique des méga stations de dessalement opérationnelles le long de la côte algérienne et leur capacité de production en  $m^3/jour$  (ADEM *et al.*, 2023)



Pour renforcer l'approvisionnement en eau, un programme complémentaire a été mis en place, prévoyant l'intégration de cinq (5) méga-usines additionnelles d'une capacité de 300 000 m³/j chacune seront mise en service.

Grâce aux capacités installées à l'heure actuelle le dessalement devrait permettre de couvrir jusqu'à 42 %<sup>1</sup> des besoins en eau potable de la population.

<sup>1</sup> <https://aec.dz/2024/12/10/revue-n14-14eme-edition-novembre-2024/>

**Tableau 7 :** Stations de dessalement installées en Algérie (KASSOUAR et al., 2024)

| Wilaya     | Nom de la station    | Capacité (m <sup>3</sup> /j) | Procédé | Date de mise en service |
|------------|----------------------|------------------------------|---------|-------------------------|
| Chlef      | Ténès                | 200 000                      | RO      | 2015                    |
|            | Béni Haoua           | 5 000                        | RO      | En construction         |
| Béjaia     | Tighremt             | 300 000                      | RO      | En construction         |
| Tlemcen    | Souk Thléta          | 200 000                      | RO      | 2011                    |
|            | Honaine              | 200 000                      | RO      | 2006                    |
|            | Hamma                | 200 000                      | RO      | 2008                    |
|            | Staoueli- Palm Beach | 7500                         | RO      | 2021                    |
| Alger      | Ain Benian           | 10 000                       | RO      | 2021                    |
|            | Zeralda              | 10 000                       | RO      | 2021                    |
|            | Bordj El Kiffan      | 10 150                       | RO      | 2022                    |
|            | El-Marsa             | 60 000                       | RO      | 2022                    |
|            | Kahrama Arzew        | 90 000                       | MSF     | 2005                    |
| Oran       | Bousfer              | 5 500                        | RO      | 2005                    |
|            | Mactaa               | 500 000                      | RO      | 2016                    |
|            | Cap Blanc            | 300 000                      | RO      | 2025                    |
|            | Cap Djinet 1         | 100 000                      | MSF     | 2012                    |
| Boumerdès  | Corso                | 80 000                       | RO      | 2023                    |
|            | Cap Djinet 2         | 300 000                      | RO      | 2024                    |
| El Tarf    | Koudiet Eddraouche   | 300 000                      | RO      | 2025                    |
| Skikda     | Skikda               | 200 000                      | RO      | 2009                    |
| Mostaganem | Mostaganem           | 200 000                      | RO      | 2011                    |
| Tipaza     | Fouka 1              | 120 000                      | RO      | 2011                    |
|            | Fouka 2              | 300 000                      | RO      | 2025                    |
| Ain        | Béni Saf             | 200 000                      | RO      | 2010                    |
| Témouchent | Chatt El Hillal      | 200 000                      | RO      | 2009                    |

## 6.2. Difficultés rencontrées

Malgré les avantages de la technologie du dessalement et les nombreuses installations opérationnelles dans le pays, les gestionnaires font face à de nombreuses contraintes ; dont les problèmes techniques. D'où les arrêts récurrents provoqués par des fuites sur le réseau aval, un défaut de communication des automates, des coupures d'électricité, ou encore d'une dégradation de la qualité de l'eau d'alimentation, c'est-à-dire l'eau de mer (Kaab and Hama, 2023).

De plus, les questions relatives aux impacts des usines de dessalement sur l'environnement en Algérie sont souvent soulevées et ont donné lieu à plusieurs études (Tableau 8).

## CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

**Tableau 8:** Cas d'études sur les impacts environnementaux du dessalement en Algérie (KAAB and HAMA, 2023)

| Station/ Localisation          | Capacité (m <sup>3</sup> /j) | Procédé | Résultat                                                                                                                                                                                    | Référence                    |
|--------------------------------|------------------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Cap Djinet - Boumerdès         | 2 500                        | MSF     | Aucun effet notable<br>Perte d'énergie et émission de CO <sub>2</sub>                                                                                                                       | (MOHAMMEDI et al., 2013)     |
| Bousfer -Oran                  | 5 500                        | RO      | Stress physiologique chez les patelles « <i>Patella rustica</i> » provoqué par la salinité élevée et les polluants chimiques                                                                | (BENAÏSSA et al., 2017)      |
| Bou Ismail -Tipaza             | 5 000                        |         | Propriétés du milieu récepteur :<br>pH : 6.36 - 6.52<br>Salinité : 43.6                                                                                                                     | (BELKACEM et al., 2017)      |
| Honaine -Tlemcen               | 200 000                      |         | Propriétés du rejet<br>Salinité : 44,80 (eau de mer : 35,90)<br>TDS : 13 625 mg/L (eau de mer : 13 600)<br>Cl <sup>-</sup> : 45 000 mg/L (eau de mer : 21 650 mg/L)                         | (MEHTOUGUI et KERFOUF, 2018) |
| Fouka -Tipaza                  | 200 000                      | RO      | Impact non significatif sur les populations de <u>Macrofauna</u> (mobilité des espèces)                                                                                                     | (BELKACEM et al., 2019)      |
| Hamma -Alger                   | 200 000                      | RO      | Les mollusques sont les plus (71% de l'abondance globale)<br>Dispersion des rejets de saumure insuffisante en raison de l'emplacement de l'émissaire                                        | (AMOKRANE et SALMI, 2021)    |
| Chat El Hilal - Ain Témouchent | 200 000                      |         | Propriétés du milieu récepteur :<br>Salinité : 45 (eau de mer : 37,38)<br>TDS : 47 134,42 mg/L (eau de mer : 39 142,23 mg/L)<br>Cl <sup>-</sup> : 15 479,84 mg/L (eau de mer : 9 428.5mg/L) | (MEHTOUGUI et al., 2015)     |

## ***CHAPITRE II :***

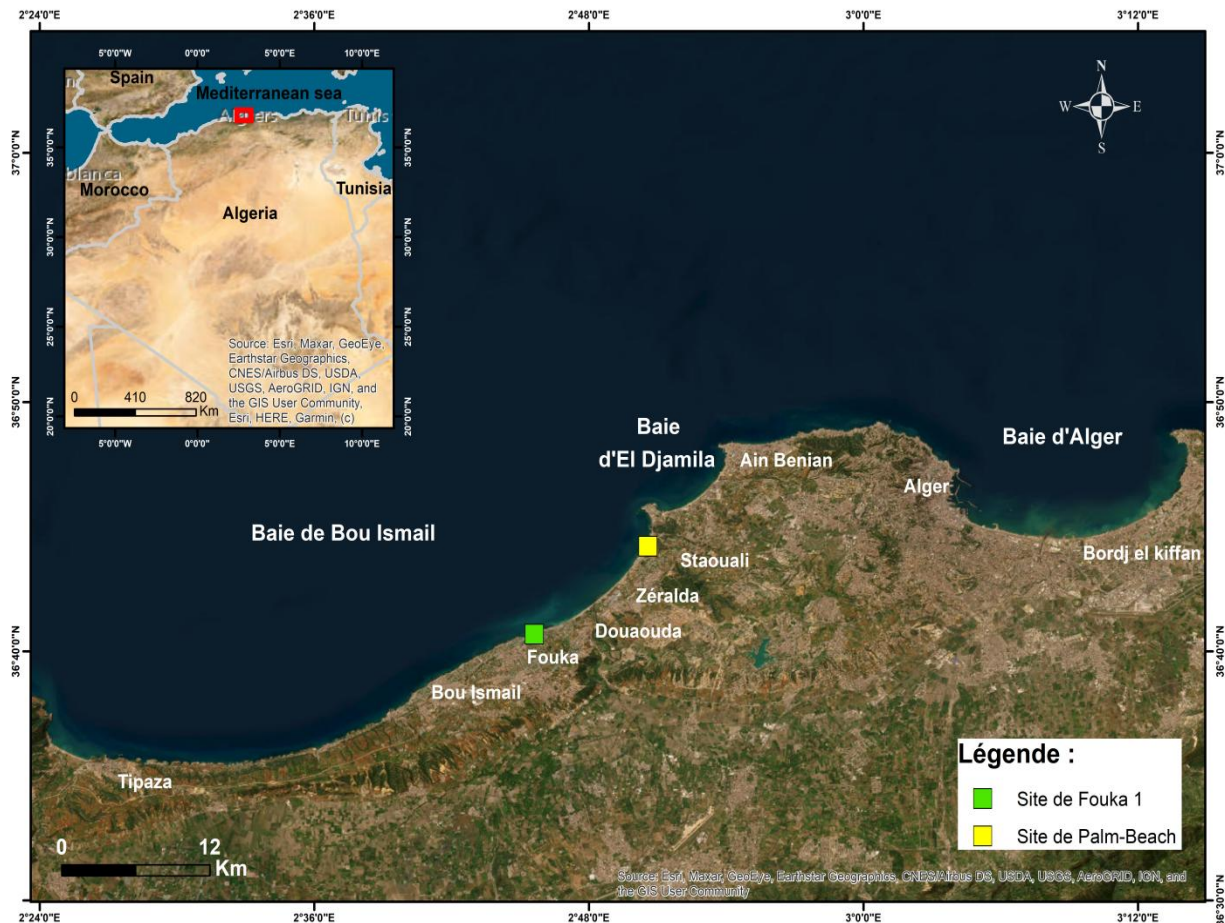
## ***MATÉRIEL ET MÉTHODES***

### 1. Présentation des sites d'étude

Dans le cadre de cette étude, nous avons analysé uniquement deux installations de dessalement situées le long de la côte algéroise.

Les sites choisis font partie d'une zone fortement anthropisée (BENCHEIKH *et al.*, 2022; BENHALIMA *et al.*, 2024); devenue un véritable pôle d'attraction en terme d'activités industrielles et dont la charge polluante ne cesse d'augmenter aussi bien en quantité qu'en qualité (Belhouchet *et al.*, 2024).

Les deux installations de dessalement examinées dans le cadre de cette étude sont celles de Palm- Beach et de Myah Tipaza Spa ; communément appelée « Fouka 1 », localisées toutes les deux au niveau de la Baie de Bou-Ismaïl (Figure 11), sur la côte algéroise (AILANE *et al.*, 2021; BAKALEM *et al.*, 2020).

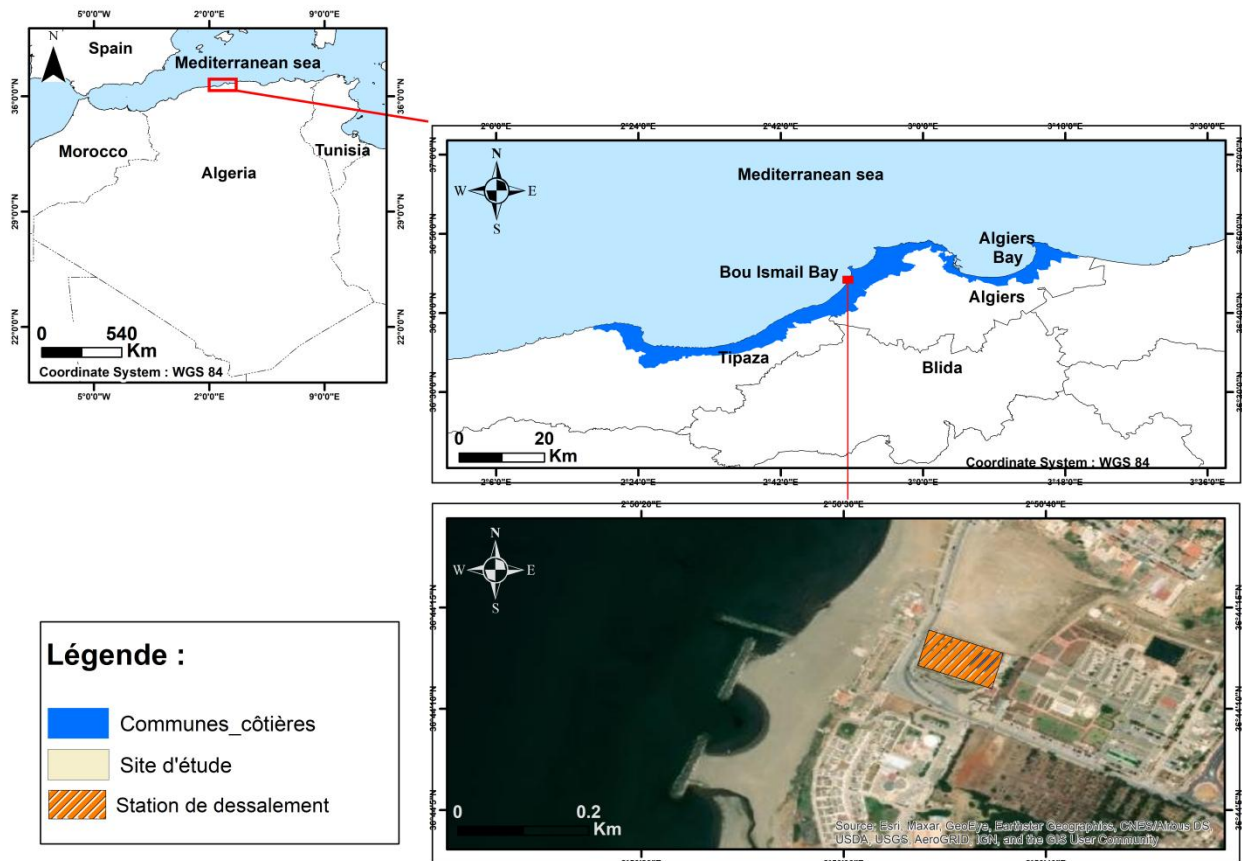




### 1.1. Station de Palm-Beach

#### 1.1.1. Situation géographique

Comme l'indique la Figure 12, l'installation de dessalement de Palm-Beach est située dans la commune de Staoueli, à l'extrémité Est de la baie de Bou-Ismaïl, à approximativement 20 km à l'Ouest de la ville d'Alger (latitude :  $36^{\circ}43'44''$  -  $36^{\circ}44'48''$  N ; longitude :  $2^{\circ}50'12''$  -  $2^{\circ}50'44''$  E). Le site s'étend sur une superficie de 6 100 m<sup>2</sup>.



**Figure 12 : Localisation géographique de l'installation de dessalement de Palm-Beach**  
(AA.ADEM, 2025)

#### 1.1.2. Caractéristiques techniques de la l'unité de dessalement

La station de dessalement de Palm-Beach, mise en service en 2004 avec une capacité initiale de 2 500 m<sup>3</sup>/jour, a vu sa production doubler en 2021 pour atteindre 5 000 m<sup>3</sup>/jour en 2021 (BESSENASSE *et al*, 2010; EL AMINE, 2023). Cette installation monobloc est dédiée à l'alimentation du château d'eau de la commune de Sidi Fredj (AIT YOUNES et AKARKAR, 2022).

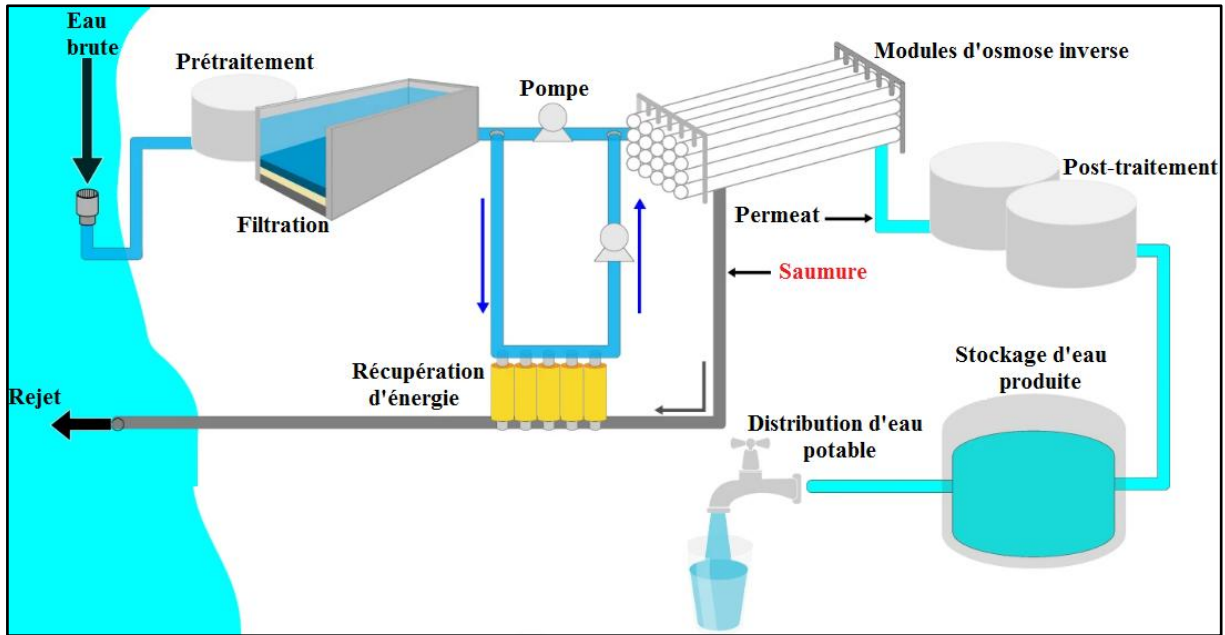
La station de Palm-Beach tout comme l'ensemble des autres usines algériennes, est basée sur la technologie d'osmose inverse.



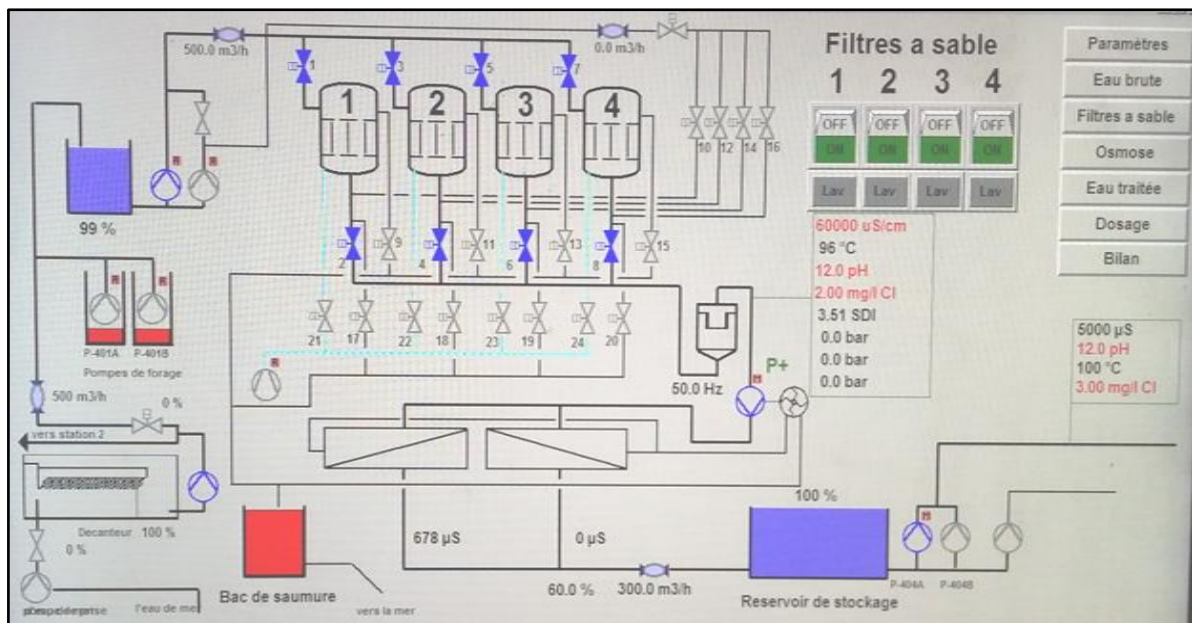
## CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES

Ce procédé est réalisé en quatre étapes opérationnelles clés : la prise d'eau de mer, le prétraitement nécessaire, le module de dessalement par osmose inverse, et le traitement final de l'eau produite (MAUREL, 1979; PÉREZ-ZUÑIGA *et al.*, 2020).

Le fonctionnement schématique d'une unité de dessalement par osmose inverse est illustré en Figure 13. Le diagramme fonctionnel de l'unité de Palm-Beach est représenté dans la Figure 14.



**Figure 13 :** Schéma général du procédé de dessalement par osmose inverse (QUON et JIANG, 2023)



**Figure 14 :** Diagramme fonctionnel de l'unité de dessalement de Palm-Beach (AA.ADEM, 2021)

### 1.1.2.1. Système de captage de l'eau de mer

Le prélèvement de l'eau de mer destiné à alimenter la station de dessalement de Palm-Beach s'effectue à l'aide d'une conduite, munie d'une crépine terminale. Ce point de captage est situé à 650 m de la côte, par 8m de profondeur (Figure 15).

La crépine permet d'éliminer les éléments grossiers (sacs, bouteilles, et organismes marins) susceptibles d'altérer les machines et de perturber le processus de dessalement.

À la suite de cette filtration grossière, l'eau obtenue sera conservée dans une chambre d'aspiration située à 6 m de profondeur ; en attendant d'être aspirée par une pompe à refoulement.



**Figure 15 :** *Crépine du système de captage de l'usine de dessalement de Palm-Beach (AA.Adem, 2017)*

### 1.1.2.2. Traitement préliminaire de l'eau brute

Le système de prise d'eau et de refoulement est conçu de manière à prévenir les risques de colmatage ou d'obstruction du pipeline, de prolifération biologique et de dégradation des membranes par entartrage ou colmatage. Cette protection est assurée par un diffuseur couplé à la pompe de refoulement, qui injecte du chlore (Cl) dans l'eau brute.

À ce stade du traitement, le pH de l'eau brute doit être réduit pour faciliter la décomposition des carbonates, par l'ajout de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) (AIT YOUNES et AKARKAr, 2022).

L'eau filtrée passera ensuite dans la chambre de vannes où elle subira :

- un prétraitement chimique ; afin d'éliminer les particules colloïdales et les matières organiques dissoutes, des réactifs chimiques sont ajoutés. Ce processus utilise des

## CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES

coagulants, dont le chlorure ferrique ( $\text{FeCl}_3$ ), et des polymères pour faciliter la floculation des substances indésirables ;

- décantation de l'eau filtrée au niveau du décanteur lamellaire (les sables issus au cours de cette étape seront récupérés et stockés dans les lits de séchage) ;
- une désinfection primaire, un ajustement du pH et de l'alcalinité ; par l'ajout d'hypochlorite de calcium ( $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ ) ;
- une filtration sur sable (Figure 16) ;
- une injection du Méta-bisulfite de sodium ( $\text{Na}_2\text{O}_5\text{S}_2$ ) et d'un antiscalant (antitartre) pour l'élimination du chlore résiduel ;
- une microfiltration (Figure 17) dite filtration sur cartouches (diamètre des membranes compris entre 0.1 et 10  $\mu\text{m}$ ). Cette étape permet l'élimination des contaminants (matières en suspension, bactéries) afin de prémunir les membranes d'osmose inverse contre le phénomène de colmatage (AIT YOUNES et AKARKAR, 2022; DIF et MOUTARFI, 2018; IDIR, 2014).



**Figure 16** : Illustration des filtres à sables de la station de dessalement de Palm-Beach (AA.ADEM, 2017)



**Figure 17 :** *Représentation du système de microfiltration de la station de dessalement de Palm-Beach (AA.ADEM, 2017)*

### 1.1.2.3. Processus d'osmose inverse

Il s'agit ici du cœur du processus de dessalement proprement dit ; dont le lancement dépend des traitements précédents pour protéger les membranes.

L'unité d'osmose inverse composée de deux racks formés de 28 modules chacun (Figure 18 et Figure 19) est alimentée par une pompe à haute pression d'une énergie de 62 bars ; dont 2 bars seront récupérées au cours du processus.



**Figure 18 :** *Modules d'osmose inverse employés à la station de dessalement de Palm-Beach (AA.ADEM, 2017)*





**Figure 19 :** Rack de tubes de pression d'osmose inverse de la station de dessalement de Palm-Beach (AA.ADEM, 2017)

Un nettoyage des membranes est nécessaire soit de façon préventive (généralement tous les trois mois), soit de manière curative dès que certains indicateurs critiques sont franchis. Ces seuils de performance incluent, entre autres, une perte d'efficacité énergétique, une diminution du débit de production de l'ordre de 10 à 15%, ou une augmentation de la teneur en sels dans le perméat (AIT YOUNES et AKARKAR, 2022).

#### 1.1.2.4. Post-traitement

L'eau déminéralisée (perméat) récupérée et stockée dans un réservoir subira :

- un ajustement du pH ; par l'injection d'une solution d'hydroxyde de sodium ;
- une désinfection ; par l'ajout du chlore dans le but d'écarter tout risque de contamination bactérienne de l'eau produite ;
- et une reminéralisation qui sera réalisée au niveau du château d'eau de Sidi Fredj (AIT YOUNES et AKARKAR, 2022; IDIR, 2014).

#### 1.1.2.5. Système de stockage des rejets

Une partie du concentrât produit ; c'est-à-dire de la saumure servira au lavage des filtres à sables. L'autre partie sera par contre rejetée directement en mer (Figure 20) sans traitement préalable (AIT YOUNES et AKARKAR, 2022).

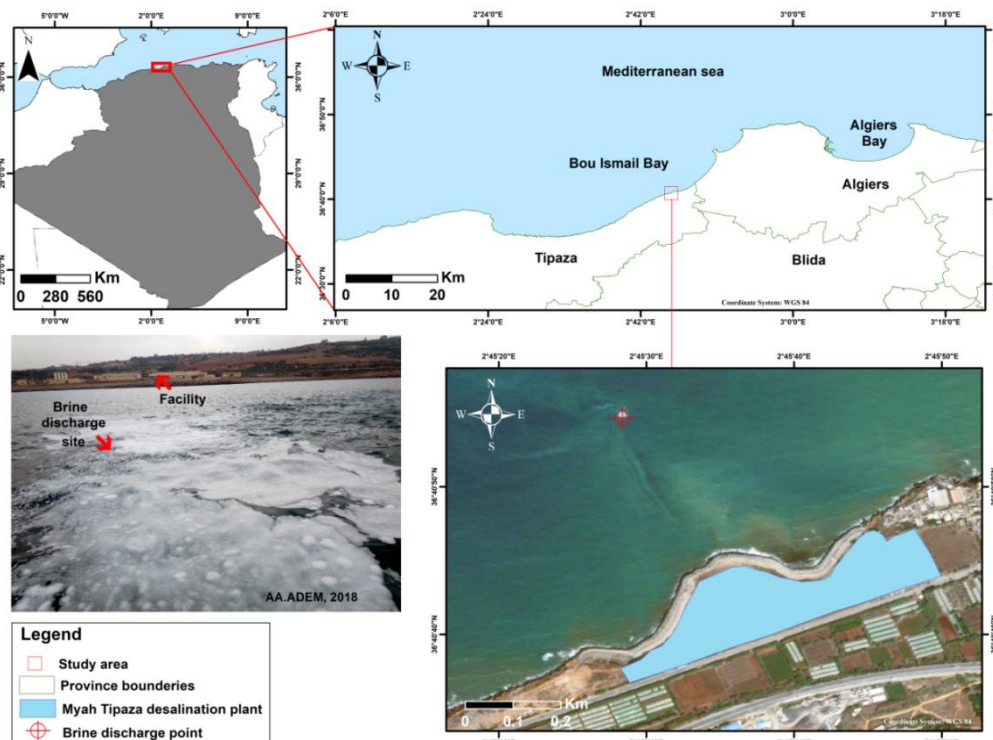


**Figure 20 :** Photographies des rejets en bord de mer de l'unité de dessalement de Palm-Beach (AA.ADEM, a : 2016, b : 2017)

## 1.2. Station de Fouka 1

### 1.2.1. Situation géographique

Implantée à environ 30 kilomètres à l'ouest d'Alger, la station de Fouka 1 est située sur le territoire de la commune de Fouka (Wilaya de Tipaza), aux coordonnées suivantes :  $36^{\circ}40'41,57''$  N ; longitude :  $2^{\circ}45'36,72''$  E (Figure 21). Le site occupe une superficie de 10 hectares, avec une configuration allongée (300 m de long) et une largeur variable (70 à 150 m) (ADEM *et al.*, 2023; TIGRINE *et al.*, 2018).



**Figure 21 :** Situation géographique de la station de dessalement de Fouka 1 et de la zone de rejet (AA.Adem, 2018)

### 1.2.2. Caractéristiques techniques de l'installation de dessalement

Démarrée le 1er juillet 2011, l'usine de dessalement de Fouka 1 emploie le procédé d'osmose inverse. Avec une capacité de production fixée à 120 000 m<sup>3</sup>/jour (Hamiche et al, 2020), elle assure l'approvisionnement en eau potable de la partie Est de la Wilaya de Tipaza et de l'Ouest de la région d'Alger (BELHOUT *et al.*, 2018; NAIMI-AIT-AOUDIA *et al.*, 2014; TIGRINE *et al.*, 2018).

Le processus de traitement de l'eau au sein de cette installation est conforme au schéma général des unités de dessalement par osmose inverse. L'usine est équipée des modules fonctionnels suivants :

- deux points de captage d'eau de mer ouverts ;
- un poste de prétraitement ;
- l'unité centrale de dessalement par osmose inverse ;
- un poste de nettoyage des membranes sur place (CIP : Cleaning in Place) ;
- un système dédié à la récupération d'énergie ;
- une unité de post-traitement et de reminéralisation de l'eau produite ;
- une installation de stockage d'eau traitée couplée à une station de pompage pour la distribution ;
- un bassin de traitement des effluents (TEMMAR, 2016).

#### 1.2.2.1. Système de prise et de stockage de l'eau de mer

Le captage de l'eau de mer alimentant la station de dessalement est situé à 900 m au large de la côte, il est assuré par deux conduites en polyéthylène d'un diamètre de 1600 mm qui permettent de capter l'eau brute à travers des grilles situées entre 8 et 10 m de fond (ADEM *et al.*, 2023; TIGRINE *et al.*, 2018).

Le débit d'eau aspirée par tête (Figure 22) est de l'ordre de 5 702 m<sup>3</sup>/h, avec une vitesse d'entrée fixée à 0,1 m/s (REZIM et TACHETAOUI, 2020).

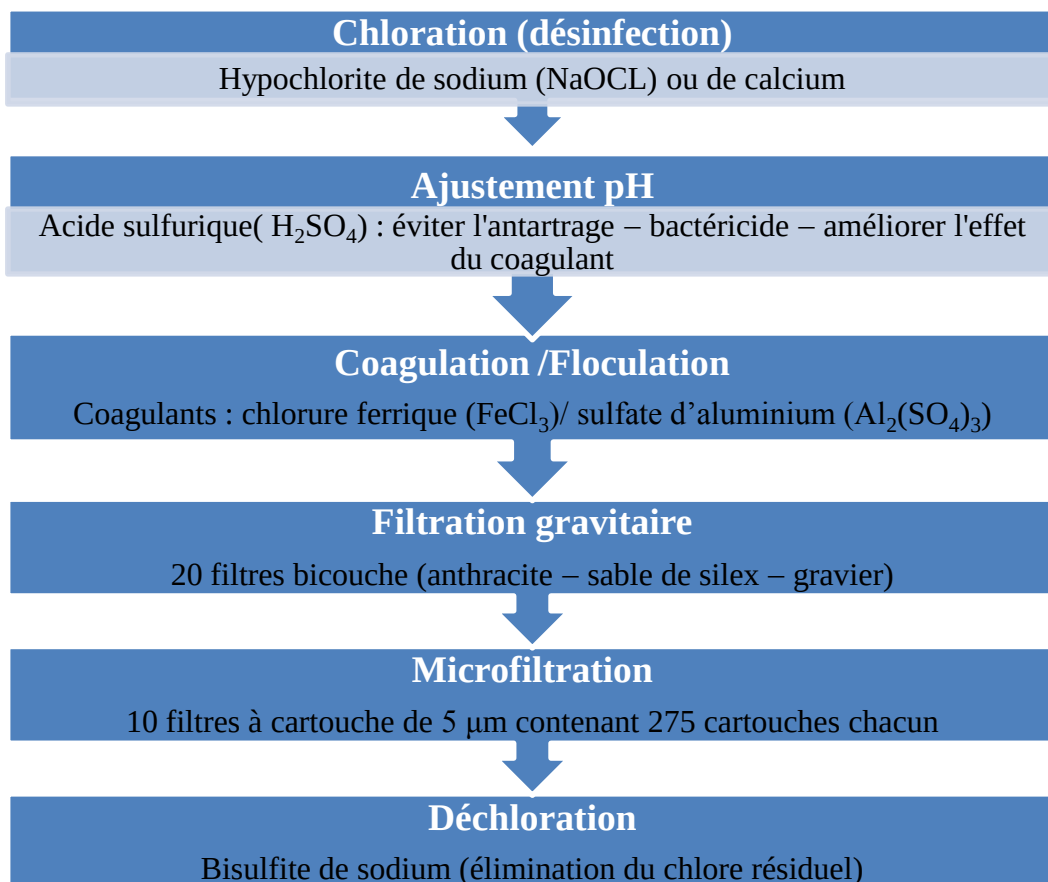


**Figure 22 :** *Dispositif de prise d'eau de mer de la station de dessalement de Fouka 1*

### 1.2.2.2. Système de prétraitement et de filtration

Le transfert de l'eau de mer vers le système de prétraitement est assuré par un ensemble de pompes (7 pompes ; dont une en réserve) d'une capacité de 1 974 m<sup>3</sup>/h chacune.

L'eau de mer subira à ce stade plusieurs traitements physiques et chimiques (Figure 23) dans le but d'améliorer sa qualité et d'éviter le colmatage des modules d'osmose inverse.



**Figure 29:** *Schéma des principales phases de prétraitement utilisée par la station de dessalement de Fouka 1 (REZIM et TACHETAOUI, 2020; TEMMAR, 2016)*



Il faut savoir que le lavage des filtres se fait automatiquement en fonction de la turbidité ; à titre d'exemple pour une turbidité de 1,5 NTU le lavage s'effectue au bout de 24 heures (REZIM et TACHETAOUI, 2020).

### 1.2.2.3. Unité d'osmose inverse

À l'issu du prétraitement, l'eau sera acheminée vers les modules d'osmose inverse à l'aide de pompes hautes pression.

L'unité de dessalement comprend 6 filères (trains) d'osmose inverse (Figure 24), constituées de membranes en polyamides, de type à enroulement spiralé, d'un diamètre de 200 mm qui permettent un taux de conversion de l'ordre de 45%.

Dans le processus d'osmose inverse, l'énergie contenue dans le rejet de saumure est récupérée, atteignant un rendement de 95% grâce à l'utilisation de dispositifs d'échangeurs de pression (BRAHIMI et DINE, 2018; REZIM et TACHETAOUI, 2020).



**Figure 24 :** Représentation de la filière d'osmose inverse de l'unité de dessalement de Fouka 1 (BRAHIMI et DINE, 2018)

L'arrêt des filières d'osmose inverse impose une purge de la saumure stagnante par un système de rinçage (*flushing*) afin d'éviter la corrosion des équipements et l'encrassement des membranes. Pour le maintien de la performance, des nettoyages préventifs sont également effectués

régulièrement, nécessitant l'utilisation d'acides, de biocides et de détergents spécifiques (REZIM et TACHETAOUI, 2020).

### 1.2.2.4. Post-traitement (reminéralisation)

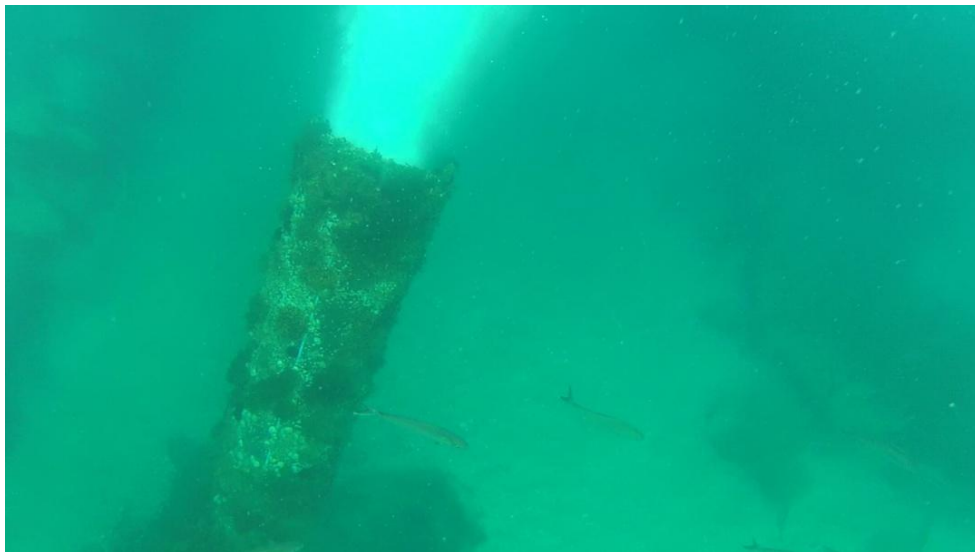
Deux traitements distincts sont appliqués à l'eau dessalée avant son refoulement (distribution) :

- un ajustement de l'alcalinité et de la dureté de l'eau dessalée via l'utilisation de la chaux  $\text{Ca(OH}_2\text{)}$  et du  $\text{CO}_2$  ;
- une désinfection par chloration (REZIM et TACHETAOUI, 2020; TEMMAR, 2016).

### 1.2.2.5. Gestion et stockage des effluents

Les effluents générés par l'unité de Fouka 1 proviennent de deux sources principales : le rinçage des membranes d'osmose inverse et le lavage des saturateurs de chaux. Ces eaux usées sont ensuite stockées dans un réservoir d'une capacité de  $100 \text{ m}^3$  (TEMMAR, 2016).

Les rejets de saumure estimés à  $150\,000 \text{ m}^3/\text{jour}$  sont évacués en mer (Figure 25) à 450 m de la côte via une conduite équipée d'un diffuseur (ADEM et al., 2023; FILALI et BESSENASSE, 2018).



**Figure 25 :** *Illustration de l'émissaire de la station de Fouka 1* (BRAHIMI et DINE, 2018)

## 2. Données d'études et travaux effectués

La méthodologie adoptée pour cette étude repose sur une double approche. Il s'agit, d'une part, de définir précisément la composition et la nature des effluents produits par les installations de dessalement et, d'autre part, d'évaluer l'état initial du milieu marin récepteur (zone de dispersion).

## CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES

Ce travail vise à déterminer les éventuelles répercussions écologiques en mesurant un ensemble d'indicateurs physicochimiques et biologiques de l'eau de mer à proximité de la zone de rejet.

Pour rappel, les sites ayant fait l'objet de cette étude sont les stations de dessalement de Palm-Beach et Fouka 1.

Le choix de ces installations repose essentiellement sur la disponibilité des données, que l'accessibilité aux infrastructures et la faisabilité des prélèvements.

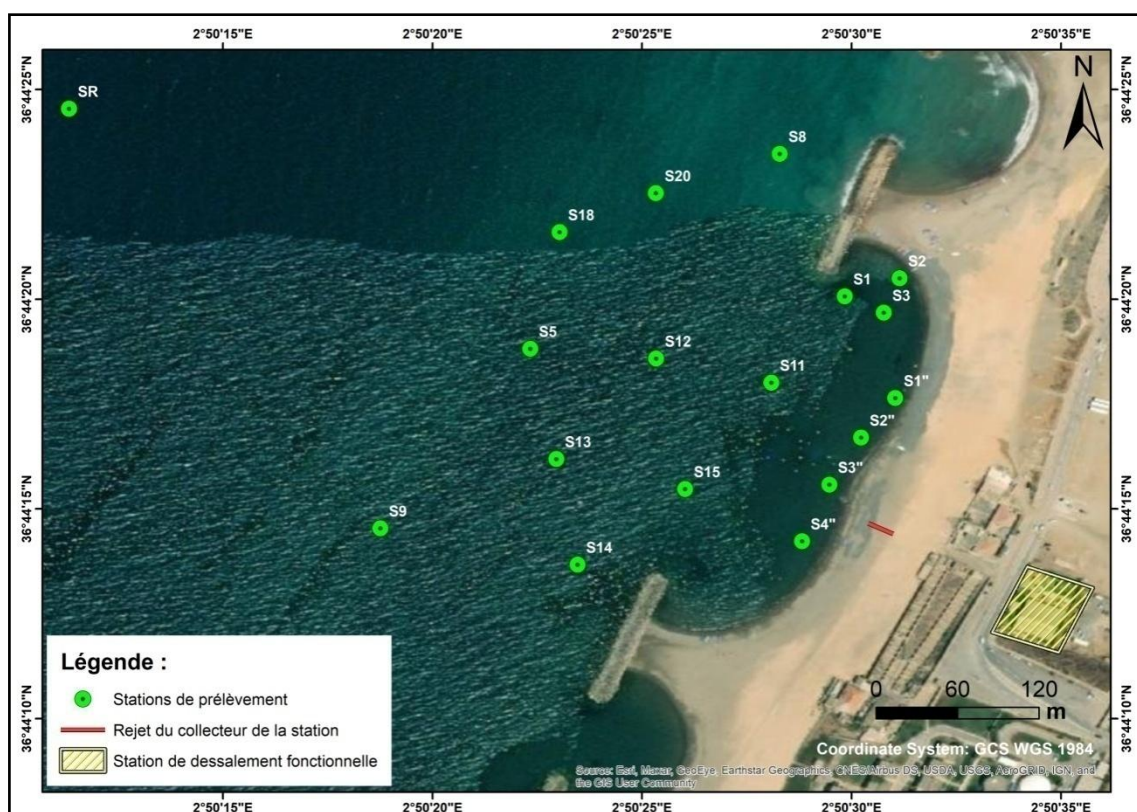
Concernant la station de Palm Beach, les mesures de la qualité de l'eau brute d'entrée, de la saumure rejetée et du milieu récepteur ont été collectées sur le terrain en 2021.

En ce qui concerne l'installation de Fouka 1, la caractérisation des effluents produits est basée essentiellement sur l'analyse des données issues de travaux antérieurs et des informations fournies par la société de gestion Myah-Tipaza Spa ; puisque l'accès à la station ne nous a pas été accordé. Par ailleurs, l'étude de la qualité de l'eau de mer dans la zone d'évacuation a nécessité l'organisation de diverses campagnes de mesure en mer.

### 2.1. Stratégie d'échantillonnage

Les données relatives à la caractérisation de l'eau brute et de la saumure de Palm-Beach ont été obtenues via des prélèvements effectués en avril, mai et juin 2021. Pour déterminer l'impact sur le milieu récepteur, une campagne d'échantillonnage en mer a été spécifiquement organisée le 21 juin 2021, ciblant la zone d'influence des rejets (Figure 26).

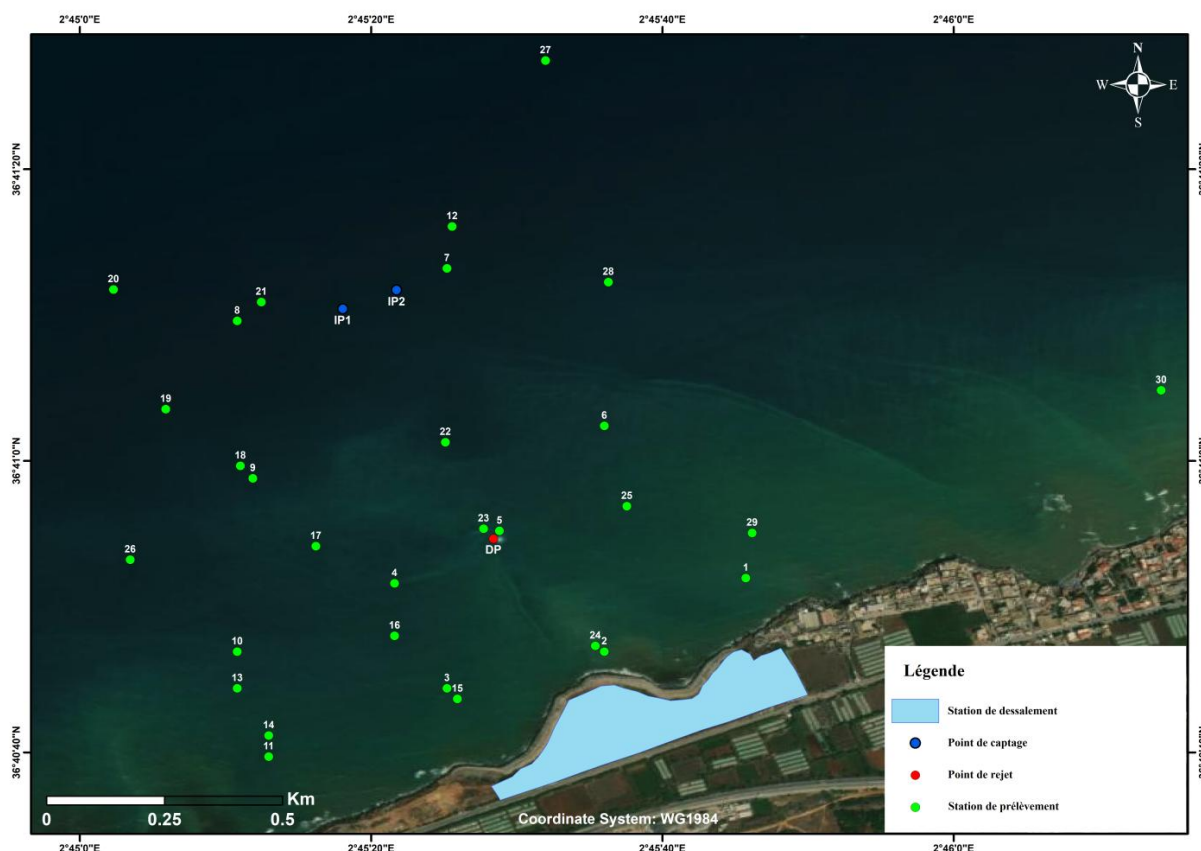
Les coordonnées géographiques des stations d'échantillonnage sont présentées dans le Tableau 1 de l'Annexe 1.



**Figure 26 :** Localisation des points de prélèvement autour de la zone de rejet de la station de dessalement de Palm-Beach (AA.Adem, 2021)

Pour le site de Fouka 1, quatre campagnes d'échantillonnage en mer ont été réalisées durant les mois de mai et septembre de l'année 2016, août 2017 et décembre 2018 afin de déterminer les propriétés du milieu récepteur et en évaluer sa qualité (Figure 27).

Les coordonnées des stations échantillonnées sont présentées dans le Tableau 2, en Annexe 1.



**Figure 27 :** Répartition spatiale des stations de prélèvement au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 (AA.ADEM, 2023)

## 2.2. Prélèvements et mesures *in-situ*

Avant de procéder aux prélèvements, nous avons pris soin de nettoyer ; voire stériliser le matériel nécessaire. Les flacons destinés à la conservation des échantillons ont été étiquetés de manière à ce que l'on puisse discerner les dates de prélèvement, la station d'échantillonnage et le paramètre à mesurer.

Les prélèvements ont été réalisés manuellement, à l'aide d'un sceau ou au moyen d'une bouteille Niskin de 5 litres selon les conditions, et les flacons sont rincés systématiquement à l'eau échantillonnée avant d'être remplis.

Les échantillons ont ensuite été recueillis dans des flacons ; dont la matière et le volume dépendent du type d'analyse à effectuer (en polyéthylène pour l'ensemble de paramètres et en verre pour les mesures microbiologiques), et conservés dans une glacière (température : 4°C – 6°C) à l'abri de la lumière avant d'être acheminés au laboratoire et analysés.

Les échantillons destinés à l'étude des populations phytoplanctoniques ont été fixés au lugol immédiatement après le prélèvement.

Les paramètres mesurés *in-situ* et au laboratoire lors de chaque campagne sont présentés dans le Tableau 9.

**Tableau 9:** Collecte des échantillons, méthodes de conservation et mesures réalisées pendant les campagnes

| Site                                                  | Unité de Palm-Beach                               |                                                   |                                                   | Unité de Fouka 1<br>(zone de rejet)                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                       | Eau brute                                         | Rejet                                             | Eau de mer (zone de rejet)                        |                                                                                                                                                           |
| Date de prélèvement                                   | 12/04/2021                                        | 12/04/2021                                        |                                                   | 25/05/2016                                                                                                                                                |
|                                                       | 04/05/2021                                        | 04/05/2021                                        |                                                   | 19/09/2016                                                                                                                                                |
|                                                       | 07/06/2021                                        | 07/06/2021                                        | 21/06/2021                                        | 01/08/2017                                                                                                                                                |
|                                                       | 27/04/2021                                        | 27/04/2021                                        |                                                   | 05/12/2018                                                                                                                                                |
|                                                       | 21/06/2021                                        | 21/06/2021                                        |                                                   |                                                                                                                                                           |
| Mode de prélèvement                                   | Direct                                            | Sceau                                             | Direct                                            | Bouteille Niskin                                                                                                                                          |
| Paramètres mesurés <i>in-situ</i> /Appareil de mesure | Température/Conductimètre (WTW/315i/Set)          | Température/Conductimètre (WTW/315i/Set)          | Température/Conductimètre (WTW/315i/Set)          | Température – Salinité – Conductivité – pH – Oxygène dissous / valise multi-paramètres (HANNA 9829) Courant (Courantomètre Valport, modèle 108)           |
|                                                       | Salinité/Conductimètre (WTW/315i/Set)             | Salinité/Conductimètre (WTW/315i/Set)             | Salinité/Conductimètre (WTW/315i/Set)             |                                                                                                                                                           |
|                                                       | Conductivité/Conductimètre (WTW/315i/Set)         | Conductivité/Conductimètre (WTW/315i/Set)         | Conductivité/Conductimètre (WTW/315i/Set)         |                                                                                                                                                           |
|                                                       | pH/ pH-mètre de terrain (WTW/315i/S)              | pH/ pH-mètre de terrain (WTW/315i/S)              | pH/ pH-mètre de terrain (WTW/315i/S)              |                                                                                                                                                           |
|                                                       | Oxygène dissous/Oxymètre de terrain (Oxi/WTW 197) | Oxygène dissous/Oxymètre de terrain (Oxi/WTW 197) | Oxygène dissous/Oxymètre de terrain (Oxi/WTW 197) |                                                                                                                                                           |
| Paramètres mesurés au laboratoire                     | Turbidité                                         | Turbidité                                         | Turbidité                                         | Matière en suspension<br>Matière organique particulaire<br>Sels nutritifs<br>Chlorures<br>Solides dissous totaux (TDS)<br>Vitesse et direction du courant |
|                                                       | Matière en suspension                             | Matière en suspension                             | Matière en suspension                             |                                                                                                                                                           |
|                                                       | Matière organique particulaire                    | Matière organique particulaire                    | Matière organique particulaire                    |                                                                                                                                                           |
|                                                       | Coliformes totaux                                 | Coliformes totaux                                 | Coliformes totaux                                 |                                                                                                                                                           |
|                                                       | Coliformes fécaux                                 | Coliformes fécaux                                 | Coliformes fécaux                                 |                                                                                                                                                           |
|                                                       | Streptocoques fécaux                              | Streptocoques fécaux                              | Streptocoques fécaux                              |                                                                                                                                                           |
|                                                       | Staphylocoques totaux                             | Staphylocoques totaux                             | Staphylocoques totaux                             |                                                                                                                                                           |
|                                                       | Sels nutritifs                                    | Sels nutritifs                                    | Sels nutritifs                                    |                                                                                                                                                           |
|                                                       | Phytoplancton                                     | Phytoplancton                                     | Phytoplancton                                     |                                                                                                                                                           |



### 2.3. Traitement des échantillons et techniques d'analyses

Il est important de noter que certains échantillons ont été traités dès lors qu'ils ont été acheminés au laboratoire, d'autres ont été conservés au congélateur ou à l'abri de la lumière jusqu'à leur analyse.

Le travail en laboratoire a inclus l'analyse de la turbidité, des matières en suspension, des nutriments, des chlorures, des solides dissous totaux, du phytoplancton et de l'état microbiologique. Tandis que la turbidité et les matières en suspension ont été mesurées le jour du prélèvement, les analyses des autres paramètres ont été menées dans un second temps.

Tous ces paramètres sont déterminants dans l'évaluation de la qualité du milieu marin.

#### 2.3.1. Mesure de la turbidité

La turbidité est donnée en NTU (Nephelometric Turbidity Unit). Elle a été mesurée au laboratoire à l'aide d'un turbidimètre de terrain de la marque Lovibond® modèle TurbiDirect ; pour le site de Palm-Beach, et d'un turbidimètre de paillasse de marque HANNA instruments (HI88703) durant les campagnes effectuées au niveau du site de Fouka 1.

Les appareils utilisés ont été préalablement calibrés à l'aide de solutions d'étalonnage de concentrations.

#### 2.3.2. Analyse de la matière en suspension

La procédure utilisée pour l'analyse de la matière en suspension est celle référencée par AMINOT et CHAUSSEPIED (1983).

Elle consiste à retenir les particules dont la taille est supérieure à 0,7µm en filtrant un certain volume d'eau à travers une membrane (filtre en fibre de verre) préalablement pesée et disposée sur une rampe de filtration.

Après filtration et séchage, les filtres contenant les matières en suspension sont à nouveau pesés pour déterminer la masse sèche totale ou concentration de ces matières dans le volume filtré correspondant.

La masse sèche totale de matières en suspension ; c'est-à-dire la concentration de la matière en suspension présentes dans le volume filtré est donnée par la formule qui suit.

$$\text{MES (mg/L)} = (P_2 - P_1)/V \quad (1)$$

**P<sub>1</sub>** : Poids du filtre avant filtration (mg) ;

**P<sub>2</sub>** : Poids du filtre après la filtration (mg) ;

**VF** : Volume de l'échantillon filtré (L) (AMINOT et CHAUSSEPIED 1983).

### 2.3.3. Mesure de la matière organique particulaire

L'analyse de la matière organique particulaire est réalisée par la méthode de perte au feu, qui consiste à brûler les filtres issus de la mesure de la concentration des matières en suspension dans un four à moufle (AMINOT et CHAUSSEPIED, 1983).

La méthode de mesure de la matière organique particulaire est exprimée dans la formule suivante :

$$[\text{MOP}](\%) = (P_1 - P_2)/P_1 \times 100 \quad (2)$$

$P_1$  : Poids du creuset et du filtre avant incinération (mg) ;

$P_2$  : Poids du creuset et du filtre après incinération (mg).

### 2.3.4. Dosage des sels nutritifs

Selon le constructeur SKALAR® 1998, l'analyse des sels nutritifs (Nitrite, Nitrate, phosphate, Silicate) est effectuée par colorimétrie à flux continu, au moyen de l'Auto-Analyzer SKALAR (SAN PLUS).

Cet appareil repose sur le principe dynamique d'une analyse liquide en flux : une pompe péristaltique déplace en continu l'échantillon à travers les différents circuits de mesure spécifiques à chaque nutriment.

Les réactions chimiques s'effectuent au niveau de la veine en progression et l'analyse des différents échantillons se fait par séquence (RODIER *et al*, 2016).

### 2.3.5. Dosage des chlorures

L'analyse des ions chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) est basée sur la méthode classique de Mohr, dont le protocole a été adapté par Knudsen pour l'eau de mer.

Les chlorures sont dosés par volumétrie, c'est-à-dire qu'ils sont dosés en milieu neutre par une solution titrée de nitrate d'argent  $\text{AgNO}_3$  en présence de chromate de potassium  $\text{K}_2\text{CrO}_4$ . La fin de la réaction est indiquée par un virage de couleur l'apparition d'une teinte rouge (RODIER *et al*, 2016).

Sachant qu'un millilitre de solution de nitrate d'argent 0,2 N correspond à 7,09 mg d'ion chlore, la teneur en chlorures s'exprime comme suit :

$$\text{Cl}^- = \{(V \times 1\,000) - 0,2\} \times 7,0906 \text{ mg/l} \quad (3)$$



**2.3.6. Dosage des solides dissous totaux**

Les solides dissous totaux (TDS, pour Total Dissolved Solids) représentent la quantité totale de matière solide présente sous forme dissoute dans l'eau.

Ils correspondent à l'agrégat de tous les minéraux, métaux, cations et anions qui se trouvent en solution dans le liquide (LE GUERN, 2003).

L'analyse des solides dissous totaux repose sur une évaporation lente avec élévation de température d'un volume d'eau choisi en fonction du résidu sec attendu. Dessiccation à l'étuve à 180° C et pesée du résidu (SPELLMAN, 2020). L'échantillon d'eau est d'abord filtré à travers une membrane qui permet de retenir les solides en suspension et de laisser passer les solides dissous. Lorsque la partie filtrée de l'échantillon est évaporée, les solides dissous dans l'eau restent au fond (résidu d'évaporation). C'est ce qui constitue les solides dissous totaux (BOUNIFA et LAKHDARI, 2015).

La concentration en résidus secs (TDS) est calculée à partir de la formule suivante :

$$\text{TDS (g/L)} = [(P_2 - P_1)] \times 1\,000/V \quad (3)$$

**P<sub>1</sub>** : Poids du creuset avant filtration (en g) ;

**P<sub>2</sub>** : Poids du creuset et de son contenu après chauffage à 180°C (en g) ;

**V** : Volume de la prise d'essai (en ml) (Temmar, 2016).

**2.3.7. Analyse microbiologique**

La présence de microorganismes pathogènes en milieu marin est causée par les activités anthropiques ; entre autres les rejets industriels (Taminiau et al., 2014).

Les indicateurs microbiologiques ciblés pour l'ensemble des matrices d'eau analysées (eau de mer brute, rejet de saumure, et eau produite) sont : les coliformes totaux, les coliformes fécaux (ou thermotolérants), les streptocoques fécaux et les staphylocoques.

Ces analyses bactériologiques ont été réalisées en utilisant la méthode de filtration sur membrane.

Le processus consiste à faire passer un volume défini de l'échantillon à travers une membrane stérile afin d'y retenir les microorganismes présents.

La membrane est ensuite transférée sur un milieu nutritif approprié (Tableau 10). Après une période d'incubation, les colonies sont dénombrées pour quantifier les germes et les identifier.

**Tableau 10:** *Milieux d'isolement et conditions d'incubation des germes recherchés (REJSEK, 2002)*

| Indicateurs microbiologiques ciblés | Milieux de culture et d'identification | Paramètres d'incubation (Durée / température) | Résultats attendus    |
|-------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|
| Coliformes totaux                   | Tergitol                               | 24 - 48h / 37°C                               | Colonies rouge jaune  |
| Coliformes fécaux                   | Tergitol                               | 24 - 48h / 44°C                               | Colonies jaune        |
| Streptocoques fécaux                | Slanetz et Bartley                     | 24 - 48h / 44°C                               | Colonies rouge brique |
| Staphylocoques                      | Chapman                                | 24 - 48h / 37°C                               | Colonies jaune dorée  |

### 2.3.8. Étude du phytoplancton

L'analyse de la composition phytoplanctonique des échantillons recueillis fixés au Lugol acide a été réalisée par la méthode communément utilisée ; UTERMÖHL (1958).

Cette méthode qui permet de déterminer et de quantifier les espèces phytoplanctoniques, repose sur la sédimentation des cellules phytoplanctoniques présentes dans l'échantillon aqueux au fond de la cuve. Ces cellules pourront alors être dénombrés et identifiés à l'aide d'un microscope inversé aux grossissements 40X et des atlas de reconnaissance (BRIERLEY *et al.*, 2007; EDLER et ELBRÄCHTER, 2010).

### 2.4. Analyse statistique

Pour l'étude des paramètres physico-chimiques en sciences naturelles et en chimie de l'eau, on fait fréquemment appel à des techniques statistiques pour réduire la dimensionnalité des données. Ces techniques comprennent le calcul du coefficient de corrélation de Pearson, l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification hiérarchique (ADEM *et al.*, 2023; HELSTRUP *et al.*, 2007; MUKHERJEE *et al.*, 2018; SHAMMI *et al.*, 2017).

La classification hiérarchique a été appliquée selon la méthode de Ward, afin d'identifier les regroupements dans les stations d'échantillonnage et discriminer entre elles (ALMASOUD *et al.*, 2015).

L'analyse statistique a été effectuée à l'aide des logiciels Excel, XLSTAT (2010.3) et R, version 4.2.1 (RCORETEAM, 2018).

### 2.5. Analyse spatiale

Les paramètres physicochimiques mesurés ont été spatialisés en utilisant la méthode de pondération inverse à la distance ou PID (en anglais, IDW : Inverse Distance Weighting). Basée sur le concept de pondération de la distance, cette méthode permet d'estimer les données inconnues (MALEIKA, 2020).

## **CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES**

Afin d'identifier les facteurs responsables de la variabilité spatiale des paramètres mesurés et d'évaluer l'étendue de la dispersion des rejets de saumure, la cartographie des différentes variables de l'eau de mer a été réalisée. Cette analyse spatiale a été menée au moyen du logiciel ArcGis (version 10.4) pour la zone située à proximité de la station de dessalement (ADEM *et al.*, 2023).

# ***CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS***

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre est dédié à la présentation des résultats des travaux réalisés et se divise en trois parties distinctes. La première section se concentre sur les données recueillies à la station de dessalement monobloc de Palm-Beach

Les analyses présentées dans cette section couvrent :

- la caractérisation physico-chimique et microbiologique de l'eau d'alimentation (eau de mer brute) et de la saumure (rejets concentrés) ;
- l'évaluation de la qualité de l'eau de mer dans la zone du milieu récepteur ;
- l'étude des populations phytoplanctoniques dans les trois matrices : l'eau brute, la saumure et le milieu marin d'accueil.

La deuxième section est consacrée à la présentation des caractéristiques de la saumure rejetée par la station de Fouka 1, ainsi qu'à l'évaluation de la qualité physico-chimique du milieu marin récepteur.

Enfin, la troisième section est dédiée aux résultats des analyses statistiques réalisés et principales conclusions tirés de ces deux cas d'étude.

#### **I- Section 1. Caractérisation des rejets de l'unité de Palm Beach et du milieu récepteur**

##### **1. Qualité des rejets de saumure et de l'eau d'alimentation**

Les données physico-chimiques relatives à l'eau de mer brute et aux effluents de saumure de l'unité de Palm-Beach sont répertoriées dans le Tableau 11.

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

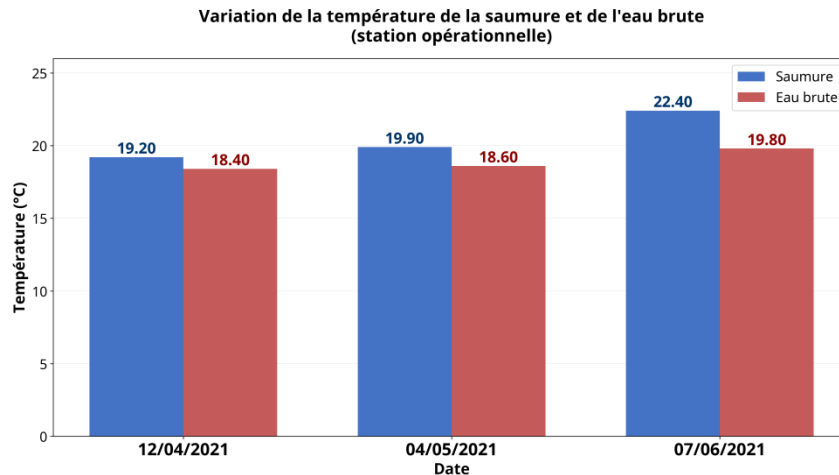
**Tableau 11:** Qualité physico-chimique de l'eau de mer brute et de la saumure concentrée de l'unité de Palm-Beach

|                                 | 12/04/2021<br>Station<br>opérationnelle |       | 27/04/2021<br>Station à l'arrêt |       | 04/05/2021<br>Station opérationnelle |       | 07/06/2021<br>Station opérationnelle |       | 21/06/2021<br>Station à l'arrêt |       |
|---------------------------------|-----------------------------------------|-------|---------------------------------|-------|--------------------------------------|-------|--------------------------------------|-------|---------------------------------|-------|
| Paramètre                       | Eau brute                               | Rejet | Eau brute                       | Rejet | Eau brute                            | Rejet | Eau brute                            | Rejet | Eau brute                       | Rejet |
| Température (°C)                | 18,40                                   | 19,20 | 20,30                           | 18,60 | 18,60                                | 19,90 | 19,80                                | 22,40 | 22,20                           | 22,90 |
| Salinité (psu)                  | 36,30                                   | 54,20 | 36,90                           | 36,80 | 36,90                                | 61,30 | 37,00                                | 59,40 | 36,90                           | 36,50 |
| Conductivité électrique (mS/cm) | 51,80                                   | 73,20 | 48,90                           | 49,20 | 48,80                                | 77,70 | 51,20                                | 78,70 | 51,80                           | 51,90 |
| pH                              | 8,02                                    | 7,30  | 8,01                            | 7,98  | 8,07                                 | 7,87  | 8,09                                 | 7,90  | 7,49                            | 7,36  |
| Oxygène dissous (mg/L)          | 12,65                                   | 9,97  | 10,56                           | 11,92 | 11,06                                | 10,76 | 5,08                                 | 4,23  | NA                              | NA    |
| Turbidité (NTU)                 | 0,90                                    | 0,70  | 1,90                            | 4,80  | 0,65                                 | 0,50  | 0,45                                 | 0,30  | 2,40                            | 2,70  |
| Matière en suspension (mg/L)    | 10,93                                   | 11,06 | 40,8                            | 29,20 | 20,80                                | 11,73 | 29,20                                | 21,9  | 3382,4                          | 34,30 |
| MOP (%)                         | 31,11                                   | 60,58 | 66,67                           | 66,22 | 55,91                                | 70,76 | 55,82                                | 57,99 | 88,50                           | 74,95 |

NA : Non-analysé.

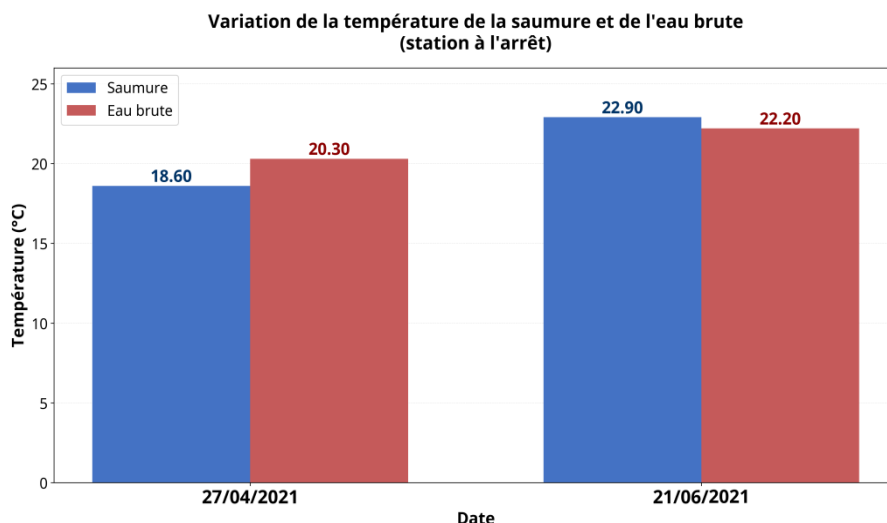
### 1.1. Variation de la température

D'après les mesures répertoriées (Tableau 11) la température de l'eau d'alimentation (eau brute) de la station de Palm-Beach était comprise entre 19,20 C° et 22,40 °C (Figure 28). Parallèlement, la température de la saumure se situait dans la fourchette de 18,40 °C à 19,90 °C (Figure 37).



**Figure 28 :** *Variation de la température de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach*

En période d'arrêt, les mesures obtenues montrent que la température de la saumure s'échelonne entre 18,60 C° et 22,90 °C. Celle de l'eau d'alimentation (eau brute) varie quant à elle de 20,30 C° à 22,20 °C (Figure 29).



**Figure 29 :** *Variation de la température de la saumure et de l'eau d'alimentation au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach*

Bien qu'un écart minimal ait été constaté entre les deux flux d'eau durant cette période d'étude, la température du rejet de la station de dessalement de Palm-Beach demeure largement conforme

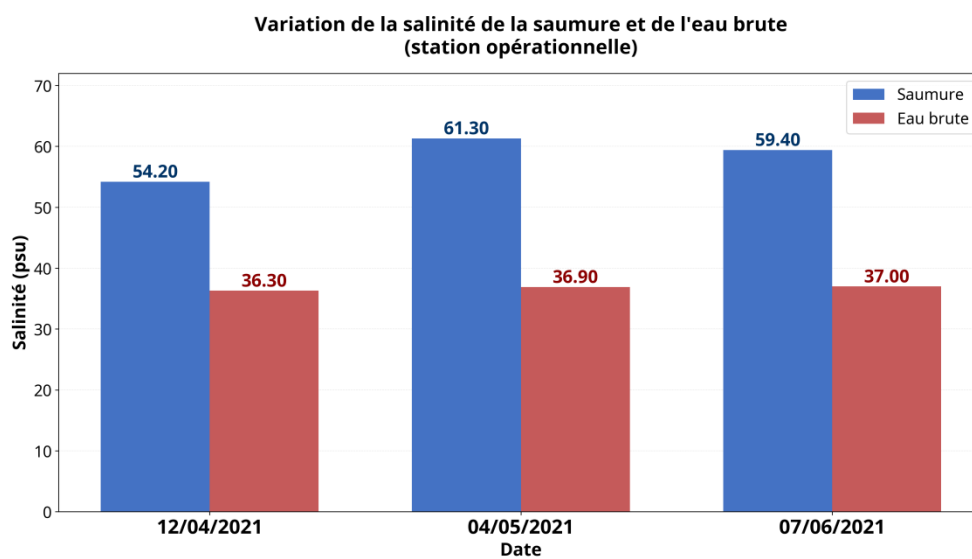
### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

aux exigences réglementaires. En effet, elle ne dépasse pas le seuil maximal de 30 °C fixé par la norme algérienne pour les rejets industriels (JORA, 2006).

#### 1.2. Variation de la salinité

Durant la période de fonctionnement de l'unité de Palm-Beach, les mesures révèlent que la salinité de la saumure concentrée est significativement supérieure à celle de l'eau d'alimentation brute.

Les valeurs étaient comprises entre 54,2 psu et 61,30 psu ; avec une moyenne de 58,30 psu pour la saumure, et ne dépassaient pas 37,00 psu pour l'eau brute (Figure 30).



**Figure 30 :** Variation de la salinité de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach

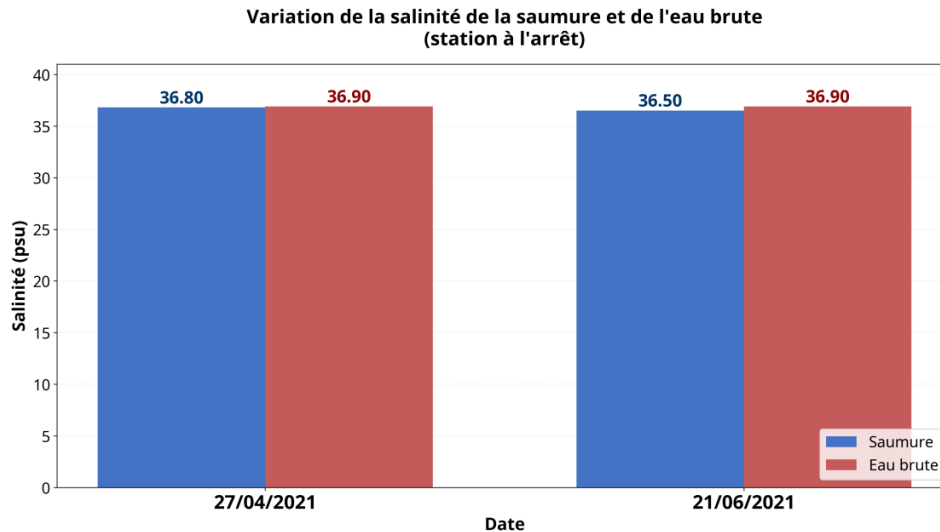
En période d'arrêt de la station (Figure 31), la valeur moyenne de salinité de la saumure (36,65 psu) est très proche de celle de l'eau brute, mesurée aux environs de 36,90 psu.

Cette salinité est toutefois légèrement inférieure à la fourchette saline habituelle de l'eau de mer dans la zone d'étude, qui est généralement comprise entre 37 et 38 psu (BAKALEM *et al.*, 2020).

Ainsi, le rejet direct de ce sous-produit contenant parfois deux fois plus de sels que l'eau de mer, pourrait endommager l'écosystème côtier (ASALA *et al.*, 2022). En effet, avec une densité plus importante que celle du milieu récepteur, la saumure aura tendance à s'acouler au fond et influencer les espèces benthiques (FERNÁNDEZ-TORQUEMADA *et al.*, 2009).



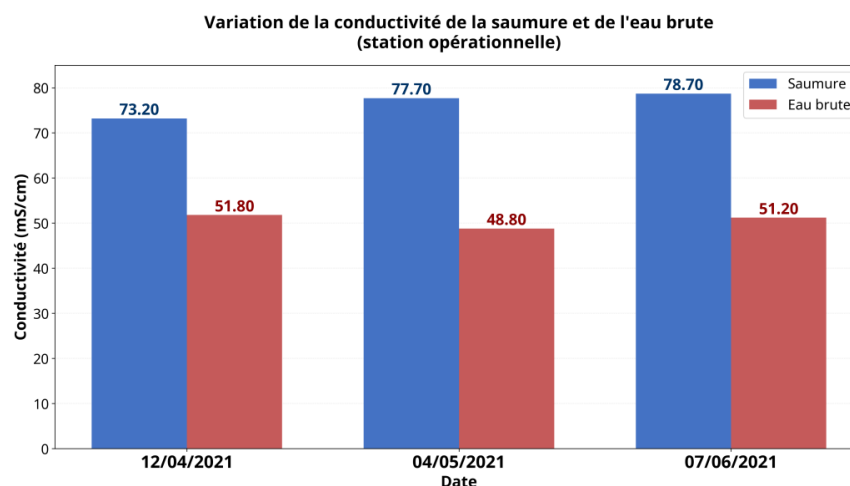
## CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS



**Figure 101 :** *Variation de la salinité de la saumure et de l'eau d'alimentation au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach*

### 1.3. Variation de la conductivité

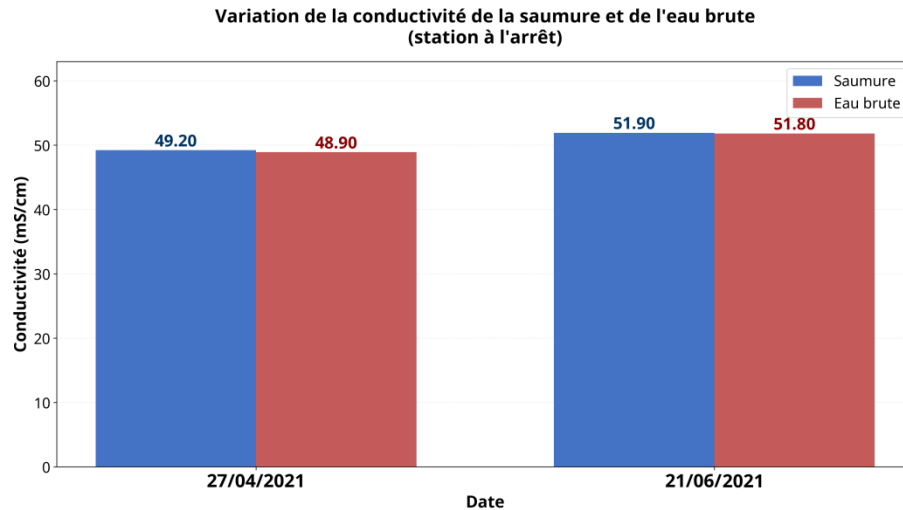
En période d'activité de l'unité de dessalement de Palm-Beach, les mesures ont montré que la conductivité de l'eau brute d'alimentation s'échelonnait entre 48,80 mS/cm et 51,80 mS/cm, avec une moyenne établie autour de 50,60 mS/cm (Figure 32). La saumure rejetée, concentrée, affichait une conductibilité nettement supérieure. Ses valeurs étaient comprises entre un minimum de 73,20 mS/cm et un maximum de 78,70 mS/cm, pour une moyenne de 76,53 mS/cm.



**Figure 32 :** *Variation de la conductivité de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach*

Les mesures effectuées lors de l'arrêt de la station indiquent que les valeurs de conductivité n'excèdent pas les 52 mS/cm, avec une conductivité moyenne de 50,55 mS/cm pour la saumure et une valeur moyenne de 50,35 mS/cm pour l'eau brute (Figure 32).

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

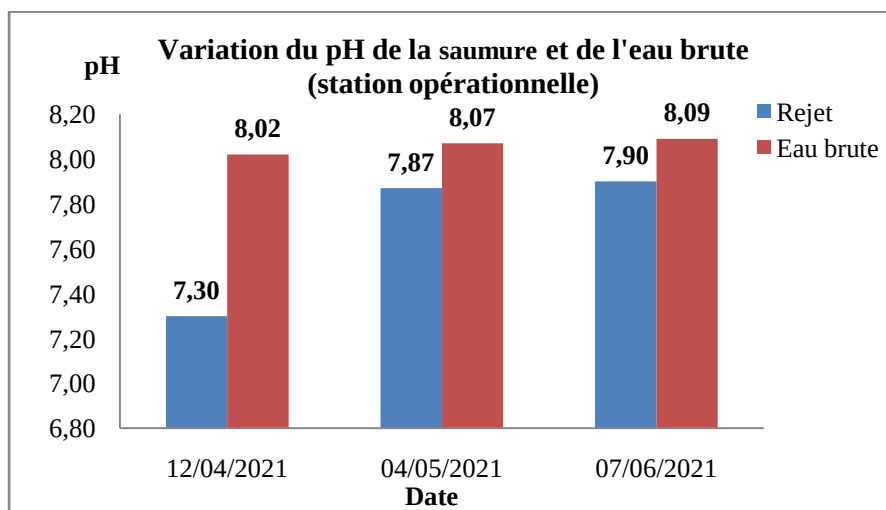


**Figure 33 :** Variation de la conductivité de la saumure et de l'eau d'alimentation au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach

La conductivité correspond à la concentration en sels dissous (AMINOT et KÉROUEL, 2007), il n'est donc pas étonnant d'enregistrer des valeurs aussi élevées pour la saumure puisqu'il s'agit d'une solution de sel fortement concentrée générée lors du processus de dessalement (MÉRICQ, 2009).

#### 1.4. Variation du pH

Durant la période d'activité de la station de Palm-Beach, les valeurs du pH de l'eau brute oscillaient entre 8,02 et 8,09. Le pH reste globalement stable et présente une alcalinité plus marquée, alors que celui des rejets reste inférieur au pH de l'eau brute et présente une légère acidification qui a atteint une valeur de 7,30 (Figure 34).

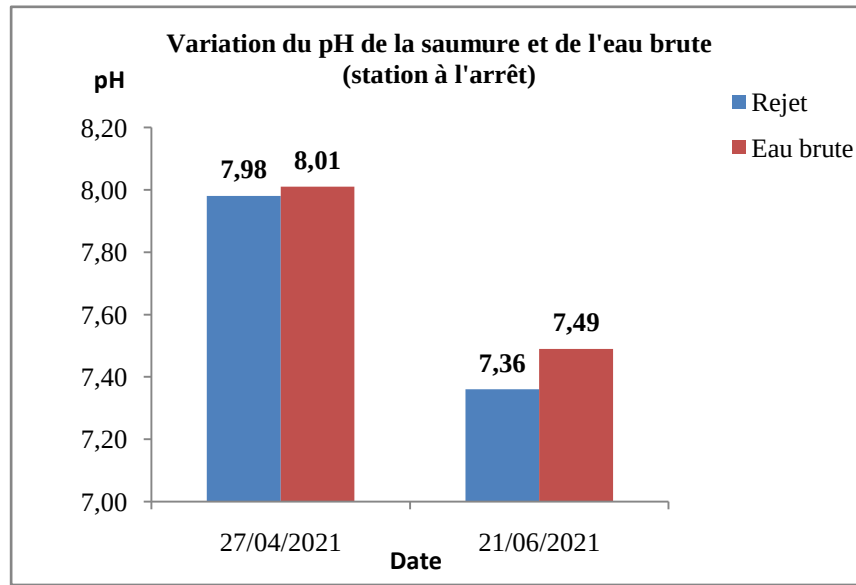


**Figure 34 :** Variation du pH de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Au contraire en période d'arrêt de l'installation, les valeurs de pH du rejet et de l'eau brute sont très proches l'une de l'autre et la baisse générale des niveaux de pH au mois de juin (Figure 35) ne peut être liée qu'aux variations saisonnières.

Ce qui nous amène à conclure que le fonctionnement de l'installation tend à abaisser légèrement le pH du rejet par rapport à l'eau d'origine. En raison peut-être de l'utilisation de produits chimiques durant le processus de dessalement.



**Figure 35 :** *Variation du pH de la saumure et de l'eau d'alimentation au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach*

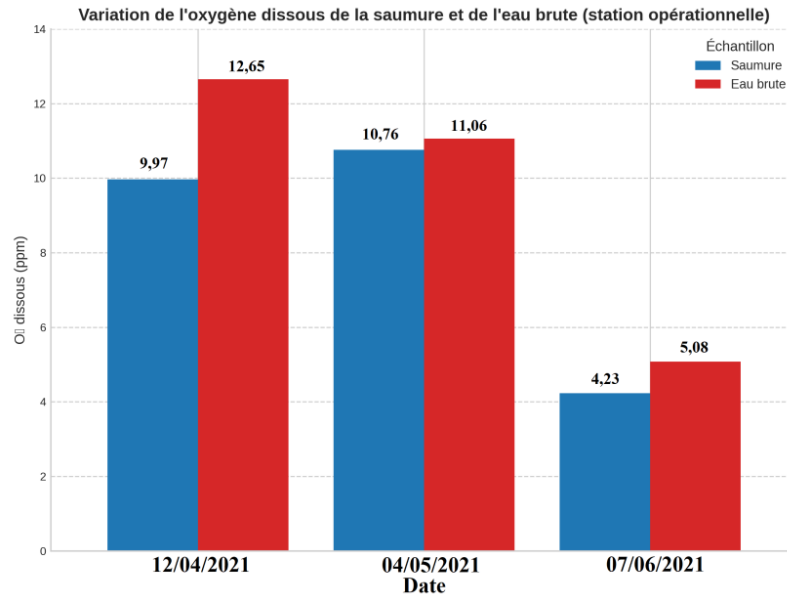
Les valeurs de pH de la saumure sont proches de celles de l'eau d'alimentation et répondent aux normes algériennes (entre 6,5 et 8,5) (JORA, 2006).

#### 1.5. Variation de l'oxygène dissous

Durant le fonctionnement de l'installation, les concentrations en oxygène dissous mesurées au niveau de la saumure étaient comprises entre un minimum de 4,23 ppm et un maximum de 10,76 ppm ; avec une moyenne de 8,32 ppm. Une valeur moyenne de 9,60 ppm a été enregistrée pour l'eau brute, avec des teneurs allant de 5,08 ppm à 12,65 ppm (Figure 36).

À l'arrêt de la station, les teneurs en oxygène dissous mesurées au niveau de la saumure et de l'eau brute étaient de 11,92 ppm et 10,56 ppm respectivement (Figure 37).

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS



**Figure 36 :** Variation de l'oxygène dissous de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach

Une eau est considérée comme sursaturée en air si elle contient 9,1 mg/L d'oxygène (RODIER *et al.*, 2016). C'est d'ailleurs ce qui a été constaté pour l'eau d'alimentation et la saumure qui sont bien oxygénées en raison peut être la prise d'eau de mer est située dans une zone à forte activité de phytoplancton qui produit de l'oxygène par photosynthèse, du brassage des masses d'eau.

Au contraire, les faibles valeurs enregistrées lors de la troisième sortie pourrait être liées à l'utilisation de certains produits chimiques durant les processus de dessalement tel que le bisulfite de sodium ( $\text{HNaO}_3\text{S}$ ). Celui-ci est utilisé comme réducteur et donc consomme de l'oxygène afin d'éliminer le chlore résiduel (chlore/chloramines) et protéger les membranes (FALLATAH *et al.*, 2018).

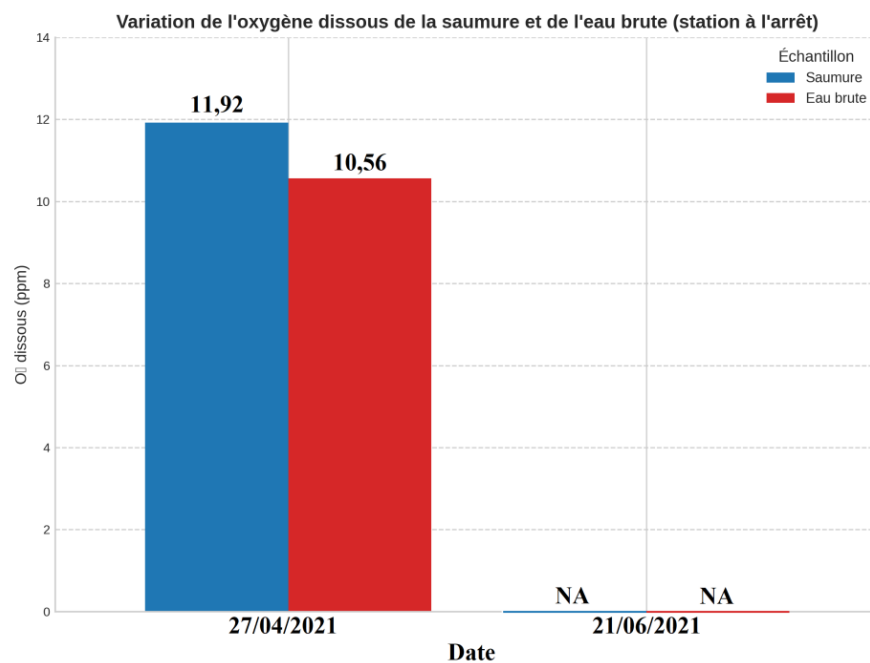
Les valeurs d'oxygène dissous anormalement élevées dans l'eau brute sont surprenantes, et peuvent s'expliquer par une combinaison de facteurs environnementaux et techniques ; à savoir :

- La prolifération d'algues (*Blooms phytoplanctoniques*) en période estivale ou dans les eaux côtières riches en nutriments. L'activité liée à la présence du phytoplancton et des algues microscopiques qui rejettent de grandes quantités d'oxygène (FARIAS *et al.*, 2026);
- Le mode de captage et l'agitation de la mer augmentent les teneurs en oxygène dissous au niveau de l'eau brute (contact direct avec l'atmosphère) ; surtout si la prise d'eau est en surface ou en faible profondeur et c'est souvent le cas pour les stations de taille moyenne.

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

- L'hydrodynamisme permet à l'oxygène de l'air de se dissoudre massivement dans les premiers mètres de la colonne d'eau.
- Les turbulences mécaniques lors du pompage peuvent augmenter mécaniquement le taux d'oxygène dissous mesuré juste avant le prétraitement, lorsque le système d'aspiration ou les conduites de prise d'eau subissent des vortex ou des micro-entrées d'air au niveau des pompes de transfert où l'air est vigoureusement mélangé à l'eau de mer sous pression (THABET *et al.*, 2023).

L'hypothèse d'une erreur de lecture métrologique ne peut être écartée, ou notamment un défaut d'étalonnage de la sonde ou une dérive du capteur au contact d'une eau de mer à forte salinité.



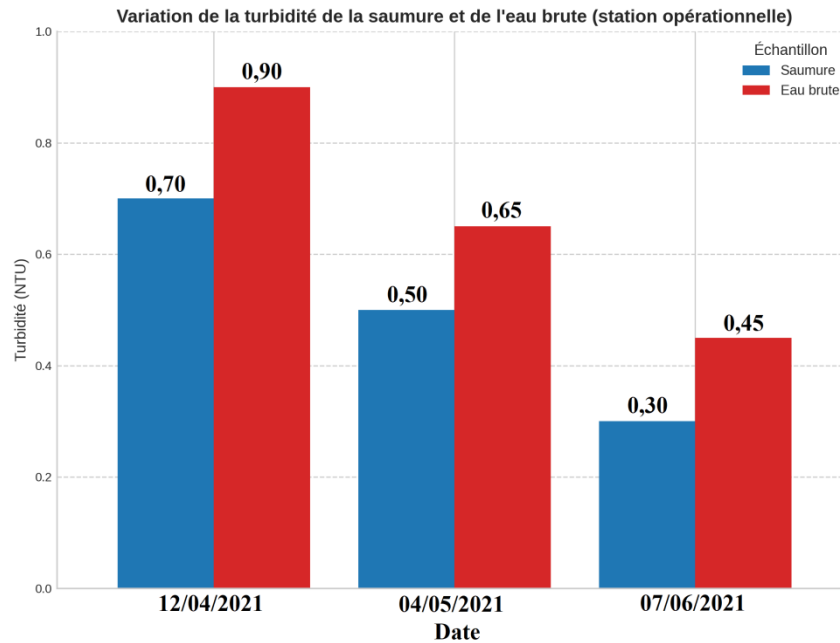
**Figure 37 :** Variation de l'oxygène dissous de la saumure et de l'eau d'alimentation au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach

#### 1.6. Variation de la turbidité

Pendant la période de fonctionnement de l'unité de dessalement, la turbidité de la saumure concentrée est restée comparable à celle de l'eau brute d'alimentation.

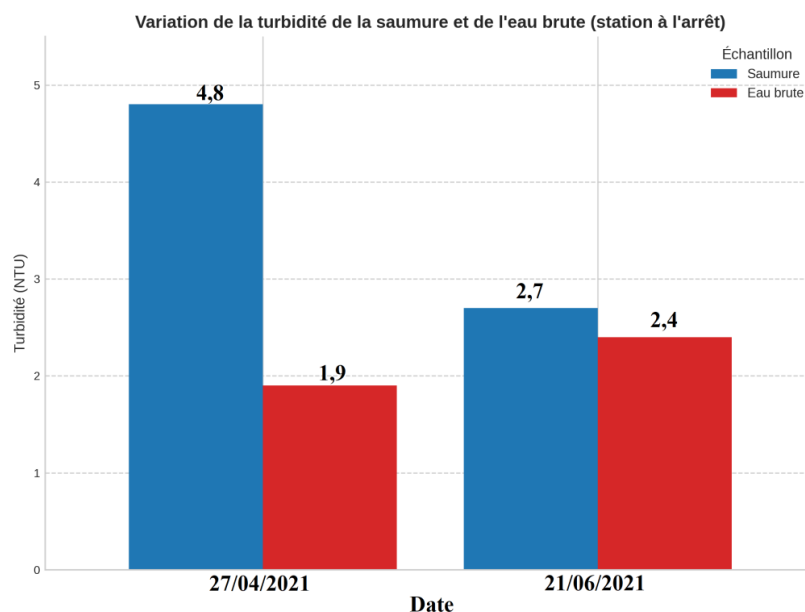
La valeur moyenne était de 0,5 NTU pour la première et de 0,67 NTU pour la seconde, avec des valeurs comprises entre 0,3 NTU et de 0,7 NTU ; et entre 0,45 et 0,9 NTU respectivement (Figure 38).

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS



**Figure 38 :** *Variation de la turbidité de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach*

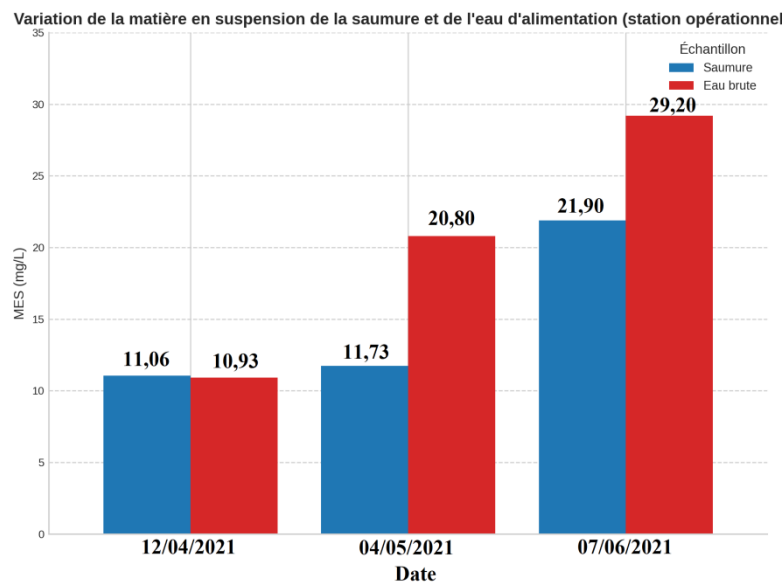
À l'arrêt de l'installation, c'est-à-dire en l'absence de prétraitements physiques et chimiques employés en amont, que sont la filtration sur sable, la filtration sur filtre à cartouche et la coagulation, la turbidité moyenne de la saumure était de 3,75 NTU, celle de l'eau brute était de 2,15 NTU (Figure 39).



**Figure 39 :** *Variation de la turbidité de la saumure et de l'eau d'alimentation durant au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach*

### 1.7. Variation de la matière en suspension

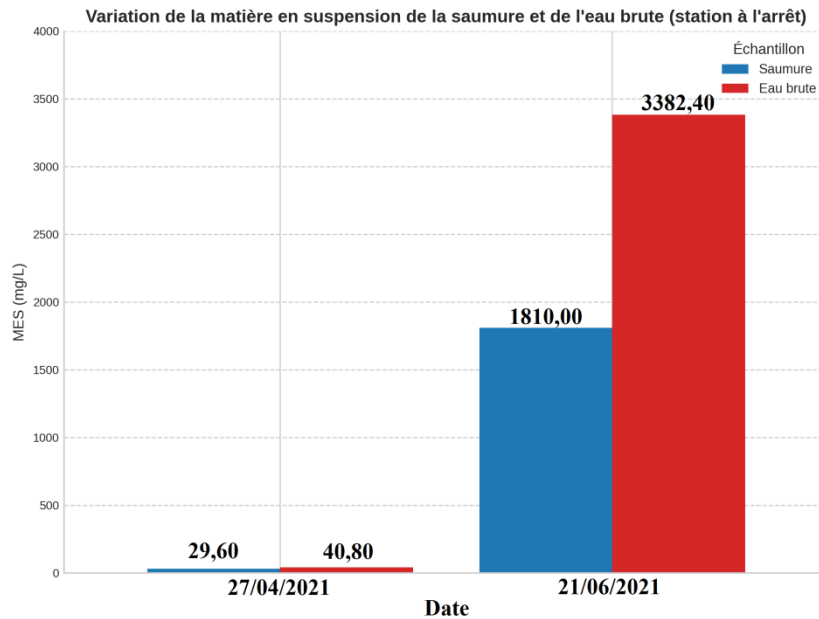
Durant la période de fonctionnement de la station de dessalement, les concentrations en matières en suspension mesurées sont restées conformes à la réglementation algérienne. Elles n'ont pas excédé le seuil fixé pour les rejets industriels, qui est de 35 mg/l (JORA, 2009). Elles étaient comprises entre 11,06 et 21,90 mg/l pour la saumure ; avec une valeur moyenne de 14,90 mg/l. Celles de l'eau brute ont variés entre 10,93 et 29,20 mg/l ; avec une moyenne de 20,31 mg/l (Figure 40).



**Figure 40 :** *Variation de la matière en suspension de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach*

Les concentrations sont par contre beaucoup plus élevées à l'arrêt de l'installation aussi bien pour la saumure que pour l'eau brute ; puisqu'aucun traitement en amont n'est opéré. Les valeurs moyennes sont de 919,80 mg/l et de 1711,6 mg/l respectivement (Figure 41), ceci pourrait être imputable à l'état de la mer et aux travaux de dragage effectuées au niveau de la zone étudiée.

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS



**Figure 41 :** *Variation de la matière en suspension de la saumure et de l'eau d'alimentation au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach*

#### 1.8. Variation de la matière organique particulière

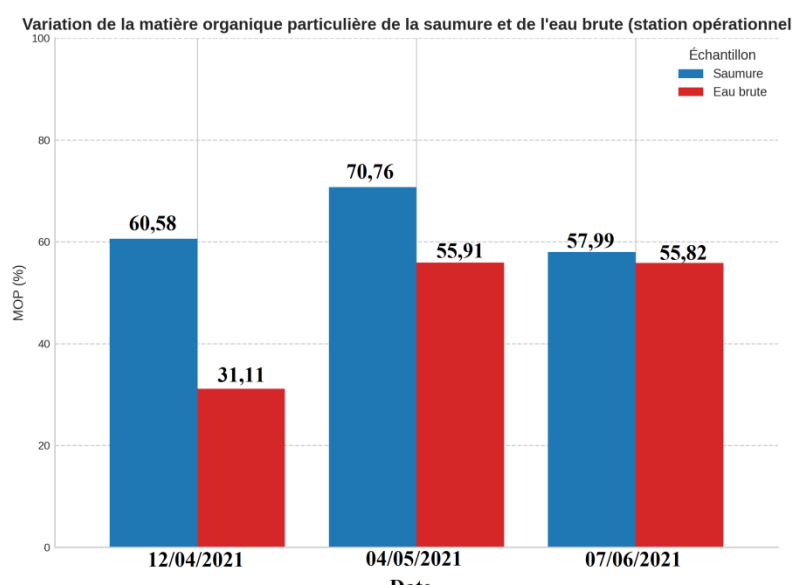
Durant l'exploitation de la station de dessalement de Palm-Beach, la teneur moyenne en matière organique particulière de la saumure était de 63,11 %. Les valeurs mesurées se situaient dans une fourchette allant de 57,99 % à 70,76 %, et l'eau brute en contenait entre 31,11 % et 55,91 % ; avec une moyenne de 47,61 % (Figure 42).

À l'arrêt de la station, les valeurs moyennes de matière organique particulière étaient de 70,95 % pour la saumure et de 77,59 % pour l'eau brute (Figure 43).

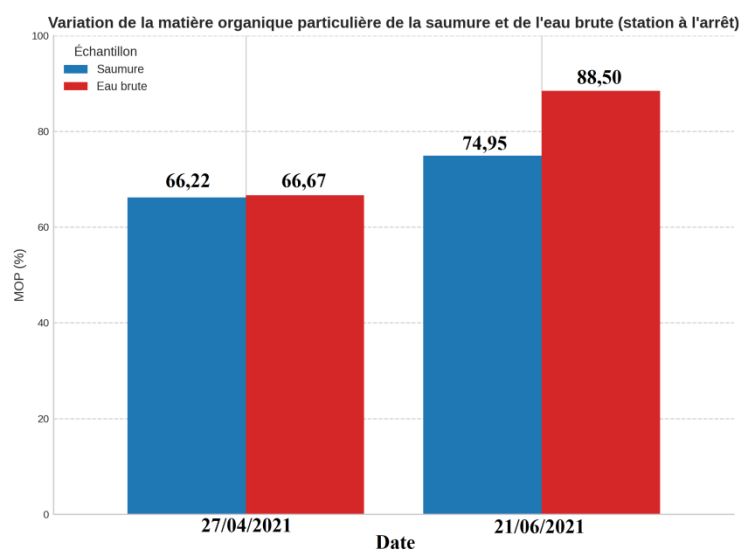
Cette hausse de la matière organique dans la saumure peut s'expliquer par un effet de concentration lié au rejet des sels lié lors de la séparation membranaire, par l'apport d'additifs chimiques lors des étapes de prétraitement (coagulants, anti-incrustants, biocides), ainsi que par le passage de fractions organiques dissoutes à travers le système de filtration (MATIN *et al.*, 2021).



## CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS



**Figure 42 :** *Variation de la matière organique particulaire de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach*



**Figure 43 :** *Variation de la matière organique particulaire de la saumure et de l'eau d'alimentation au cours de l'arrêt de la station de Palm-Beach*

### 1.9. Variation des sels nutritifs

Les données relatives aux concentrations des sels nutritifs mesurées à la station de dessalement de Palm-Beach sont illustrées sur la Figure 44.

Le dosage en sels nutritifs indique un comportement classique et attendu d'une station d'osmose inverse (effet de concentration mécanique). Les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ), passent de  $0,0213 \mu\text{mole/l}$  dans

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

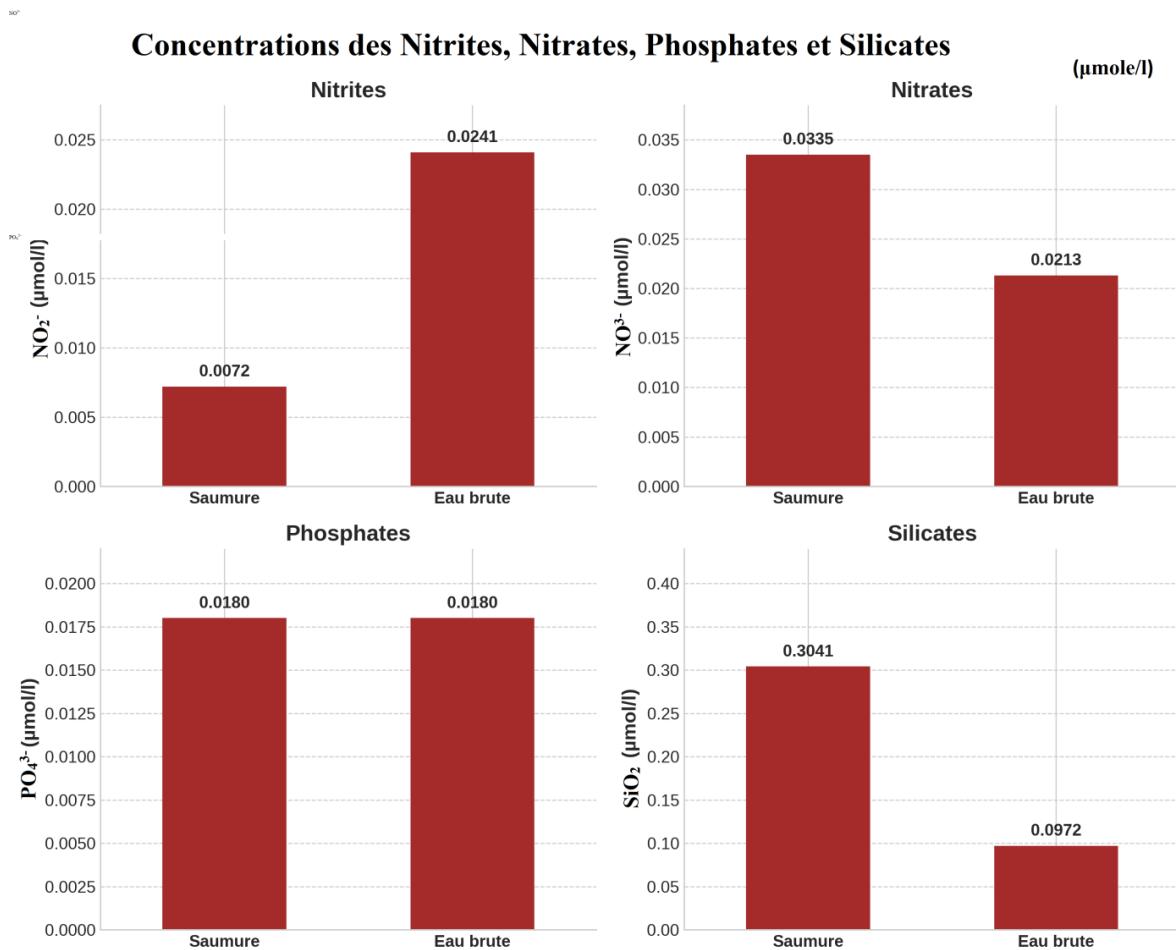
l'eau brute à 0,0335  $\mu\text{mole/l}$  dans la saumure (soit une augmentation d'environ 1,6 fois). Alors que les silicates ( $\text{SiO}_2$ ) passent de 0,0972  $\mu\text{mole/l}$  dans l'eau brute à 0,3041  $\mu\text{mole/l}$  dans la saumure (soit une forte augmentation d'environ 3,1 fois).

Les membranes retiennent donc efficacement ces ions et le facteur multiplicateur observé (particulièrement pour les silicates) correspond au taux de conversion de la station de Palm-Beach, où le volume d'eau douce extrait force la concentration des minéraux dans le flux de rejet.

Inversement, la concentration des nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) est nettement plus élevée dans l'eau brute (0,0241  $\mu\text{mole/l}$ ) que dans la saumure (0,0072  $\mu\text{mole/l}$ ).

Ce comportement s'explique par les processus d'oxydoréduction où l'eau brute pompée subit une forte aération ou l'injection du chlore durant les étapes de traitement. Les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ), très réactifs, s'oxydent alors rapidement pour se transformer en nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ). Ce qui explique conjointement la baisse des nitrites et le surplus de nitrates constaté dans la saumure finale.

Pour ce qui est des orthophosphates ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), le dosage indique une valeur de 0,018  $\mu\text{mole/l}$  aussi bien pour la saumure que pour l'eau d'alimentation. Cette égalité peut s'expliquer par l'interaction des phosphates libres avec les agents antitartres (anti-incrustants phosphonates) ou sa transformation en phosphates de calcium lors du process, masquant l'augmentation de la fraction dissoute initialement mesurée. Ou encore aux limites de sensibilité de la méthode analytique utilisée en raison des très faibles valeurs d'orthophosphates.



**Figure 44 :** Variation des teneurs en sels nutritifs de la saumure et de l'eau d'alimentation durant le fonctionnement de la station de Palm-Beach.

### 1.10. Variation des paramètres microbiologiques

Les résultats des analyses microbiologiques réalisées le 04/05/2021 sont présentés dans la Figure 45. L'analyse des indicateurs de contamination fécale et des agents pathogènes au niveau des différentes matrices d'eau, nous a révélé que les rejets de saumure étaient chargés en coliformes totaux et streptocoques fécaux.

Le dénombrement des coliformes totaux permet souvent d'apprécier l'efficacité du désinfectant utilisé (RODIER *et al*, 2016).

Dans le cas de notre étude, la concentration moyenne en coliformes totaux au niveau de la saumure était de l'ordre de 1384 UFC/100ml.

Cette valeur a dépassé la norme guide de 500 CT/100 ml fixée par la législation algérienne, mais reste en dessous de la valeur impérative de 10 000 CT/100 ml (JORA, 1993).

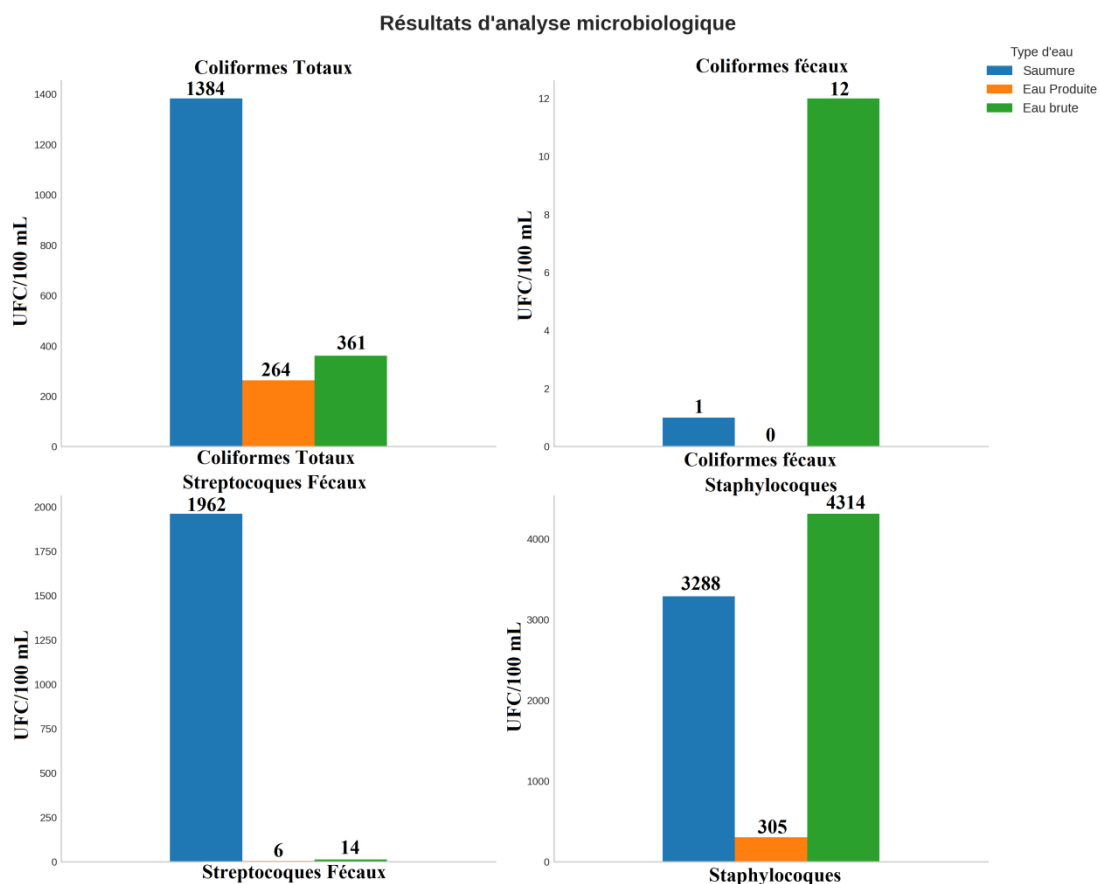
### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

La concentration en streptocoques fécaux était de l'ordre de 1962 SF/100 ml, elle dépasse la norme impérative de 1000SF/100 ml établie par la législation algérienne (JORA, 1993).

Ces germes sont assez résistants et ont tendance à persister dans le milieu ; notamment en milieux salés. Leur présence en nombre important témoigne donc d'une contamination fécale sensible et persistante (DJAHNIT *et al.*, 2023; GAUJOUS, 1995).

Les staphylocoques étaient également présents dans la saumure à une valeur de 3288 ST/100 ml, ils témoignent eux aussi d'une contamination fécale ancienne (FIGARELLA *et al.*, 2001).

Concernant l'eau d'alimentation (eau brute), les analyses microbiologiques ont révélé la présence de plusieurs germes, dont les coliformes totaux, les coliformes fécaux, les streptocoques fécaux et les staphylocoques, mais avec des teneurs loin des valeurs guides fixées par la législation algérienne. Ceci nous indique la présence d'un rejet à proximité, ou encore une contamination fécale au sein du bassin de décantation.



**Figure 45 :** Variation des paramètres microbiologiques recherchés dans la saumure et l'eau d'alimentation de la station de Palm-Beach

### 1.11. Étude des communautés phytoplanctoniques

Cette partie du travail est consacrée à la détermination qualitative et à la quantification du phytoplancton dans les échantillons recueillis à la station de Palm-Beach et dans l'environnement immédiat de son rejet de saumure.

L'inventaire et la caractérisation des espèces phytoplanctoniques ont été réalisés grâce à la méthode de sédimentation proposée par Utermôhl (1958). Cette technique a permis la quantification et l'identification des communautés planctoniques, couvrant les périodes de marche et d'arrêt de l'usine de dessalement.

Les échantillons d'eau d'alimentation, d'eau produite et de saumure recueillis pendant le fonctionnement de la station contenaient une quinzaine de genres distincts, appartenant à deux principaux groupes phytoplanctoniques ; à savoir les Diatomées et les Dinoflagellés.

Des espèces d'un tout autre groupe comme les Dichtyophycés, les euglenophycés, et les Chlorophycées ont également été observées (Figure 46a).

Les Diatomées sont le groupe le plus dominant ; avec 9 genres, ils représentent pratiquement 67,30 % de la communauté phytoplanctonique inventoriée. Ils sont essentiellement composés des genres suivants : *Amphora*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Licmophora*, *Cerataulina*, *Amphiprora*, *Tryblionella* et *Guinardia* (Figure 51). Les Dinoflagellés constituent le second groupe le plus représenté, totalisant 19,23 % de la flore avec six genres identifiés (Figure 51). Ces genres comprennent notamment des *Diplopsalis*, des *Hermesinum*, des *Ostreopsis*, des *Alexandrium* et des *Prorocentrum* (Figure 58).

Le groupe de divers constitue quant à lui 13,46% de la flore totale (Figure 46a).

L'eau brute présente la densité cellulaire totale la plus élevée ; qui est de 560 Cell/l. Elle est marquée par la prépondérance des Diatomées (92,85 %) et l'absence quasi-totale des Dinoflagellés.

À l'inverse, l'eau produite a démontré une faible densité cellulaire de 50 Cell/l, ceci traduit clairement l'efficacité du processus de traitement de l'eau utilisé, d'où la réduction de la masse phytoplanctonique.

En ce qui concerne les rejets de saumure, ils présentent une densité cellulaire modérée qui avoisine les 400 Cell/L (Figure 46c). Les rejets de saumure sont marqués par la dominance de Dinoflagellés qui représentent 50 % de la flore totale, et la présence de certaines espèces telles que *Scrippsiella* sp. et *Alexandrium* sp. (Figure 51) capables de survivre à des conditions

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

environnementales défavorables, y compris les changements extrêmes de salinité (LAABIR *et al.*, 2011; WANG *et al.*, 2020).

Contrairement à l'eau brute, les Diatomées étaient moins présentes dans la saumure (40 % de flore totale), ce qui est tout à fait cohérent avec la nature relativement sténohaline de ces espèces (TAN *et al.*, 2013). Le groupe divers est également présent à raison de 10 % (Figure 46c).

À l'arrêt de la station, les échantillons d'eau prélevés au niveau du décanteur, du rejet et du milieu récepteur ont révélé la présence de 35 genres appartenant essentiellement aux Diatomées et aux Dinoflagellés (Figure 46b).

Les Diatomées sont majoritairement présentes et constituent 66% de la flore, avec 24 genres ; dont les espèces les plus fréquentes sont *Cylindrotheca* et *Navicula* (Figure 51).

Les Dinoflagellés sont quant à eux composés de 11 genres et représentent 18% de la communauté ; parmi lesquels *Ostreopsis* et *Prorocentrum* (Figure 51) sont souvent rencontrés. Et 13,46% de la flore totale appartient au groupe des divers (Figure 46b).

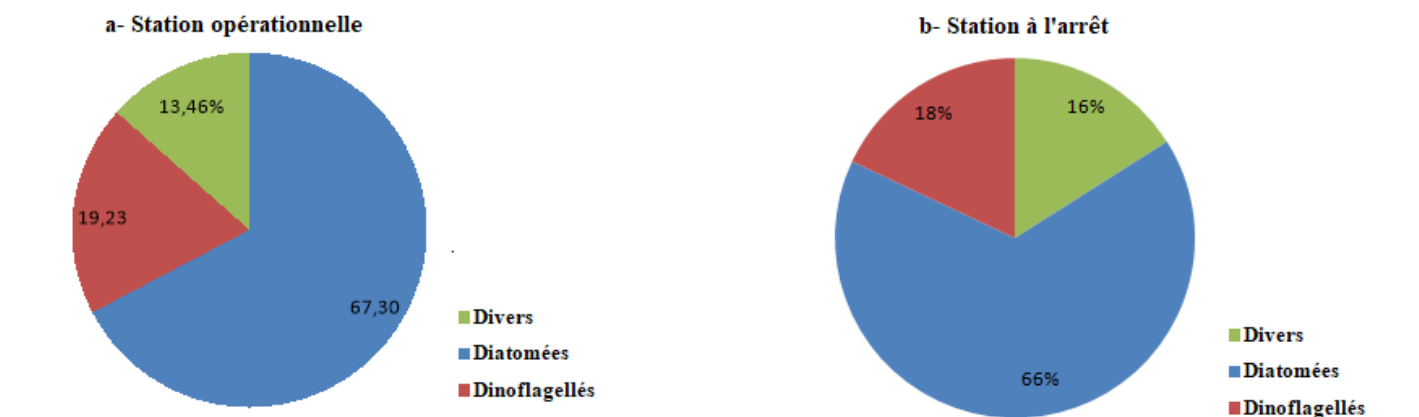
Le milieu marin récepteur s'est distingué par une riche communauté phytoplanctonique, il comporte la densité cellulaire totale de phytoplancton la plus élevée, atteignant environ 4200 Cell/L, contre 1100 Cell/L pour le décanteur, et 600 Cell/L pour les rejets (Figure 46d).

Pour l'eau du décanteur, 70 % de la communauté phytoplanctonique est représentée par les Diatomées, contre 30% de Dinoflagellés et le groupe divers. En revanche, l'analyse des échantillons de rejet a démontré que la biomasse phytoplanctonique était constituée de 53% de Diatomées, de 27 % de Dinoflagellés, et de 20 % du groupe divers (Figure 46d).

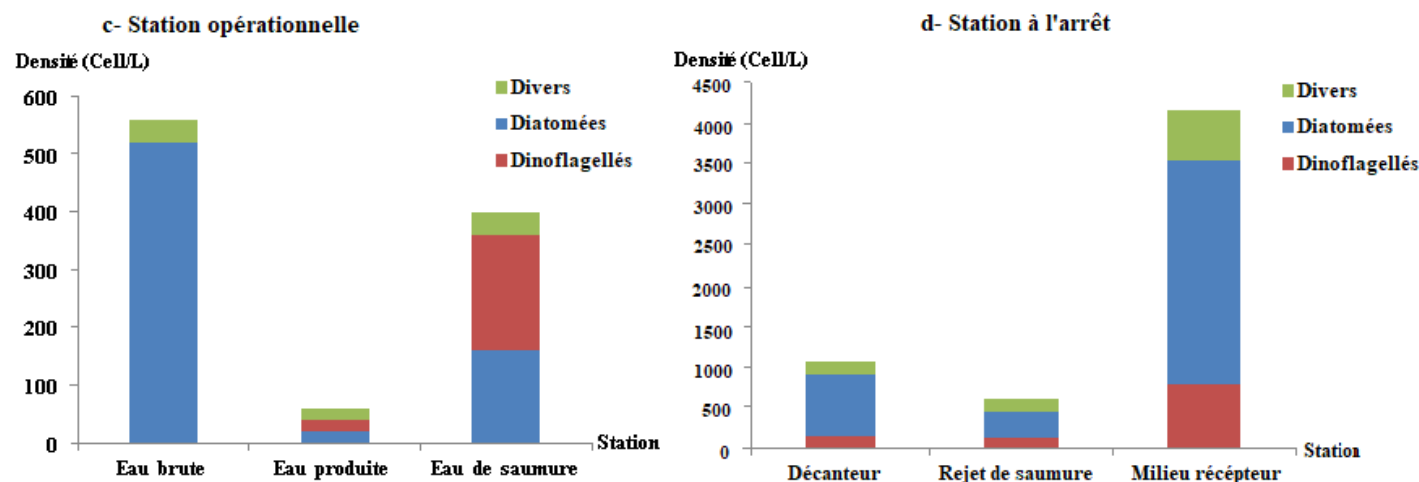
Bien que les Diatomées soient dominantes, les Dinoflagellés et les groupes divers contribuent également de manière significative à la biomasse totale inventoriée dans le milieu récepteur. Cette augmentation massive suggère que le milieu récepteur est un environnement très propice à la croissance du phytoplancton, potentiellement en raison d'un apport important de nutriments qui pourrait provenir de rejet et des conditions physiques favorables (CLOERN, 2001).

## CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### Abondance des groupes phytoplanctoniques



### Variation de la densité cellulaire



**Figure 46 :** Résultats de l'étude qualitative et quantitative des groupes phytoplanctoniques inventoriés au niveau de la station de dessalement de Palm-Beach

## 2. Propriétés physico-chimiques des eaux de surface

Le Tableau 12 résume les résultats des analyses effectuées au niveau du milieu marin récepteur ; dans la zone de rejets de saumure de la station de dessalement de Palm-Beach.

**Tableau 12:** Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques mesurés dans le milieu marin récepteur au voisinage de la station de dessalement de Palm-Beach

|                                           | Station opérationnelle |       |                   |        | Station à l'arrêt |         |                       |        |
|-------------------------------------------|------------------------|-------|-------------------|--------|-------------------|---------|-----------------------|--------|
|                                           | Min                    | Max   | Moy $\pm \sigma$  | CV (%) | Min               | Max     | Moy $\pm \sigma$      | CV (%) |
| Température (°C)                          | 17,50                  | 19,10 | 17,92 $\pm$ 0,59  | 3,30   | 22,40             | 23,90   | 23,16 $\pm$ 0,53      | 2,30   |
| Salinité (psu)                            | 36,90                  | 55,90 | 41,20 $\pm$ 7,37  | 17,90  | 36,00             | 37,00   | 36,59 $\pm$ 0,29      | 0,80   |
| Conductivité (mS/cm)                      | 49,30                  | 71,00 | 54,20 $\pm$ 8,40  | 15,50  | 51,60             | 52,50   | 52,21 $\pm$ 41,97     | 80,40  |
| pH                                        | 7,89                   | 8,03  | 7,99 $\pm$ 0,06   | 0,70   | NA                | NA      | NA                    | NA     |
| Oxygène dissous (mg/L)                    | 11,57                  | 14,33 | 13,03 $\pm$ 0,99  | 7,60   | NA                | NA      | NA                    | NA     |
| Turbidité (NTU)                           | 0,80                   | 5,70  | 3,10 $\pm$ 1,66   | 53,80  | 5,50              | 75      | 26,80 $\pm$ 21,54     | 80,40  |
| Matière en suspension (mg/L)              | 3,20                   | 14,90 | 9,58 $\pm$ 4,06   | 42,40  | 81,60             | 3697,40 | 1096,59 $\pm$ 1322,48 | 120,60 |
| MOP (%)                                   | 56,25                  | 87,14 | 71,07 $\pm$ 11,08 | 15,60  | 42,79             | 99,51   | 74,18 $\pm$ 17,50     | 23,60  |
| [NO <sub>2</sub> ] (μmol/L)               | NA                     | NA    | NA                | NA     | 0,0070            | 0,0228  | 0,0154 $\pm$ 0,005    | 34,62  |
| [NO <sub>3</sub> ] (μmol/L)               | NA                     | NA    | NA                | NA     | 0,0133            | 0,0726  | 0,0360 $\pm$ 0,019    | 53,25  |
| [PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ] (μmol/L) | NA                     | NA    | NA                | NA     | 0,0173            | 0,6654  | 0,1181 $\pm$ 0,153    | 130,36 |
| [SiO <sub>2</sub> ] (μmol/L)              | NA                     | NA    | NA                | NA     | 0,1529            | 1,7260  | 0,5333 $\pm$ 0,367    | 68,87  |

**Min:** minimum, **Max:** maximum, **Moy:** moyenne,  **$\sigma$**  : Écart-type, **CV:** Coefficient de variation, **NA:** Non-analysé.



### 2.1. Variation de la température

La température de l'eau de mer mesurée au niveau de la zone de rejet durant le fonctionnement de la station de dessalement de Palm Beach était comprise entre 17,50 °C et 19,10 °C ; avec une moyenne de 17,92 °C (Figure 47). Les valeurs enregistrées à l'arrêt de l'installation étaient plus élevées, variant de 22,40 °C à 23,90 °C (Figure 48). Cette légère différence de température observée entre les périodes de fonctionnement et d'arrêt de la station est attribuable aux conditions météorologiques et hydrodynamiques (AMINOT et CHAUSSEPIED, 1983; BACHARI HOUMA, 2009).

### 2.2. Variation de la salinité

Pendant le fonctionnement de l'installation de dessalement de Palm-Beach la salinité moyenne du milieu marin était de l'ordre de 41,2 psu, avec une valeur minimale de 36,90 et une valeur maximale de 55,90. Alors que la salinité mesurée durant l'arrêt de la station de dessalement n'a pas dépassé les 37 psu (Figure 48).

Le pic (55,90 psu) a été enregistré au niveau de la station S1 (Figure 48). Cette valeur est largement supérieure à la salinité de la mer Méditerranée et dans la Baie de BouIsmaïl (ADEM et al., 2023; AMINOT et KÉROUEL, 2007; BELKACEM, 2017). Cette augmentation de salinité pourrait s'expliquer par la dispersion des effluents de l'installation concentrés en sels et déversés directement en milieu marin.

### 2.3. Variation de la conductivité

Durant son fonctionnement, la station de dessalement de Palm-Beach a induit une augmentation significative de la conductivité de l'eau de mer. Les mesures ont fluctué entre 49,30 mS/cm et un pic de 71,00 mS/cm (Figure 47), dépassant clairement la conductivité habituelle de l'eau de mer (Rodier et al, 2016). À l'inverse, l'arrêt de la station a ramené la conductivité dans une plage plus étroite ; un minimum de 51,60 et un maximum de 52,50 mS/cm ; avec une valeur moyenne de 52,21 mS/cm (Figure 48).

La conductivité élevée, particulièrement visible à la station S1 (Figure 47), est directement attribuable à la présence de rejets de saumure.

### 2.4. Variation du pH

Les mesures du potentiel d'Hydrogène effectuées uniquement durant le fonctionnement de l'unité de dessalement, ont révélé un milieu légèrement alcalin, avec des valeurs comprises entre 7,89 et 8,03 (Figure 47) ; proches du pH naturel de l'eau de mer (RODIER *et al*, 2016).

### 2.5. Variation de l'oxygène dissous

Lors du fonctionnement de la station, les teneurs en oxygène dissous étaient très élevées, avec une moyenne de 13,03 mg/l, une valeur minimale de 11,57 mg/l et une valeur maximale de 14,33 mg/l (Figure 47). Cette saturation du milieu en oxygène est liée au brassage des masses d'eau induit par l'hydrodynamisme (BACHARI HOUMA, 2009).

### 2.6. Variation de la turbidité

Les mesures de turbidité ont révélé une différence significative entre la période de fonctionnement de la station de dessalement de Palm-Beach et l'arrêt de l'unité.

Pendant le fonctionnement de l'installation, les valeurs de turbidité ont varié de 0,80 NTU à 5,70 NTU, avec une moyenne de 3,10 NTU (Figure 47). Ces résultats sont, dans l'ensemble, conformes à la norme de qualité de l'eau douce établie par (RODIER *et al*, 2016) qui est inférieure ou égale à 5 NTU.

Cependant, un dépassement notable de cette norme a été enregistré à la station S5 (Figure 47). Cette anomalie pourrait s'expliquer par des phénomènes locaux (phénomènes hydrodynamiques et travaux de dragage) qui provoquent la remise en suspension des sédiments.

En revanche, lorsque la station était à l'arrêt, les valeurs de turbidité ont considérablement augmenté, s'étendant de 5,50 NTU à un maximum de 75,00 NTU. La moyenne de 26,80 NTU est nettement supérieure à celle observée en période de service, reflétant une forte pollution (Figure 48).

Le coefficient de variation élevé relativement 80,40 % atteste d'une très forte hétérogénéité des mesures durant cette phase. Cette augmentation spectaculaire est directement attribuable à des facteurs hydrodynamiques ; combinés aux travaux d'extension de rénovation de l'installation de dessalement de Palm Beach.

### 2.7. Variation de la matière en suspension

Les mesures effectuées ont également révélé une disparité majeure dans les concentrations de Matières En Suspension (MES), selon l'état d'activité de la station de dessalement de Palm-Beach.

Lorsque la station était opérationnelle, les concentrations de MES étaient faibles, s'échelonnant de 3,20 mg/L à 9,58 mg/L. La moyenne des concentrations s'est établie à 9,58 mg/L, avec une variabilité modérée (coefficient de variation de 42,40 %).

À l'arrêt de l'installation, les teneurs en MES ont explosé. Les valeurs mesurées ont varié de 81,60 mg/L à un maximum de 3697,40 mg/L, soit une moyenne de 1096,59 mg/L.

Le coefficient de variation très élevé (120,30 %) témoigne de l'énorme hétérogénéité des concentrations pendant cette phase, qui pourraient s'expliquer par la combinaison de deux facteurs préalablement cités (hydrodynamisme et travaux).

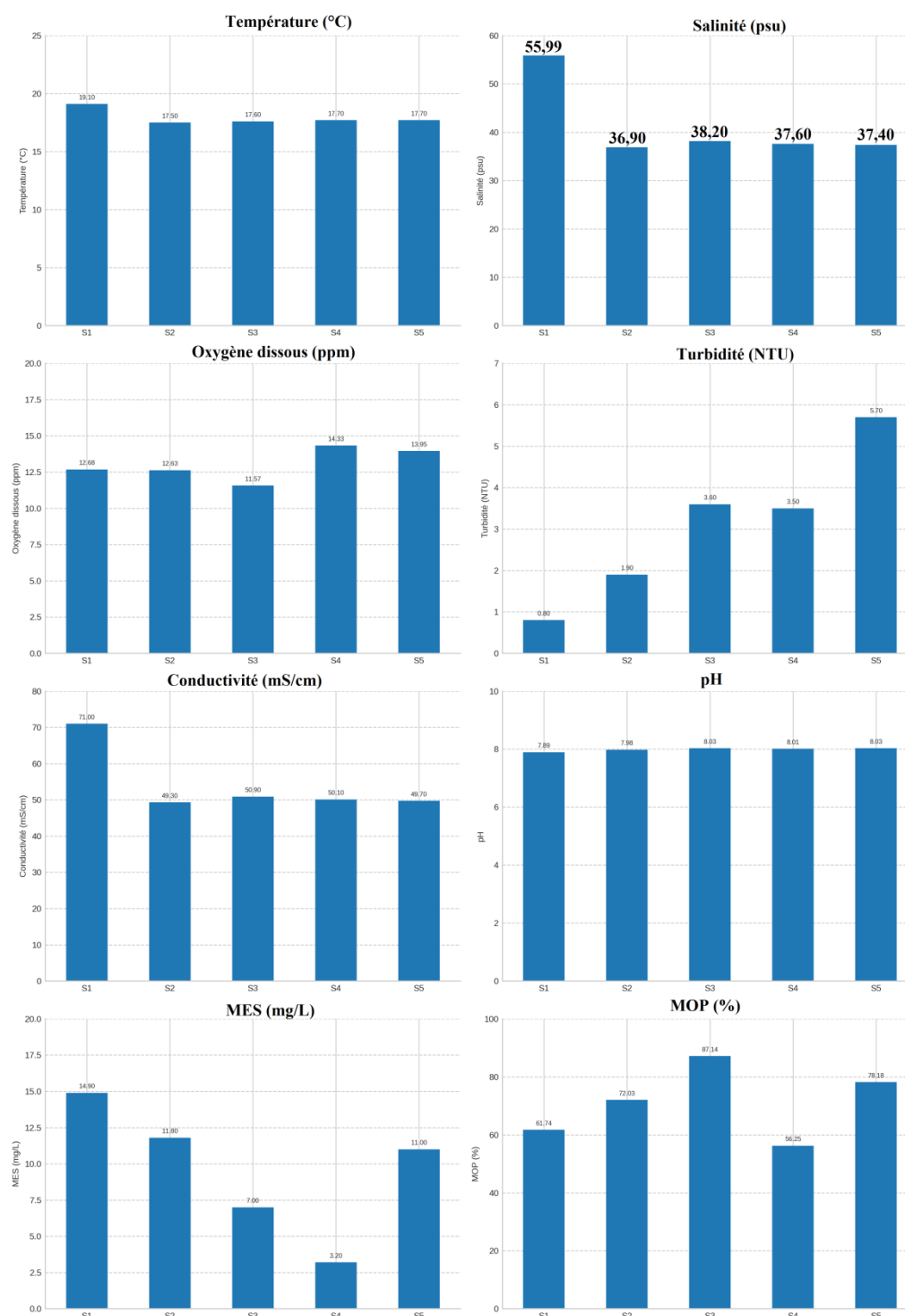
Il faut toutefois préciser, qu'un arrêt de la station n'implique pas forcément l'absence de rejets, cela signifie tout simplement qu'il n'y a pas de production d'eau potable pour le réseau. Il est donc courant et essentiel pour la survie technique de l'installation de faire circuler un flux d'eau pour rincer les membranes en continu.

### 2.8. Variation de la matière organique particulière

Les valeurs en matières organiques particulières s'échelonnaient de 56,25 % à 87,14 %, avec une moyenne de 71,07 % au cours du fonctionnement de la station de dessalement de Palm-Beach (Figure 47).

## CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### Résultats d'analyse multi-paramètres (Stations S1 à S5)

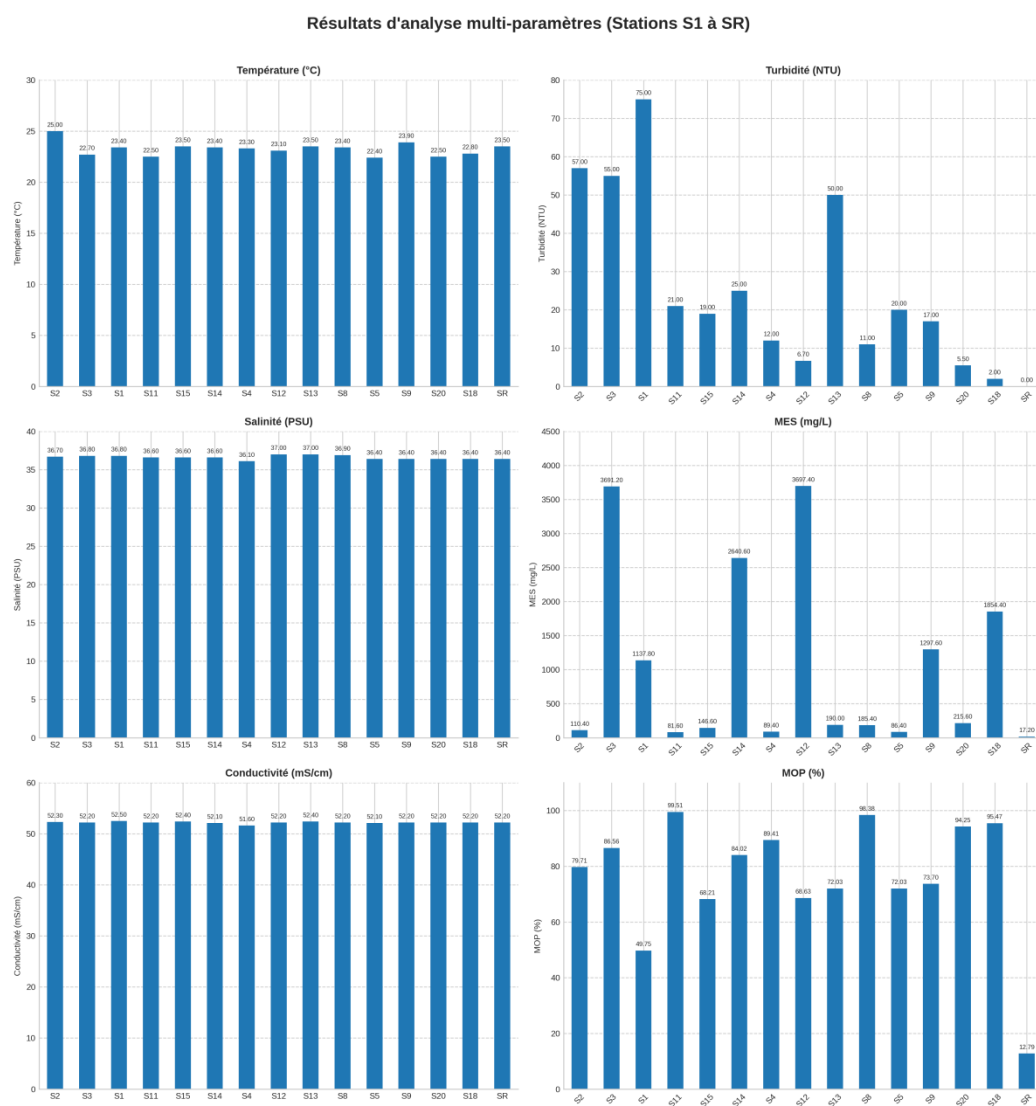


**Figure 47 :** Variation de la température, de la salinité, de la conductivité, du pH, de l'oxygène dissous, de la turbidité, des MES et des MOP du milieu marin récepteur pendant le fonctionnement de la station de dessalement de Palm-Beach

## CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

À l'arrêt de celle-ci les pourcentages étaient compris entre 42,79 % et 99,51 %.

Ces résultats mettent en évidence que la composition des matières en suspension est dominée par les matières organiques, potentiellement des apports externes (rejets) et internes (décomposition de la flore marine).



**Figure 48 :** Variation de la température, de la salinité, de la conductivité, de la turbidité, des MES et des MOP du milieu marin récepteur durant l'arrêt de la station de dessalement de Palm-Beach

### 2.9. Variation des sels nutritifs

Les résultats de l'analyse des sels nutritifs dans les eaux superficielles de la plage de Palm Beach pendant l'arrêt de l'installation de dessalement sont présentés dans le Tableau 13 et la Figure 49.

Les concentrations en nitrites étaient faibles, allant de 0,0070 à 0,0228  $\mu\text{mol/L}$ , pour une moyenne de 0,0154  $\mu\text{mol/L}$  (Tableau 13). Ces faibles teneurs sont peut être liées à l'oxydation

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

des nitrites via la nitrification en présence de bactéries (RODIER et al, 2016).

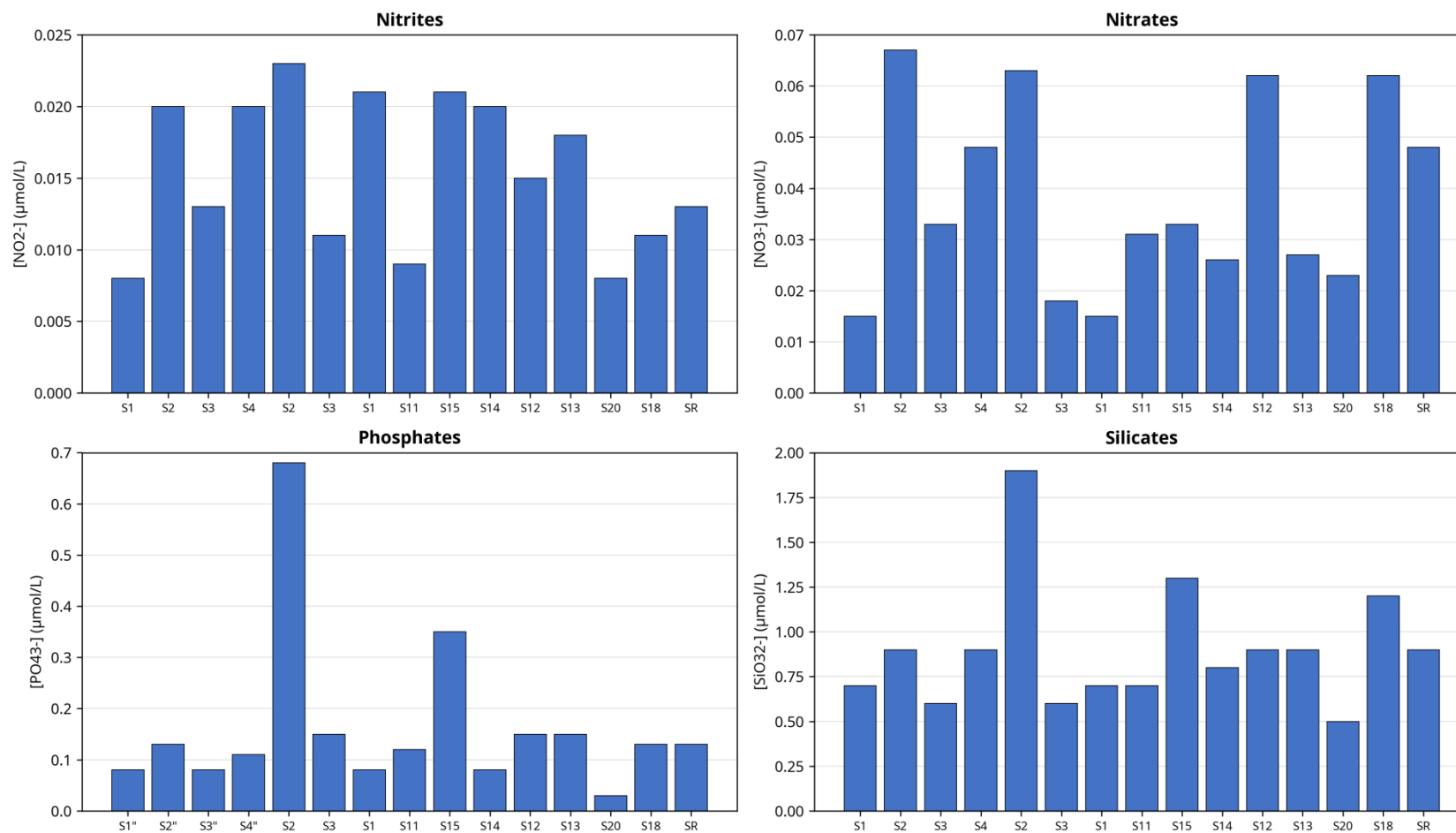
**Tableau 13:** Statistiques descriptives des résultats d'analyse sels nutritifs effectués dans les eaux superficielles de la plage de Palm Beach pendant l'arrêt de la station de dessalement de Palm-Beach.

|                                     | [NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> ] (µmol/L) | [NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ] (µmol/L) | [PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ] (µmol/L) | [SiO <sub>2</sub> ] (µmol/L) |
|-------------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------|
| <b>Minimum</b>                      | 0,0070                                   | 0,0133                                   | 0,0173                                    | 0,1529                       |
| <b>Maximum</b>                      | 0,0228                                   | 0,0726                                   | 0,6654                                    | 1,7260                       |
| <b>Moyenne</b>                      | 0,0154                                   | 0,0360                                   | 0,1181                                    | 0,5333                       |
| <b>coefficient de variation (%)</b> | 34,62                                    | 53,25                                    | 130,36                                    | 68,87                        |

Pour ce qui est des concentrations en nitrates, celles-ci ont variés entre un minimum de 0,0133 µmol/L et un maximum de 0,0726 µmol/L (Tableau 13). Au regard des teneurs en matière organiques, les faibles valeurs des nitrates nous amène à penser que le processus de minéralisation est déficitaire.

Les concentrations en phosphates s'étendaient de 0,0173 µmol/L à 0,6654 µmol/L (Tableau 13). Leur faible niveau est un indicateur de leur assimilation au cours de processus de photosynthèse. Concernant la concentration en silicates, les analyses ont montré que leurs teneurs se situaient entre 0,1529 et 1,7260 µmol/L (Tableau 13), avec des valeurs relativement élevées au niveau de la station S2'' (Figure 49) qui pourraient être liée à l'apport en eau douce provoqué par les travaux de forage.

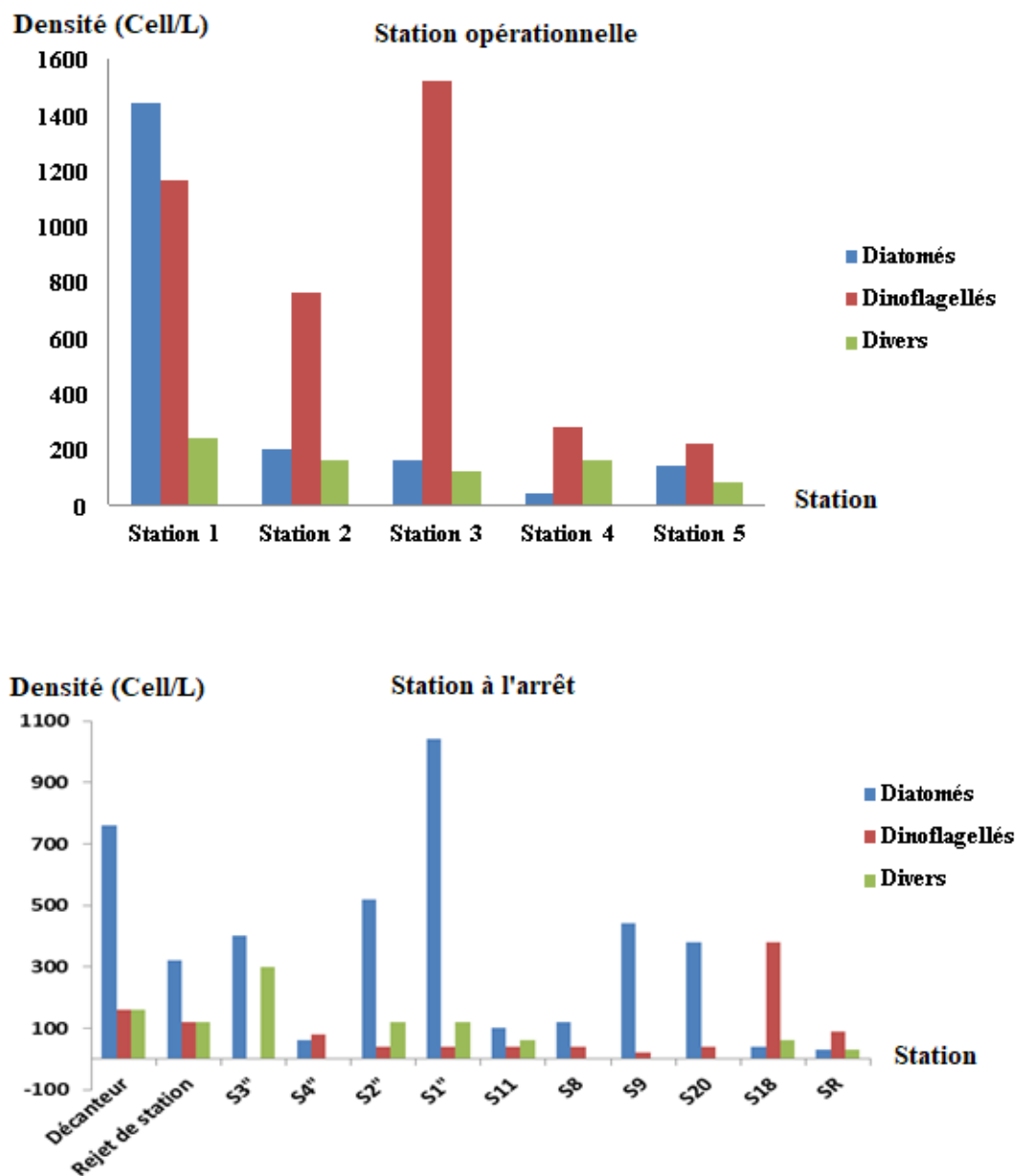
### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS



**Figure 49 :** Variation des sels nutritifs des eaux de mer superficielles durant l'arrêt de la station de dessalement de Palm-Beach

### 2.10. Étude des communautés phytoplanctoniques

L'étude des peuplements phytoplanctoniques au niveau de la zone soumise aux rejets de la station de dessalement d'eau de mer de Palm-Beach a révélé la prépondérance des diatomées et des dinoflagellés ; avec pas moins de 34 genres répertoriés durant le fonctionnement de l'installation. Ces deux groupes floristiques ont été identifiés dans toutes les stations échantillonnées, mais leur abondance relative diffère d'un point à un autre ; enregistrant des valeurs de densité cellulaire allant de 440 Cell/L à 2840 Cell/L (Figure 50).



**Figure 50 :** Distribution des densités cellulaires totales (cell/l) des peuplements phytoplanctoniques des échantillons prélevés dans la zone de rejet de la station de dessalement de Palm-Beach



### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Avec 23 genres inventoriés, les Dinoflagellés dominent la communauté et affichent la plus grande diversité. Parmi eux *Alexandrium* sp. et *Scrippsiella* sp. sont régulièrement observées (Figure 51).

Les Diatomées sont moins diversifiées ; elles sont représentées par 11 genres avec des espèces courantes telles que *Licmophora* sp., *Navicula* sp., et *Amphora* sp. (Figure 51).

Les Dinoflagellés sont plus abondants au niveau des stations 2, 3, 4, et 5, alors que les Diatomées sont majoritairement présentes à la station 1 (Figure 51).

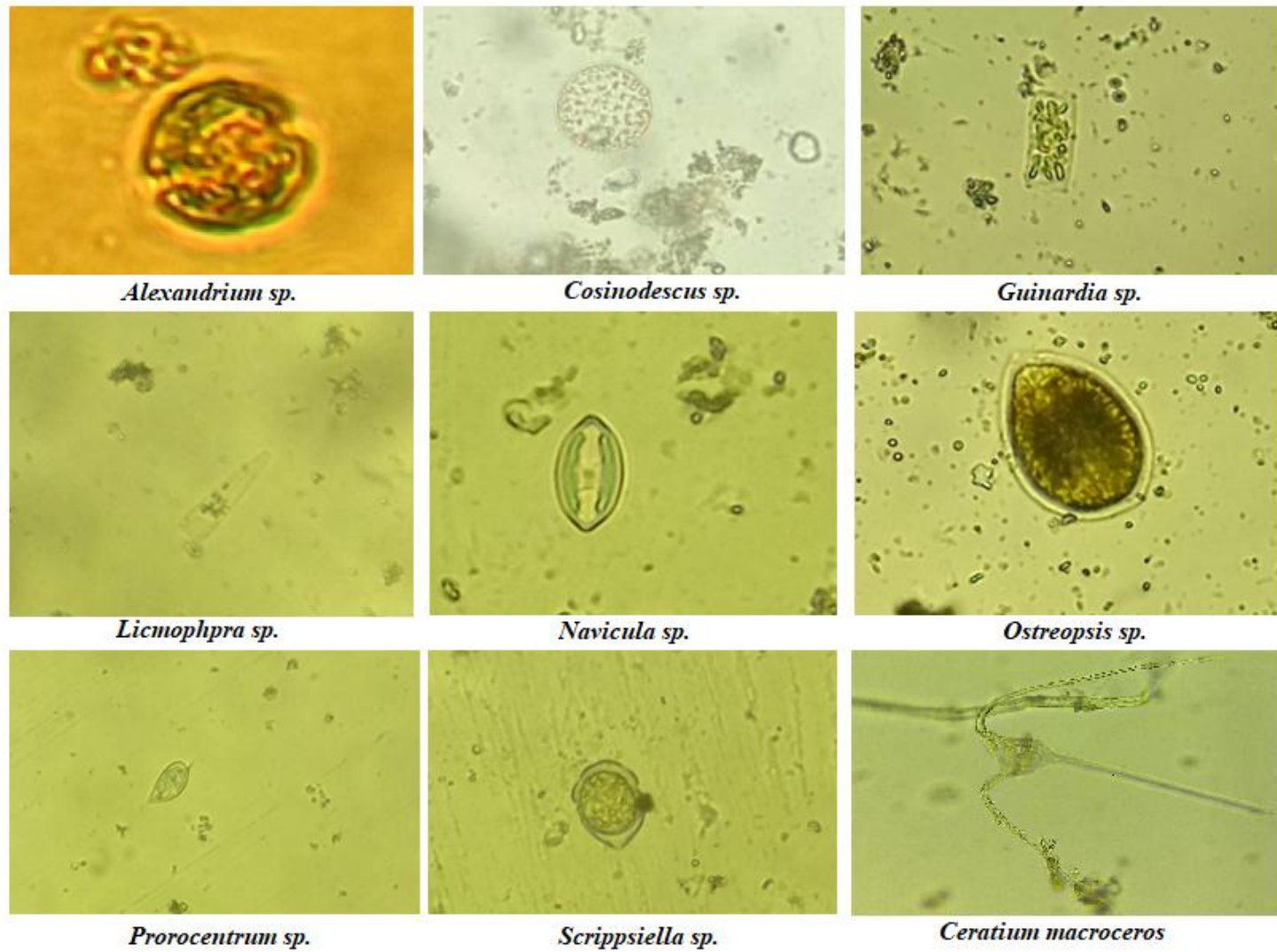
Cela s'explique par la grande tolérance de certaines espèces aux variations des variables environnementales notamment la salinité (Al, 2007).

À l'arrêt de l'installation, la densité cellulaire des peuplements phytoplanctoniques était comprise entre 140 Cell/L ; à la station S'4 et 1040 Cell/L à la station S1" (Figure 51).

Les Diatomées constituent le groupe dominant par rapport aux Dinoflagellés. Cette prépondérance particulièrement marquée à la Station S1" ; non loin du rejet, résulte vraisemblablement de leur accumulation.

Bien que minoritaires, la densité des Dinoflagellés est assez marquée à la Station S18, atteignant une densité de 380 cell/L.

La distribution spatiale de la flore est conditionnée par les facteurs hydrodynamiques et les propriétés physico-chimiques du milieu marin, occasionnant ainsi un gradient général de densité qui décroît progressivement à mesure que l'on s'éloigne du point de rejet.



**Figure 51 :** Planche de quelques espèces identifiées au niveau des échantillons prélevés dans la station de dessalement de Palm-Beach et le milieu marin récepteur

### II- Section 2. Caractérisation du milieu récepteur et des rejets de la station de Fouka 1

#### 1. Composition des rejets de saumure et de l'eau d'alimentation

Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau d'alimentation et des rejets de saumure de la station de dessalement de Fouka 1 sont présentées dans le Tableau 14.

Les données recueillies ont montré que la saumure produite était fortement minéralisée et que les ions dominants sont : les chlorures, le sodium, le sulfate et le magnésium. Leurs concentrations peuvent atteindre 39 055 mg/L, 20 936,20 mg/L, 5 820 mg/L, et 2 860,70 mg/L respectivement.

La conductivité électrique des rejets de saumure est élevée, elle varie entre 53,20 et 94,90 mS/cm. Elle est d'ailleurs proportionnelle à la quantité de solides dissous (RODIER et al., 2016), avec des valeurs comprises entre 55 440 mg/L et 70 540 mg/L ; qui dépassent largement celles de l'eau d'alimentation.

Les teneurs élevées en ions pourraient être attribuées aux produits chimiques utilisés au cours des différentes phases du processus de dessalement, tels que : l'acide sulfurique pour l'ajustement du pH, le chlore gazeux (ou l'hypochlorite de sodium) pour l'élimination des microorganismes, et la chaux afin de prévenir la corrosion des systèmes de distribution (Einav and Lokiec, 2003; Miri and Chouikhi, 2005).

La saumure présente des pH neutres à légèrement basiques (entre 6,9 et 8,29) et des températures allant de 17,1 °C à 21,9 °C, ces valeurs restent inférieures aux valeurs limites de rejets d'effluents liquides industriels (JORA, 2006).

Du point de vue des matières en suspension, leurs teneurs dans les rejets sont supérieures à celles de l'eau d'appoint (5,8 mg/L en moyenne), elles oscillent entre 4,6 mg/L et 21,4 mg/L mais répondent à la norme nationale en vigueur (JORA, 2006).

Comme attendu, la salinité des effluents évacués en mer par l'unité de dessalement de Fouka après dilution dépasse celle du milieu récepteur et peut atteindre jusqu'à 43,8 psu (Temmar, 2016). En effet, la salinité des effluents générés par les stations de dessalement d'osmose inverse est comprise entre 40 et 90 psu (Sola et al., 2020).

Il faut noter que plusieurs travaux ont révélé que des salinités comprises entre 40 et 45 psu semblent provoquer la mortalité des espèces exposées, comme les échinodermes et les

## CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

communautés benthiques ; habituées à des milieux de salinité stable (BRIKA et al., 2016; FERNÁNDEZ-TORQUEMADA et LUIS SÁNCHEZ-LIZASO, 2007).

Pourtant, la réglementation algérienne ; comme celle de la majorité des pays dans le monde, n'a pas de limites générales pour la salinité des rejets de saumure (VOUTCHKOV et al., 2019).

**Tableau 14:** Propriétés physico-chimiques de l'eau d'alimentation et des rejets de saumures de la station de dessalement de Fouka 1 (AMITOUCHE et al., 2017; REZIM et TACHETAOUI, 2020; TAIBI, 2016; TEMMAR, 2016).

| Paramètre                                     | Unité   | Eau d'appoint<br>(eau de mer) | Saumures<br>(effluents salins) | Norme (JORA,<br>2006) |
|-----------------------------------------------|---------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
|                                               |         | Moy                           | Min/Max                        |                       |
| Température (T)                               | °C      | 19,70                         | 17,10 – 21,90                  | < 30                  |
| Salinité (S)                                  | psu     | 38,80                         | 36,50 – 55,10                  | –                     |
| Conductivité électrique<br>(CE)               | (mS/cm) | 52,20                         | 53,20 – 94,90                  | –                     |
| pH                                            |         | 8,10                          | 6,90 – 8,29                    | 5,5 – 8,5             |
| Oxygène dissous (OD)                          | mg/L    | *                             | 9                              | –                     |
| Solides dissous totaux<br>(TDS)               | mg/L    | 38 593                        | 55 440 – 70 540                | –                     |
| Calcium (Ca <sup>2+</sup> )                   | mg/L    | 503,7                         | 310 – 915,30                   | –                     |
| Magnésium (Mg <sup>2+</sup> )                 | mg/L    | 1 574,20                      | 930 – 2 860,70                 | –                     |
| Sodium (Na <sup>+</sup> )                     | mg/L    | 11 543,50                     | 63 – 20 936,20                 | –                     |
| Potassium (K)                                 | mg/L    | 461,60                        | 836,70 – 890                   | –                     |
| Carbonates (CO <sub>3</sub> )                 | mg/L    | 4,80                          | 0 – 0,40                       | –                     |
| Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) | mg/L    | 150,50                        | 145 – 231,30                   | –                     |
| Nitrate (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )       | mg/L    | 0,10                          | 0,20 – 10                      | –                     |
| Sulfate (SO <sub>4</sub> )                    | mg/L    | 2 811,70                      | 5 155,30 – 5 820               | –                     |
| Silice (SiO <sub>2</sub> )                    | mg/L    | 1                             | 0 – 1,80                       | –                     |
| Fer (Fe)                                      | mg/L    | 1,30                          | 0,02 – 2,40                    | 3                     |
| Chlorures (Cl <sup>-</sup> )                  | mg/L    | 21 527                        | 20 750 – 39 055                | –                     |
| Matières en suspension<br>(MES)               | mg/L    | 5,80                          | 4,60 – 21,40                   | 35                    |
| Turbidité                                     | NTU     | -                             | 0,10 – 0,39                    | –                     |
| Alcalinité (CaCO <sub>3</sub> )               | mg/L    | 134                           | 145 – 1 000                    | –                     |

\* : Non mesurée.

– : Non fixée.

## 2. Caractéristiques du milieu récepteur

### 2.1. Vent et conditions hydrodynamiques

Les facteurs météorologiques tels que le vent et les conditions hydrodynamiques jouent un rôle

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

important dans la dispersion des rejets en milieu marin, d'où l'importance de les connaître.

Les côtes algériennes sont soumises aux vents d'ouest pendant la saison hivernale et d'est et de nord-est en été (AMOKRANE et SALMI, 2021; MORADI *et al.*, 2022).

Pour le site d'étude de la station de Fouka 1, les vitesses du vent proviennent de la station synoptique de Bouharoun (36° 37' 33.1360" N et 02° 39' 24.259" E), située à l'ouest de la station de dessalement de Fouka 1.

Les données ont été fournies par l'Office National de Météorologie (ONM) et couvrent la période de janvier 2005 à décembre 2018.

Les roses des vents (Figure 52) indiquent que la vitesse moyenne annuelle est de l'ordre de 2,2 m/s, et que les vents dominants sont de secteur ouest (7,7% dans le secteur 270) et de nord-nord-est (6,2% dans le secteur 30).

Les conditions hydrodynamiques au cours des trois premières campagnes de prélèvement, sont issues du système opérationnel d'analyse et de prévision océanique globale Mercator à 1/12 degré, qui fournit 10 jours de prévisions océaniques mondiales mises à jour quotidiennement et disponibles sur le site web de Copernicus (<https://data.marine.copernicus.eu/products>).

Les champs de courant de surface sont représentés sur la Figure 53.

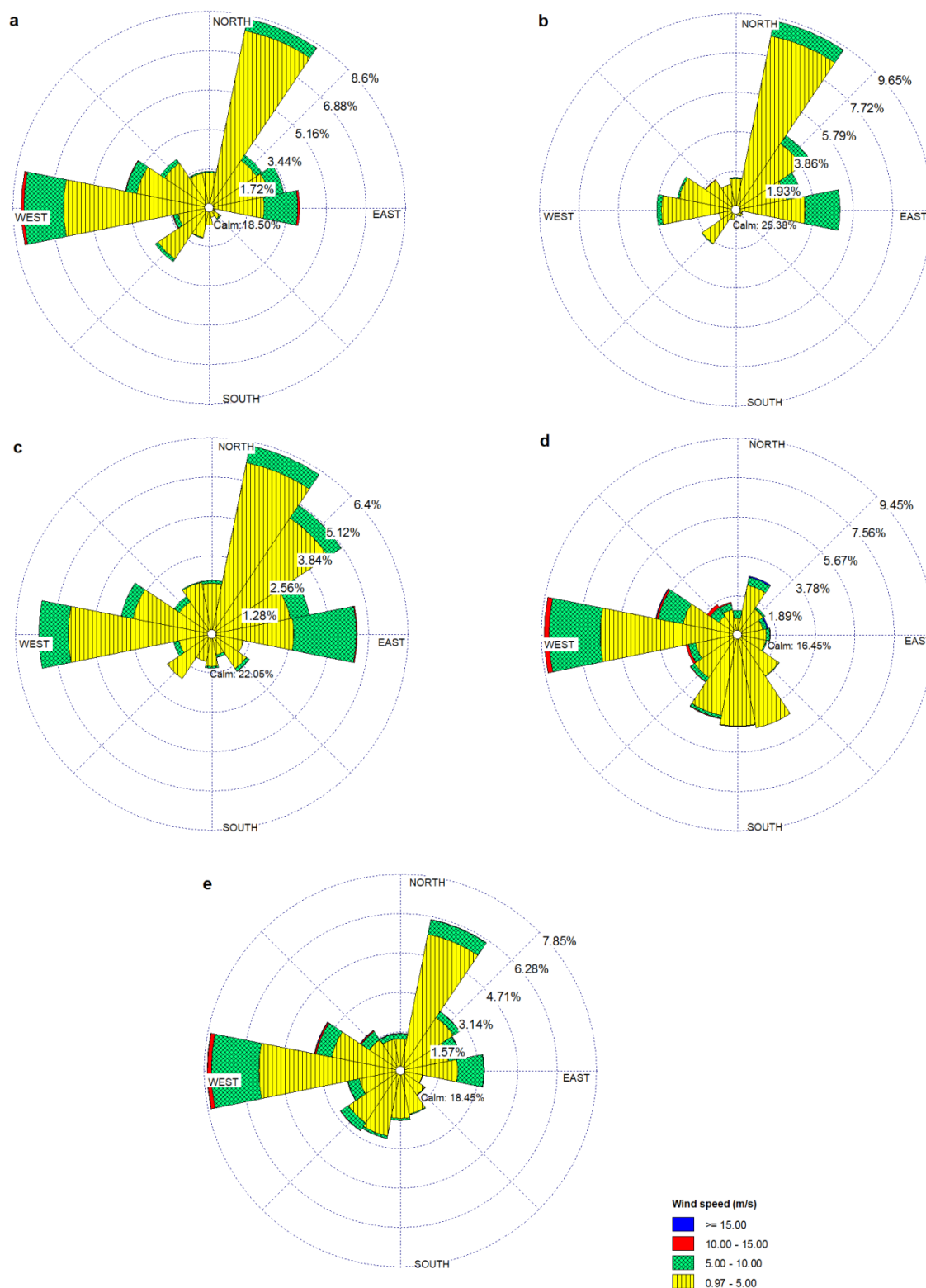
Durant l'hiver 2018, les données du courant de surface au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 (Figure 54), proviennent de mesures *in-situ* à l'aide d'un courantomètre Valeport (modèle 108).

La climatologie des vagues (Figure 55) a également été établie, elle est issue de la base de données développée par (Amarouche et al., 2019). Il s'agit d'une prévision rétrospective des vagues sur 10 ans (2008-2018) en mer Méditerranée occidentale générée via le modèle Simulating Wave Nearshore (SWAN) version 41.20 et forcé par les vents du Climate Forecast System Reanalysis (CSFR), préalablement calibré et validé (Adem et al., 2023).

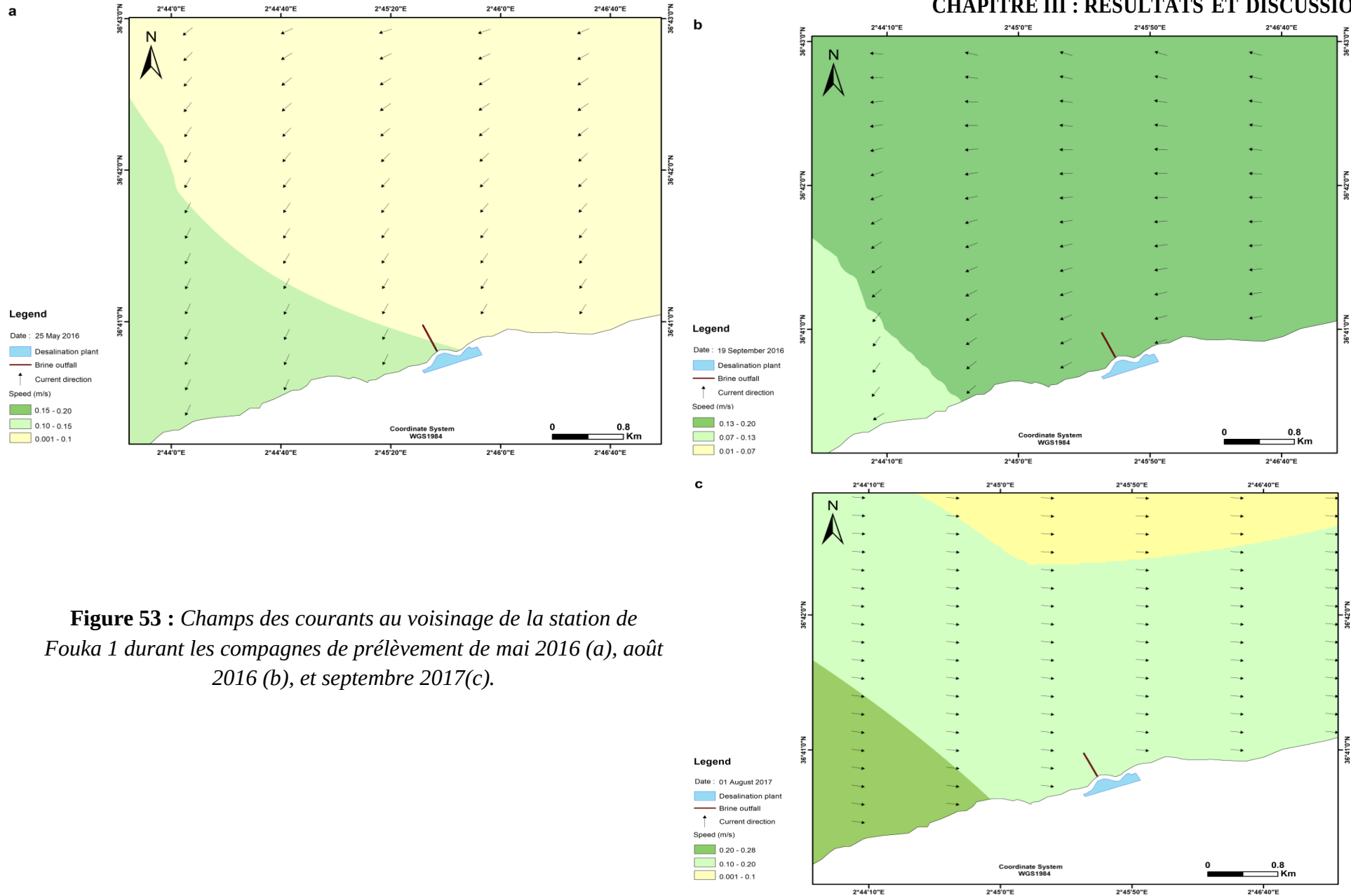
La direction dominante du courant de surface durant la campagne de mai 2016 était de nord-est avec une vitesse moyenne de 0,1 m/s (Figure 53-a).

Au cours de la deuxième campagne, le courant s'écoulait de l'est vers l'ouest et le sud-ouest avec une intensité de 0,01 à 0,20 m/s (Figure 53-b). Tandis qu'il s'écoulait vers l'est avec des vitesses atteignant plus de 0,20 m/s (Figure 53-c) pendant la troisième campagne.

## CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS



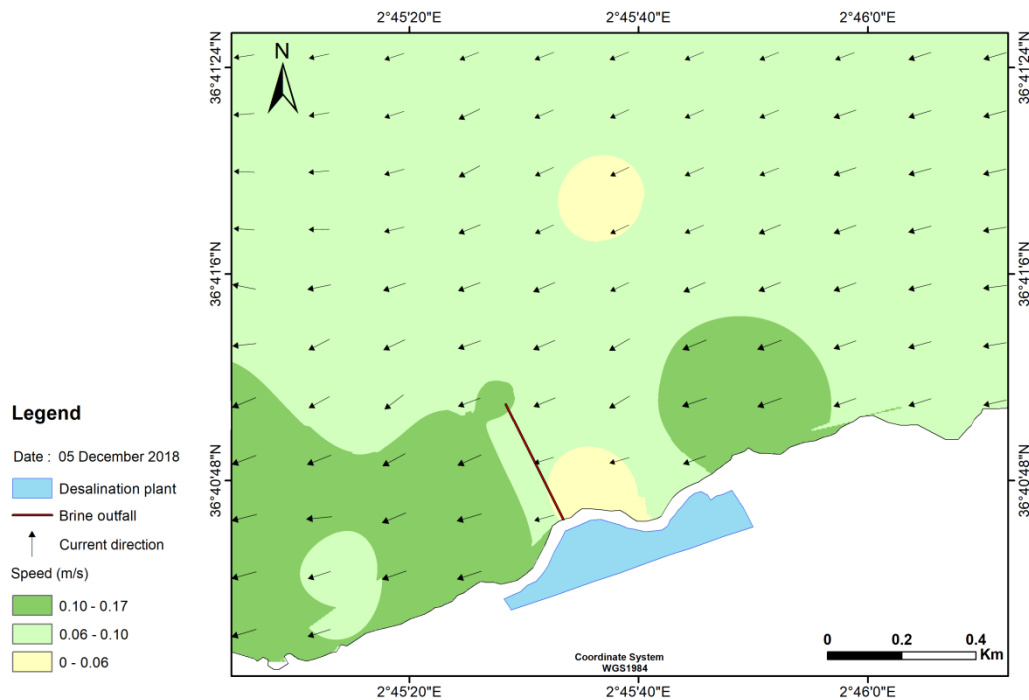
**Figure 52 :** Roses des vents annuelle et mensuelle de la station météorologique de Bou Haroun de 2005 - 2018. (a) mai, (b) août, (c) septembre, (d) décembre et (e) annuel (ONM, 2019)



**Figure 53 :** Champs des courants au voisinage de la station de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de mai 2016 (a), août 2016 (b), et septembre 2017(c).

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

En décembre 2018, la vitesse moyenne des courants de surface était de l'ordre de 0,11m/s avec comme directions dominante l'ouest et le sud-ouest (Figure 54).

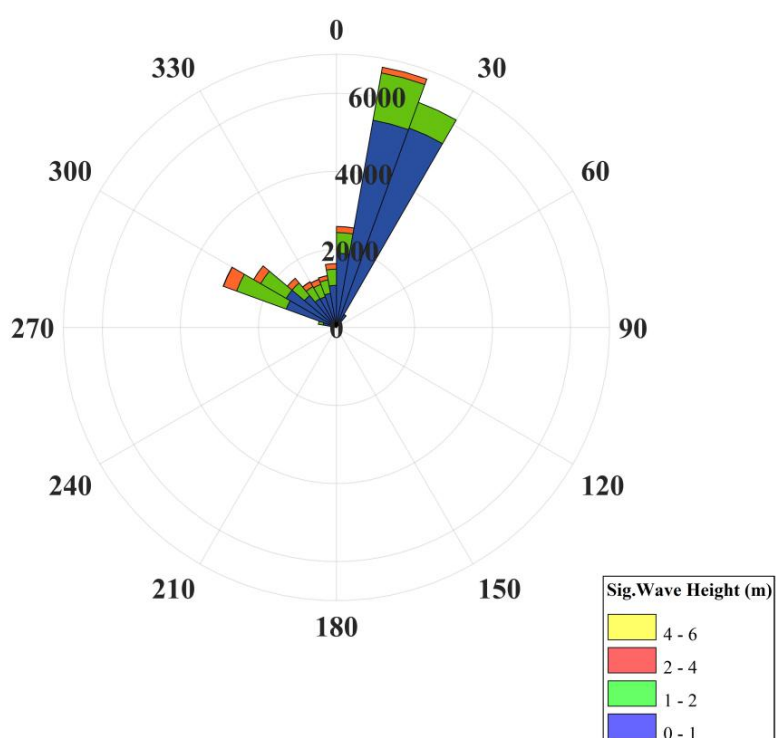


**Figure 54 :** Champs des courants au voisinage de la station de Fouka 1 mesurés durant la campagne de décembre 2018

Les données sur la hauteur significative et la direction des vagues ont été générées par le modèle SWAN à l'aide d'une grille de calcul régulière avec une résolution spatiale élevée de  $0,033^\circ \times 0,033^\circ$  ( $\sim 3$  km).

La Figure 55 qui représente les caractéristiques des vagues de la zone d'étude (station de Fouka 1) au point situé à  $36,700^\circ$  de latitude nord et  $2,7333^\circ$  de longitude, montre que les vagues du nord-nord-est sont dominantes (Figure 55).





**Figure 55 :** *Rose des vagues représentant la hauteur significative des vagues et la direction au voisinage de la station de Fouka 1 de 2008 jusqu'à 2018*

## 2.2. Propriétés physico-chimiques des eaux de mer de surface

Les résultats des analyses physico-chimiques des échantillons recueillis à partir des 30 stations de prélèvement durant les quatre campagnes sont consignés dans le Tableau 15.

La variation spatiotemporelle des paramètres mesurés au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 est représentée sous forme de cartes thématiques.

**Tableau 15:** Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques de l'eau de mer de surface au voisinage de la station de Fouka 1

| Paramètres                 |                              | Printemps 2016 | Automne 2016 | Été 2017     | Hiver 2018   | Période d'étude |
|----------------------------|------------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|
| T<br>(°C)                  | Minimum                      | 19,30          | 25           | 27,43        | 17,19        | 17,19           |
|                            | Maximum                      | 20,10          | 25,90        | 27,66        | 18,24        | 27,66           |
|                            | Moyenne ± Écart-type         | 19,71 ± 0,34   | 25,21 ± 0,26 | 27,57 ± 0,06 | 17,68 ± 0,23 | 21,92 ± 4,21    |
|                            | Coefficient de variation (%) | 1,72           | 1,03         | 0,23         | 1,33         | 19,20           |
|                            | Station de référence         | 18,80          | 19           | 27           | 17,72        |                 |
| S<br>(psu)                 | Minimum                      | 36,84          | 36,54        | 36,75        | 36,49        | 36,49           |
|                            | Maximum                      | 37,71          | 38,90        | 39,94        | 37,02        | 39,94           |
|                            | Moyenne ± Écart-type         | 37,36 ± 0,33   | 37,06 ± 0,76 | 37,57 ± 1,17 | 36,85 ± 0,12 | 37,09 ± 0,74    |
|                            | Coefficient de variation (%) | 0,88           | 2,05         | 3,13         | 0,34         | 1,99            |
|                            | Station de référence         | 37,50          | 36,42        | 36,60        | 36,71        |                 |
| CE<br>(mS/Cm)              | Minimum                      | 50,26          | 54,2         | 55,20        | 46,80        | 46,80           |
|                            | Maximum                      | 50,71          | 55,90        | 57,51        | 52,88        | 57,51           |
|                            | Moyenne ± Écart-type         | 50,40 ± 0,14   | 55,17 ± 0,54 | 55,78 ± 0,67 | 47,61 ± 1,29 | 51,60 ± 3,77    |
|                            | Coefficient de variation (%) | 0,29           | 0,99         | 1,21         | 2,71         | 7,30            |
|                            | Station de référence         | 51             | 50,31        | 54           | 47,60        |                 |
| pH                         | Minimum                      | 8,16           | 8,01         | 7,98         | 8,11         | 7,98            |
|                            | Maximum                      | 8,32           | 8,28         | 8,61         | 8,18         | 8,61            |
|                            | Moyenne ± Écart-type         | 8,23 ± 0,05    | 8,16 ± 0,07  | 8,28 ± 0,23  | 8,15 ± 0,01  | 8,19 ± 0,12     |
|                            | Coefficient de variation (%) | 0,63           | 0,84         | 2,88         | 0,21         | 1,46            |
|                            | Station de référence         | 8,20           | 8,11         | 8,20         | 8,14         |                 |
| O <sub>2</sub> d<br>(mg/L) | Minimum                      | 2,79           | 3,13         | 1,23         | –            | 1,23            |
|                            | Maximum                      | 3,37           | 4,29         | 29,20        | –            | 29,20           |
|                            | Moyenne ± Écart-type         | 3,07 ± 0,23    | 3,76 ± 0,4   | 6,67 ± 7,66  | –            | 4,64 ± 4,78     |
|                            | Coefficient de variation (%) | 7,77           | 10,85        | 114,9        | –            | 103,01          |
|                            | Station de référence         | 2,02           | 3            | 1            |              |                 |

**Tableau 16:** Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques de l'eau de mer de surface au voisinage de la station de Fouka 1

| Paramètres    |                              | Printemps 2016  | Automne 2016     | Été 2017         | Hiver 2018      | Période d'étude  |
|---------------|------------------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|
| TDS<br>(g/L)  | Minimum                      | —               | 36,10            | 37,11            | —               | 36,10            |
|               | Maximum                      | —               | 37,76            | 40,02            | —               | 40,02            |
|               | Moyenne $\pm$ Écart-type     | —               | 36,73 $\pm$ 0,6  | 38,38 $\pm$ 0,95 | —               | 37,55 $\pm$ 1,15 |
|               | Coefficient de variation (%) | —               | 1,63             | 2,49             | —               | 103,03           |
|               | Station de référence         | —               | 36,35            | 37,80            | —               |                  |
| Cl-<br>(g/L)  | Minimum                      | —               | 20,92            | 21,20            | —               | 20,92            |
|               | Maximum                      | —               | 27,70            | 31,51            | —               | 31,51            |
|               | Moyenne $\pm$ Écart-type     | —               | 22,89 $\pm$ 2,08 | 24,23 $\pm$ 3,32 | —               | 23,56 $\pm$ 2,80 |
|               | Coefficient de variation (%) | —               | 8,71             | 13,73            | —               | 11,88            |
|               | Station de référence         | —               | 21,20            | 22               | —               |                  |
| MES<br>(mg/L) | Minimum                      | 0,6             | 0,99             | 4,31             | 0,1             | 0,1              |
|               | Maximum                      | 12,60           | 6,30             | 16,10            | 6,15            | 16,10            |
|               | Moyenne $\pm$ Écart-type     | 3,62 $\pm$ 4,17 | 2,34 $\pm$ 1,56  | 11 $\pm$ 3,94    | 1,03 $\pm$ 1,50 | 3,98 $\pm$ 4,74  |
|               | Coefficient de variation (%) | 115,06          | 66,57            | 35,83            | 145,63          | 119,09           |
|               | Station de référence         | 1,20            | 0,91             | 1,60             | 0,07            |                  |

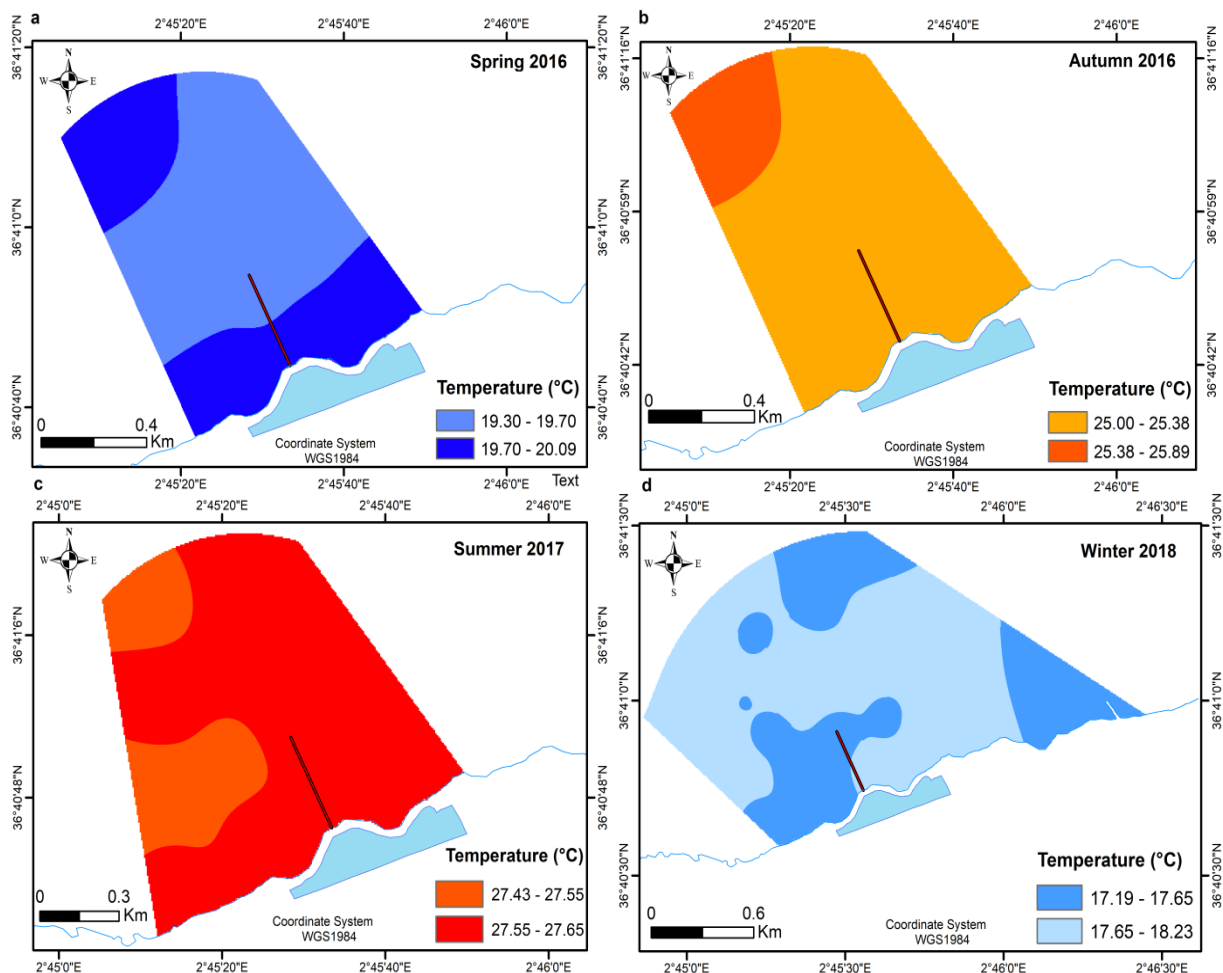
### 2.2.1. Variation de la température

La température moyenne des eaux de surface au voisinage de la station de Fouka 1 enregistrée au cours de la période d'étude est de  $21,92 \pm 4,22$  °C.

Les valeurs sont comprises entre 17,19°C et 27,66 °C, avec un minimum enregistré en hiver ; décembre 2018 et un maximum en été ; août 2017.

Le coefficient de variation estimé à 19,20 traduit l'asymétrie des températures entre les différentes périodes de mesure (Tableau 15). Ces fluctuations seraient probablement liées aux facteurs météorologiques où le caractère saisonnier est bien marqué (AMINOT et CHAUSSEPIED, 1983; BACHARI HOUMA, 2009).

Les cartes thématiques de la distribution spatiale de la température de surface au niveau du site d'étude de Fouka 1 (Figure 56) sont assez homogènes.

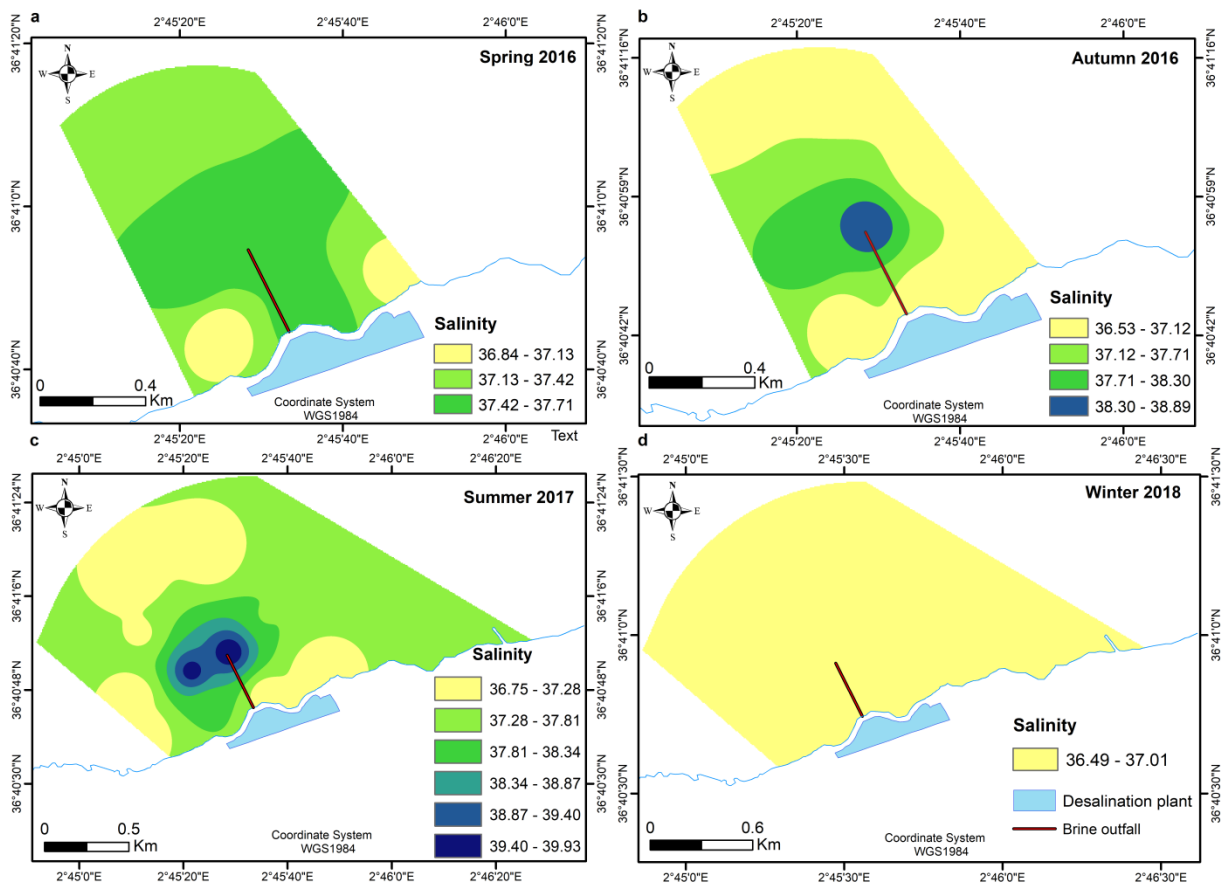


**Figure 56:** Distribution spatiale de la température de surface des eaux de côtières au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de mai 2016 (a), septembre 2016 (b), août 2017(c) et décembre 2018 (d).

### 2.2.2. Variation de la salinité

La salinité moyenne des eaux marines était de  $37,09 \pm 0,74$ , la valeur la plus basse (36,49 psu) a été enregistrée en hiver (Figure 57.b), tandis que des valeurs élevées de 39,69 psu et de 39,94 psu ont été observées en automne et en été au niveau des stations 4 et 5 (Figure 57.b).

Au regard du coefficient de variation (1,99) la salinité a varié peu, mais le pic enregistré dépasse la moyenne annuelle (38,8 psu) mesurée dans la zone ainsi que la salinité de la Méditerranée (BELKACEM, 2017).



**Figure 57 :** Distribution spatiale de la salinité de surface des eaux de côtières au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de mai 2016 (a), septembre 2016 (b), août 2017(c) et décembre 2018 (d).

Pour ce site d'étude les valeurs les plus élevées ont été observées immédiatement dans la zone proche du point de rejet de saumure (Figure 57. b, c).

Ces enregistrements étaient supérieurs à la salinité de l'eau de mer de surface mesurée dans la baie de Bou Ismail, qui variait de 37 à 38 psu (Bakalem et al. 2020) et atteignait jusqu'à 3 psu par rapport aux stations de référence, ce qui est probablement lié à la proximité des rejets de saumure.

En milieu marin, la salinité dépend entre autres des rejets terrestres (DÍAZ-HERRERA *et al.*, 2006) et pourrait refléter les niveaux de contamination du milieu aquatique (AFSHARIAN *et al.*, 2022).

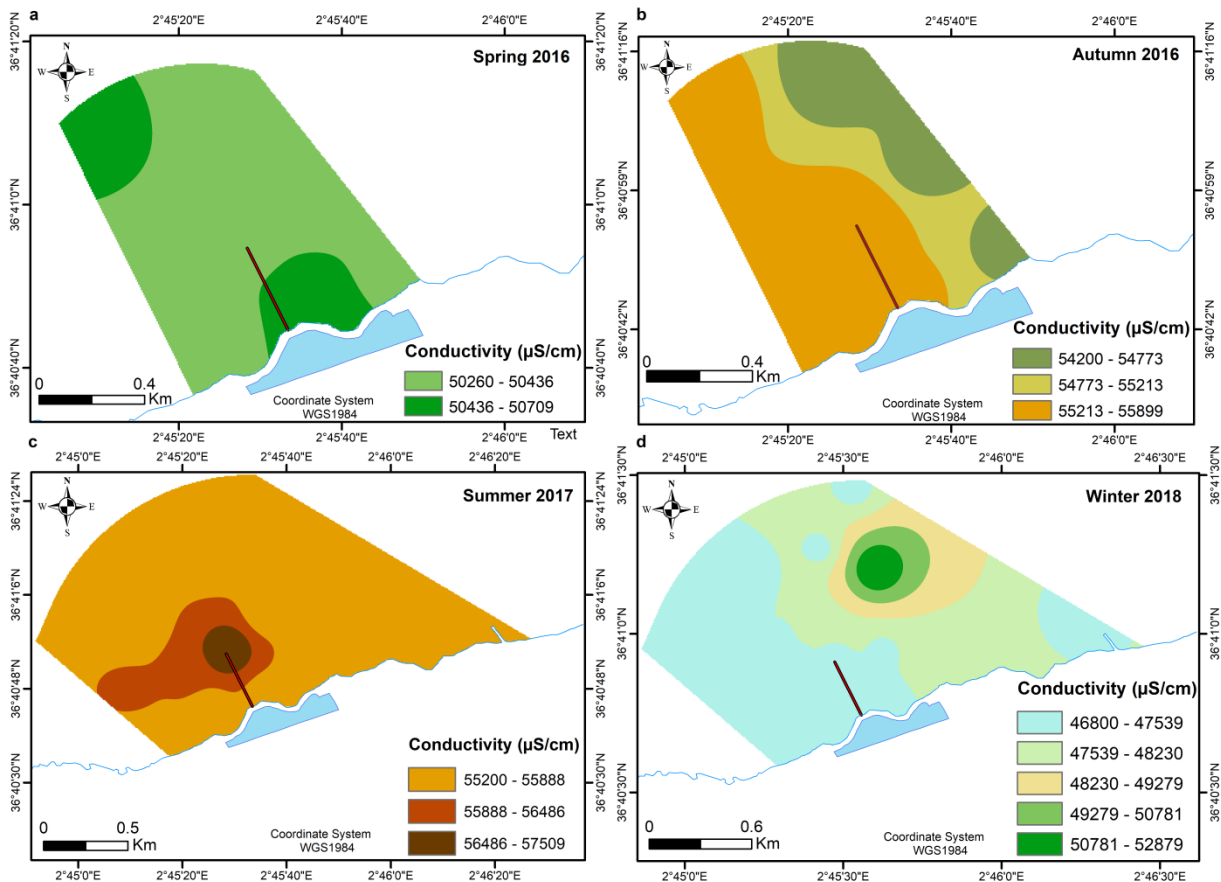
Dans ce cas d'étude, les valeurs de salinité ne sont pas très élevées, mais certaines espèces marines, comme *Posidonia Oceanica*, sont très sensibles à cette différence de salinité puisque leur seuil de tolérance (1 à 2 psu) est très bas (SANCHEZ-LIZASO *et al.*, 2008).

## 2.2.3. Variation de la conductivité

La conductivité électrique de l'eau de mer varie entre  $46,80 \text{ mS/cm}^{-1}$  et  $57,51 \text{ mS/cm}^{-1}$ , avec une moyenne de  $51,60 \pm 3,77 \text{ mS/cm}^{-1}$  et un coefficient de variation de 7,30.

Les valeurs mesurées montrent une grande variabilité spatio-temporelle. La plus faible valeur a été rencontrée lors de la campagne 4 ; en hiver (Figure 58.d), et la plus élevée durant la campagne 3, c'est-à-dire en été au niveau de la station 5 (Figure 58.c).

Les stations ayant enregistré les valeurs de conductivité les plus élevées, correspondent aux stations avec des salinités importantes.

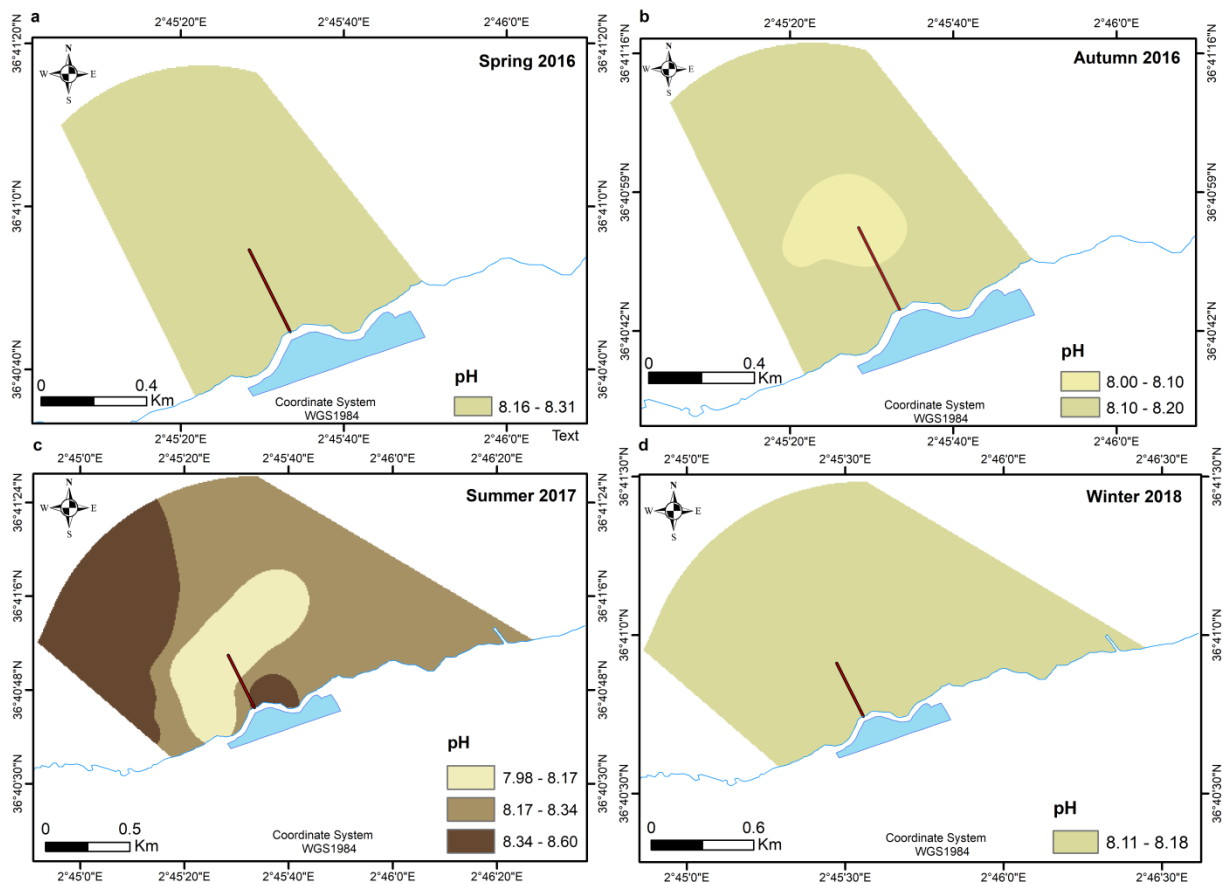


**Figure 58 :** Distribution spatiale de la conductivité des eaux de surface au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de mai 2016 (a), septembre 2016 (b), août 2017(c) et décembre 2018 (d).

### 2.2.4. Variation du pH

La distribution spatiale du pH (Figure 59) a montré une faible variation ; les valeurs de pH dans le site étudié varient de 7,98 à 8,61, avec une moyenne de  $8,19 \pm 0,12$  (Tableau 15).

En été, la valeur de pH la plus faible a été enregistrée au niveau de la station 5, et la plus élevée a été observée à la station 8. Cette valeur dépasse légèrement la valeur limite fixée par la réglementation algérienne de 8,5 et le pH moyen en mer Méditerranée, qui fluctue généralement entre 7,9 et 8,3 (GUENDOUZI *et al.*, 2021; MARION *et al.*, 2011).



**Figure 59 :** Distribution spatiale du pH des eaux de surface au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de mai 2016 (a), septembre 2016 (b), août 2017(c) et décembre 2018 (d).

Pendant le processus de dessalement, des antitartres et des produits chimiques alcalins sont fréquemment utilisés (MISSIMER et MALIVA, 2018; ROBERTS *et al.*, 2010). La présence de tels additifs dans la saumure rejetée peut augmenter le pH du milieu récepteur (LOIZIDE, 2003), ce qui peut expliquer en partie les valeurs mesurées au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1.

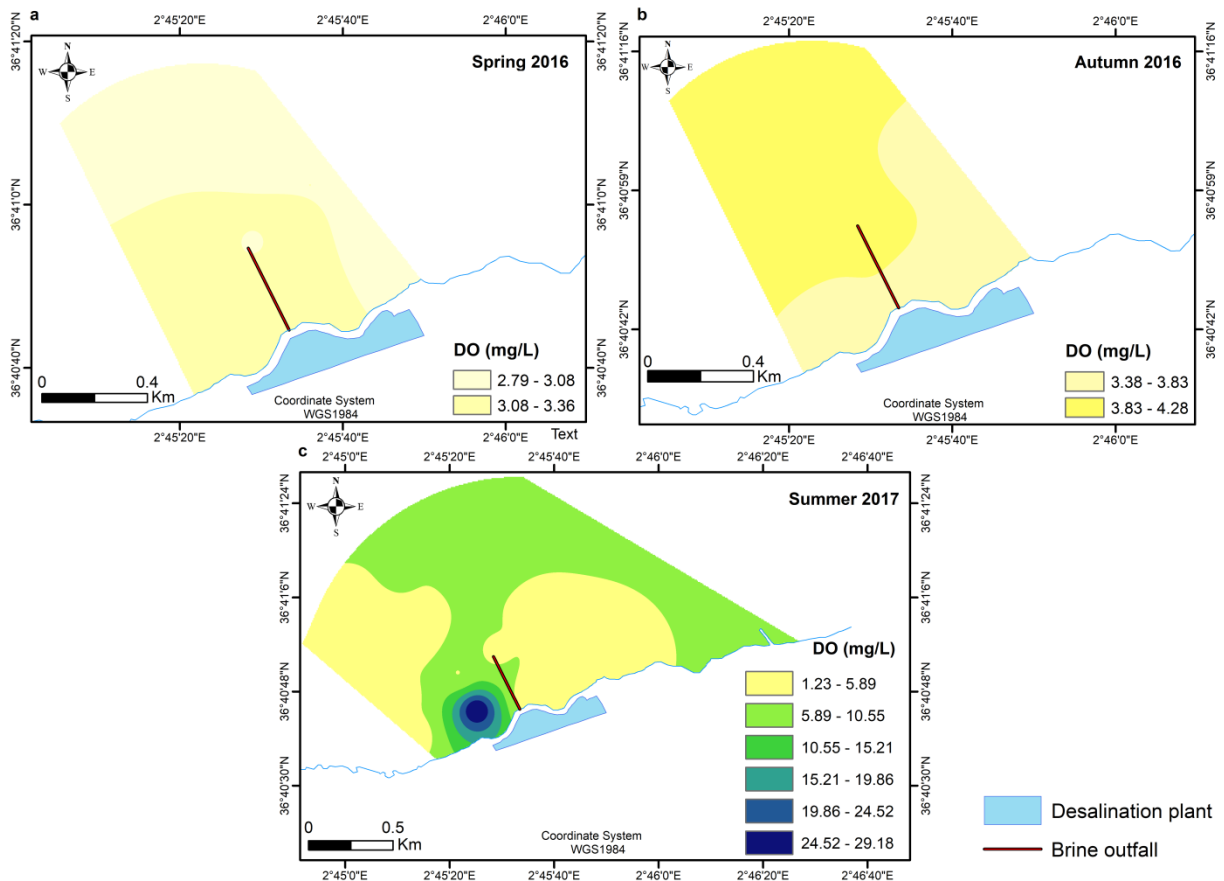
### 2.2.5. Variation de l'oxygène dissous

Les concentrations en oxygène dissous mesurées à la surface de l'eau de mer au voisinage de la zone de rejet ont été très variables, leurs teneurs allaient de 1,23 mg/L jusqu'à 29,20 mg/L au cours de la même campagne ; à savoir celle de l'été (Tableau 15).

Des conditions d'hypoxie ont été observées au niveau de la station 2 ( $< 2.0$  mg/L), contrairement à la station 3 où les eaux étaient saturées en oxygène (Figure 60.c).

Ceci pourrait être lié à la dégradation de la matière organique et aux processus d'hydrodynamique (AL-MUTAIRI et al., 2014).

Aussi, certains produits chimiques (bisulfate de sodium) utilisés au cours du processus de dessalement peuvent se retrouver en mer, ceci pourrait expliquer les faibles concentrations d'oxygène mesurées à proximité de la zone de rejet ; puisque les produits précités consomment de l'oxygène (FALLATAH et al., 2018).



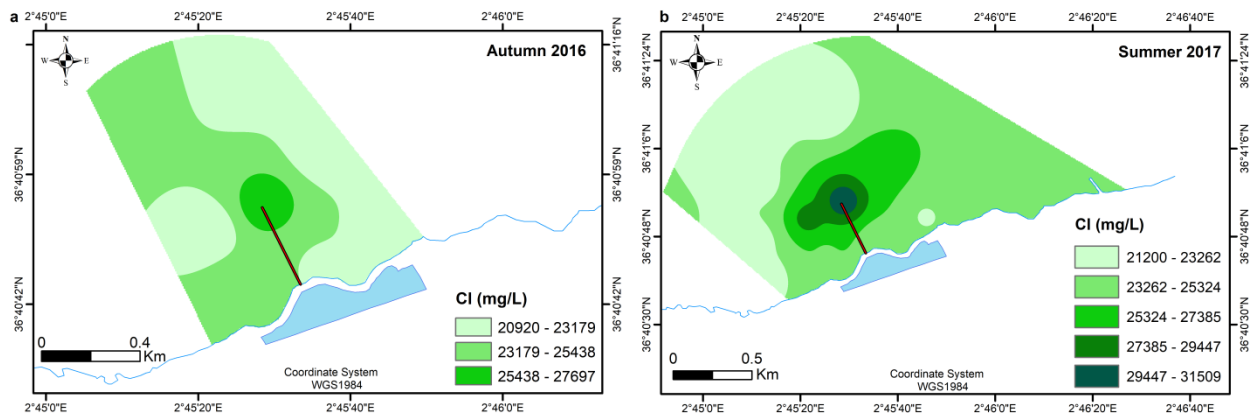
**Figure 110 :** Distribution spatiale de l'oxygène dissous dans les eaux de surface au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de mai 2016 (a), septembre 2016 (b), et août 2017(c).



### 2.2.6. Variation des chlorures

Seuls les échantillons d'eau de mer prélevés au cours de la deuxième et la troisième campagne ont été soumis à l'analyse des chlorures.

Les concentrations sont comprises entre 20 920 mg/L à la station 7 (Figure 61.a), et 31 510 mg/L à la station 5 (Figure 61.b). La valeur la plus faible a été mesurée lors de la seconde campagne (septembre 2016), et la plus élevée au cours de la troisième campagne (août 2017).

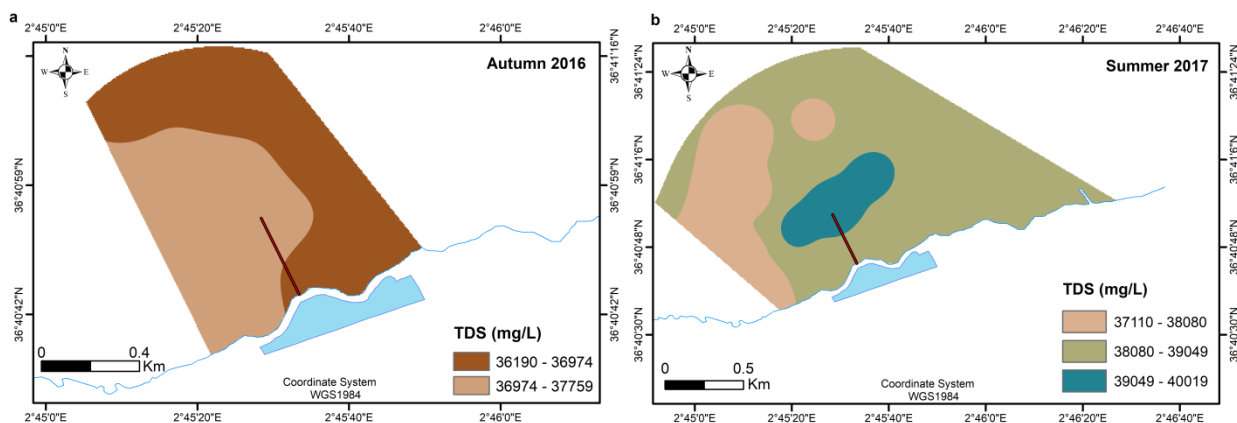


**Figure 121 :** Distribution spatiale des chlorures dans les eaux de surface au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de septembre 2016 (b), et août 2017(c).

### 2.2.7. Variation des solides dissous totaux

Tout comme les chlorures, les TDS ont été mesurés en septembre 2016 et août 2017.

La concentration moyenne mesurée était de l'ordre de 37 703,28 mg/L, avec comme faible valeur 36 190 mg/L enregistrée au mois de septembre 2016 au niveau de la station 1 (Figure 62.a). Alors que les teneurs les plus élevées ont été mesurées au mois d'août avec des valeurs allant jusqu'à 40 002 mg/L à la station 5 (Figure 62.b).



**Figure 62 :** Distribution spatiale des TDS dans les eaux de surface au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de septembre 2016 (b), et août 2017(c).

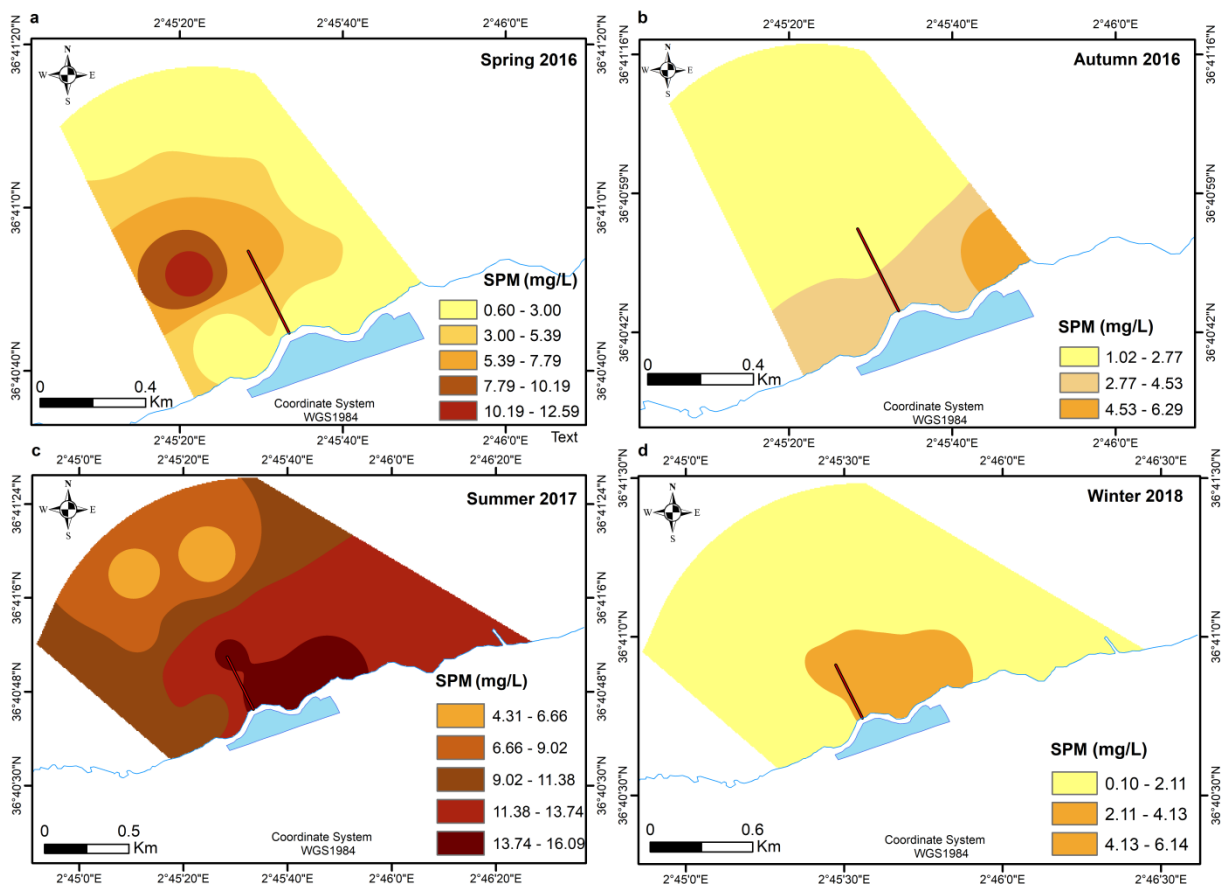
### 2.2.8. Variation de la matière en suspension

La concentration moyenne des matières en suspension mesurée durant la période d'étude était de  $1,02 \pm 1,50$  mg/L. La plus faible valeur (0,1 mg/L) a été observée lors de la dernière campagne (hiver) au niveau de la station 20 (Figure 63.d), tandis qu'une concentration importante (16,10 mg/L) a été enregistrée en été (campagne 3) à la station 2 (Figure 63.c).

Ces teneurs ont montré une grande disparité entre les campagnes et les stations, ceci étant confirmé par les coefficients de variation qui est de l'ordre de 119,09 (Tableau 15).

Il faut rappeler que la distribution des matières en suspension en milieu marin dépend ; entre autres, de l'état de la mer (BACHARI HOUMA, 2009) et des apports terrigènes, c'est-à-dire des activités anthropiques (KRAVCHISHINA et al., 2015; RODIER et al, 2016). Il convient donc de préciser que la troisième campagne a été effectuée dans des conditions de ciel voilé avec de la brume locale, une mer agitée, et des vents forts.

Les concentrations les plus élevées ont été enregistrées au niveau des stations 3, 4 et 5 (Figure 63.a et Figure 63.c) ; proches du point de rejet et lors de la troisième campagne où les conditions hydrodynamiques ont pu induire une remise en suspension des sédiments (Figure. 63.c).



**Figure 63 :** Distribution spatiale des MES dans les eaux de surface au voisinage de la station de dessalement de Fouka 1 durant les campagnes de prélèvement de mai 2016 (a), septembre 2016 (b), et août 2017(c).

### III- Section 3. Analyses statistiques

#### 1. Résultats de l'Analyse en Composantes Principales de la station de Palm-Beach

L'analyse en Composantes Principales a été réalisée afin d'étudier les interrelations entre les différents paramètres mesurés au cours de l'étude réalisée au niveau de la station de dessalement de Palm-Beach.

L'interprétation des résultats repose sur les valeurs absolues des coefficients de corrélation entre les paramètres, et sont donnés par la matrice de corrélation (Tableau 16) et la projection des variables représentée dans la Figure 64.

La matrice de corrélation (Tableau 16) nous indique des corrélations significatives entre les couples : température et salinité ( $r = -0,931$ ), salinité et conductivité ( $r = 0,748$ ), MES et MOP ( $r = 0,978$ ), turbidité et densité cellulaire du phytoplancton ( $r = 0,636$ ), et entre le Phosphate ( $\text{PO}_4$ ) et les Silicates ( $\text{SiO}_2$ ) ; dont le coefficient de corrélation est égale à 0,927.

La température et la salinité sont corrélés négativement, c'est à dire que lorsque la température augmente, la salinité diminue fortement (et inversement), sous l'effet des apports terrigènes (apports en eau douce) ou du facteur saisonnier.

Il en ressort de ces corrélations que le phytoplancton contribue à l'augmentation de la turbidité et des teneurs en Matières en Suspension, et que malgré la forte corrélation entre les MES et la matière organique, l'absence d'analyse du Carbone Organique Total (COT) ne permet pas d'en déterminer précisément l'origine. Ces particules peuvent tout aussi bien être d'origine naturelle (phytoplancton, débris végétaux) qu'anthropique (rejets urbains ou industriels).

**Tableau 17:** Matrice de corrélation des variables étudiées au niveau du site de la station de dessalement de Palm-Beach.

| Variables                     | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | SIO <sub>2</sub> | Température   | Salinité     | Conductivité | Turbidité    | MES      | MOP      | Phytoplancton |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|----------|----------|---------------|
| NO <sub>2</sub>               | <b>1</b>                     |                              |                               |                  |               |              |              |              |          |          |               |
| NO <sub>3</sub>               | 0,442                        | <b>1</b>                     |                               |                  |               |              |              |              |          |          |               |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | -0,333                       | -0,077                       | <b>1</b>                      |                  |               |              |              |              |          |          |               |
| SIO <sub>2</sub>              | -0,216                       | 0,141                        | <b>0,927</b>                  | <b>1</b>         |               |              |              |              |          |          |               |
| Température (T)               | -0,200                       | 0,037                        | 0,119                         | 0,252            | <b>1</b>      |              |              |              |          |          |               |
| Salinité (S)                  | 0,176                        | 0,007                        | -0,024                        | -0,134           | <b>-0,931</b> | <b>1</b>     |              |              |          |          |               |
| Conductivité (Cond)           | -0,079                       | -0,119                       | 0,229                         | 0,094            | -0,494        | <b>0,748</b> | <b>1</b>     |              |          |          |               |
| Turbidité (Tu)                | 0,131                        | -0,236                       | -0,295                        | -0,412           | -0,070        | -0,163       | -0,486       | <b>1</b>     |          |          |               |
| MES                           | -0,089                       | -0,239                       | -0,086                        | -0,180           | -0,377        | 0,342        | 0,095        | 0,076        | <b>1</b> |          |               |
| MOP                           | -0,212                       | -0,179                       | -0,043                        | -0,139           | -0,286        | 0,263        | 0,079        | 0,039        | 0,978    | <b>1</b> |               |
| Phytoplancton (phyto)         | 0,204                        | -0,453                       | -0,239                        | -0,394           | -0,280        | 0,220        | 0,054        | <b>0,636</b> | 0,488    | 0,406    | <b>1</b>      |

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

La projection des variables sur le plan factoriel (Figure 64a), nous indique que les axes F1 et F2 expliquent ensemble 53,81 % de la variance totale des données (F1=30,47 % et F2=23,34 %).

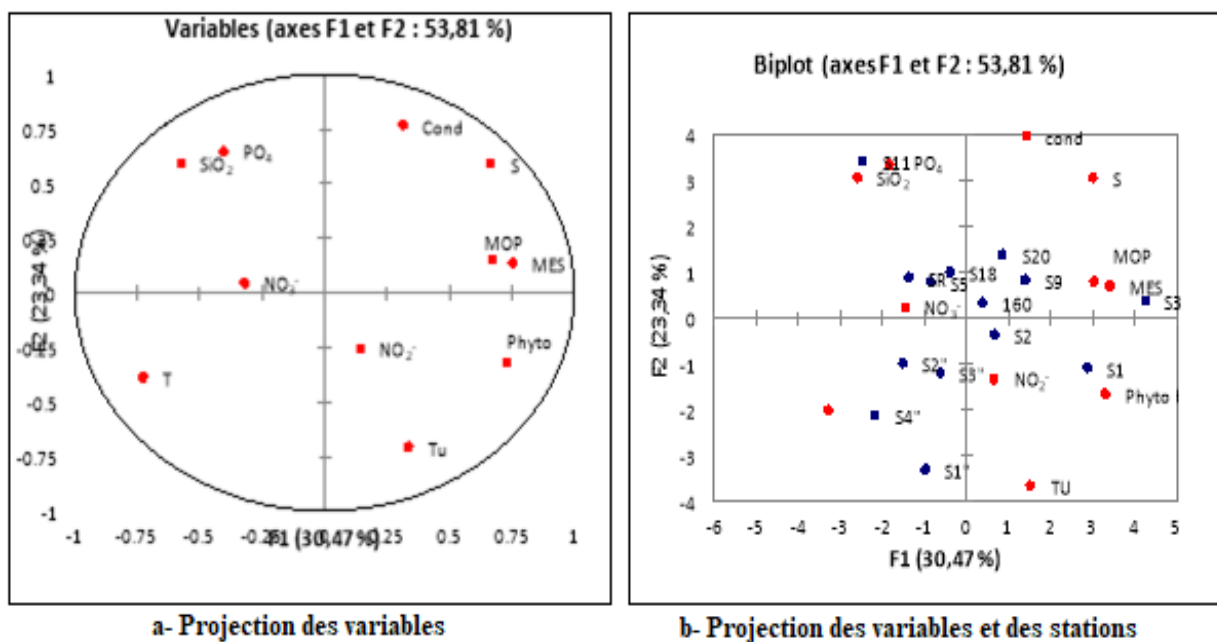
L'axe F1 sépare les variables en deux composantes, la première est dominée par la température, la salinité, les MES, les MOP et la densité cellulaire du phytoplancton.

Tandis que l'axe F2 est principalement lié aux variables : Silicates ( $\text{SiO}_2$ ), Phosphate ( $\text{PO}_4$ ), turbidité, et conductivité (Figure 64a).

Les stations se regroupent en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques dominantes.

Les stations S3, S9, S20, S18 sont fortement associées aux : MES et MOP, et dans une moindre mesure, à la Salinité et à la Conductivité (Figure 64b). La station S1 est fortement associée à la turbidité, aux MES, aux MOP, ainsi qu'à la densité cellulaire. Alors que les stations S1' et S4'' sont associées à la température qui est fortement corrélée négativement à la salinité (Figure 64b).

Cela peut correspondre à des zones proches d'un apport d'eau douce.



**Figure 64 :** Cercles de corrélation des variables explicatives étudiés au niveau du site de la station de dessalement de Palm-Beach

## 2. Résultats de l'Analyse en Composantes Principales de la station de Fouka 1

Dans cette partie nous allons présentés les résultats de l'Analyse en Composantes Principales des variables physicochimiques mesurées durant les différentes campagnes de prélèvement au niveau du site d'étude de la station de Fouka 1.

Les coefficients de corrélation entre les paramètres sont donnés par les matrices de corrélation

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

(Tableaux 17, 18, 19 et 20), et la projection des variables est représentée dans la Figure 65.

Pour la campagne de mai 2016 (Figure 65.a), le plan factoriel PC1 explique 45,67 % de la variance totale de 99,54 % et est positivement corrélé à l'ensemble des variables, à l'exception de l'oxygène dissous et de la température. Le facteur PC2 qui explique 23,37 % de la variance totale est positivement corrélé à la salinité, au pH, à l'oxygène dissous et aux matières en suspension, et est négativement corrélée à la température et à la conductivité électrique.

La matrice de corrélation (Tableau 17) montre une corrélation négative entre la température et les variables évaluées, à l'exception de l'oxygène dissous. La salinité et l'oxygène dissous sont positivement corrélés aux matières en suspension ( $r = 0,50$  et  $0,40$ ) ; à l'inverse, la conductivité électrique est négativement corrélée à l'oxygène dissous (Tableau 17).

**Tableau 18:** Matrice de corrélation des variables mesurées en mai 2016 ( $\alpha = 0.05$  level)

|      | T                   | Sal                | EC                  | pH     | DO    | SPM   |
|------|---------------------|--------------------|---------------------|--------|-------|-------|
| Temp | 1,000               |                    |                     |        |       |       |
| Sal  | -0,620 <sup>a</sup> | 1,000              |                     |        |       |       |
| EC   | -0,460              | 0,380              | 1,000               |        |       |       |
| Ph   | -0,090              | 0,120              | -0,240              | 1,000  |       |       |
| DO   | 0,520 <sup>a</sup>  | 0,090              | -0,600 <sup>a</sup> | -0,200 | 1,000 |       |
| SPM  | -0,320              | 0,500 <sup>a</sup> | -0,120              | 0,050  | 0,400 | 1,000 |

<sup>a</sup> Corrélation significative

Le Tableau 18 relatif à la matrice de corrélation de Pearson pour la campagne de septembre 2016, montre des corrélations significatives entre la température et la conductivité ( $r = 0,94$ ) ainsi que l'oxygène dissous ( $r = 0,68$ ).

Des corrélations positives de la salinité et de la CE avec l'oxygène dissous ( $r = 0,69$  et  $0,72$ ), les TDS ( $r = 0,83$  et  $0,55$ ) et les Cl ( $r = 0,58$  et  $0,54$ ) sont également mises en évidence, tandis que le pH est négativement corrélé avec la salinité ( $r = 0,83$ ) et le TDS ( $r = 0,51$ ).

D'autres corrélations significatives ont été observées entre TDS et DO ( $r = 0,70$ ), Cl et pH ( $r = 0,52$ ) et TDS et Cl ( $r = 0,59$ ).

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Concernant la campagne d'août 2017, les résultats de l'analyse en composantes principales (Figure 73 et Tableau 19) indiquent une corrélation positive entre la température et les matières en suspension ( $r = 0,52$ ), et la salinité avec tous les paramètres, à l'exception du pH.

Des corrélations significatives sont observées entre la température, la salinité, les TDS, les Cl, les matières en suspension et la conductivité électrique (CE), avec des coefficients de corrélation respectifs de 0,51, 0,75, 0,65, 0,70 et 0,57.

De plus, les Cl présentent une forte corrélation positive avec les TDS ( $r = 0,92$ ) et une corrélation modérée avec les matières en suspension ( $r = 0,57$ ).

À l'inverse, le pH est négativement corrélé avec la salinité ( $r = -0,69$ ), les TDS ( $r = -0,71$ ) et les Cl ( $r = -0,75$ ).

**Tableau 19:** Matrice de corrélation des variables mesurées en septembre 2016 ( $\alpha = 0.05$  level)

|      | T                  | Sal                 | EC                 | pH                  | DO                 | TDS                | Cl    | SPM   |
|------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------|-------|
| Temp | 1.000              |                     |                    |                     |                    |                    |       |       |
| Sal  | 0.250              | 1.000               |                    |                     |                    |                    |       |       |
| EC   | 0.940 <sup>a</sup> | 0.470               | 1.000              |                     |                    |                    |       |       |
| pH   | 0.220              | -0.830 <sup>a</sup> | -0.030             | 1.000               |                    |                    |       |       |
| DO   | 0.680 <sup>a</sup> | 0.690 <sup>a</sup>  | 0.720 <sup>a</sup> | -0.290              | 1.000              |                    |       |       |
| TDS  | 0.320              | 0.830 <sup>a</sup>  | 0.550 <sup>a</sup> | -0.510 <sup>a</sup> | 0.700 <sup>a</sup> | 1.000              |       |       |
| Cl   | 0.330              | 0.580 <sup>a</sup>  | 0.540 <sup>a</sup> | 0.520 <sup>a</sup>  | 0.390              | 0.590 <sup>a</sup> | 1.000 |       |
| SPM  | 0.340              | -0.080              | 0.330              | 0.140               | -0.220             | -0.240             | 0.050 | 1.000 |

<sup>a</sup> Corrélation significative

Pour ce qui est des mesures effectuées au mois de décembre 2018, les deux premiers facteurs PC1 et PC2 représentent respectivement 29,63 % et 23,11 % de la variance totale.

Comme le montre la Figure 73d, le premier facteur (PC1) est positivement corrélé aux variables étudiées, à l'exception de la SPM, tandis que le second facteur (PC2) est négativement corrélé à la température et à la conductivité. L'analyse ne met pas en évidence des corrélations significatives entre les variables (Tableau 20).

D'une manière générale, l'analyse en composantes principale a mis en évidence une corrélation significative entre la température et la conductivité électrique pour toutes les campagnes.

### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

**Tableau 20:** Matrice de corrélation des variables mesurées en août 2017 ( $\alpha = 0.05$  level)

|      | T                  | Sal                 | EC                  | pH                  | DO     | TDS                | Cl                 | SPM   |
|------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------|--------------------|--------------------|-------|
| Temp | 1.000              |                     |                     |                     |        |                    |                    |       |
| Sal  | 0.230              | 1.000               |                     |                     |        |                    |                    |       |
| EC   | 0.510 <sup>a</sup> | 0.750 <sup>a</sup>  | 1.000               |                     |        |                    |                    |       |
| pH   | 0.010              | -0.690 <sup>a</sup> | -0.280              | 1.000               |        |                    |                    |       |
| DO   | 0.230              | 0.180               | 0.040               | -0.420              | 1.000  |                    |                    |       |
| TDS  | 0.190              | 0.890 <sup>a</sup>  | 0.650 <sup>a</sup>  | -0.710 <sup>a</sup> | 0.070  | 1.000              |                    |       |
| Cl   | 0.220              | 0.940 <sup>a</sup>  | 0.700 <sup>a</sup>  | -0.750 <sup>a</sup> | 0.160  | 0.920 <sup>a</sup> | 1.000              |       |
| SPM  | 0.520 <sup>a</sup> | 0.450               | 0.5700 <sup>a</sup> | -0.200              | -0.010 | 0.490 <sup>a</sup> | 0.570 <sup>a</sup> | 1.000 |

<sup>a</sup> Corrélation significative

La salinité présente une corrélation significative avec le pH, les TDS et les Cl en automne et en été, ceci indique que ces paramètres sont influencés par le même facteur.

Bien que l'hypothèse principale attribue l'augmentation conjointe de la salinité, du pH et des TDS aux rejets de saumure et à leurs traitements associés (ajustement du pH, ajout d'anti-tartres ; Adem et al., 2023), ce facteur anthropique n'explique pas entièrement cette variation conjointe de la salinité, du pH et des TDS à proximité du point de rejet, puisque l'augmentation de la salinité s'accompagne fréquemment d'une hausse des concentrations en ions bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) et carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Ces entités, qui gouvernent le système tampon carbonaté jouent un rôle clé dans la stabilisation ou l'élévation du pH du milieu.

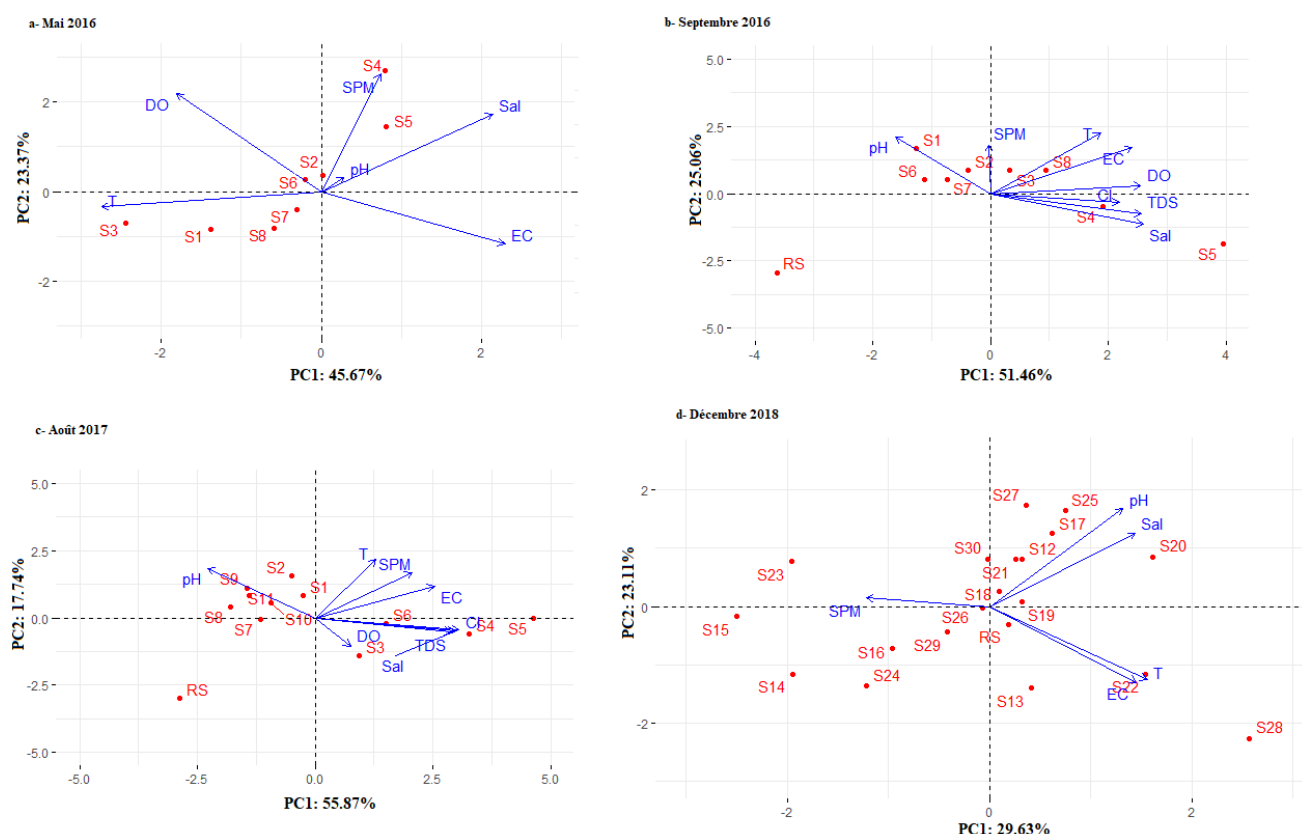
Une salinité élevée peut également affecter la structure du phytoplancton et l'intensité de la photosynthèse. Cette dernière consommant le  $\text{CO}_2$ , peut également entraîner une augmentation du pH.

**Tableau 21:** Matrice de corrélation des variables mesurées en décembre 2018 ( $\alpha = 0.05$  level)

|      | T      | Sal    | EC     | pH     | SPM   |
|------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Temp | 1.000  |        |        |        |       |
| Sal  | 0.190  | 1.000  |        |        |       |
| EC   | 0.260  | 0.050  | 1.000  |        |       |
| Ph   | -0.040 | 0.270  | 0.080  | 1.000  |       |
| SPM  | -0.100 | -0.020 | -0.120 | -0.150 | 1.000 |



## CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS



**Figure 65 :** Distribution des paramètres étudiés au niveau du site de la station de dessalement de Fouka 1 sur le plan factoriel PC1 et PC2

### 3. Résultats de la classification hiérarchique de la station de Fouka 1

Les résultats de l'analyse de Classification Hiérarchique (Tableau 21 et Figure 66) ont permis de regrouper les stations d'échantillonnage en quatre classes principales ; en fonction de leur distance par rapport au point de rejet de saumure. Ainsi, la distribution et la variabilité des principaux paramètres physico-chimiques (température, salinité, CE, pH et SPM) sont clairement influencés par l'effluent de l'installation de dessalement de Fouka 1.

La première classe (Cluster 1) composée de 10 stations, se caractérise par des températures relativement élevées, associées à une conductivité électrique notable.

La deuxième classe (Cluster 2) comprend 24 stations, et ne présente pas de profil extrême. Ce groupe enregistre les valeurs moyennes les plus basses pour l'ensemble de température (18,22 °C), de salinité (36,85 psu), de conductivité électrique (48,32  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), de pH (8,16) et de matières en suspension (0,94 mg/L). Cette classe pourrait représenter les stations de référence ou les zones subissant la plus faible influence des rejets.

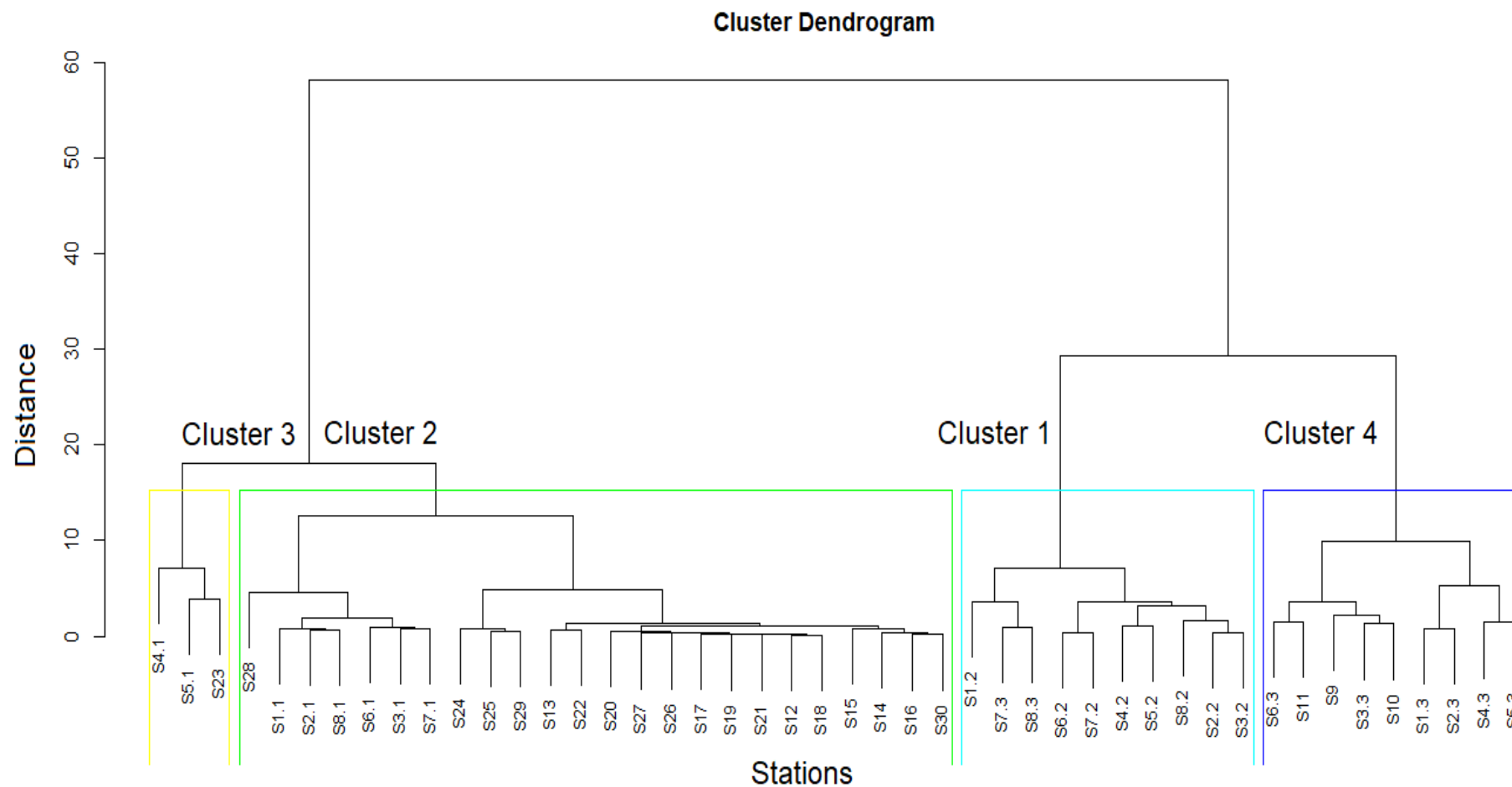
### CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

La troisième classe (Cluster 3) ne contient que trois stations ; situées immédiatement à proximité du point de rejet de saumure (30 à 200 m). Ce groupe se caractérise par des niveaux moyens de salinité (37,34 psu), de pH (8,21) et de particules en suspension (8,65 mg/L).

Enfin, la dernière classe ou groupe (Cluster 4) comprend 9 stations et se caractérise par les niveaux les plus élevés de température (27,57 °C), de salinité (37,74 psu), de conductivité (55,83  $\mu\text{S/cm}$ ), de pH (8,24) et de matières en suspension (12,40 mg/L). Les stations de cette dernière classe concernent principalement les points d'échantillonnage situés à proximité immédiate (30 à 200 m) et aux alentours (250 à 900 m) du point de rejet de saumure, ainsi que les stations proches de la côte.

**Tableau 22:** Valeurs moyennes, minima, maxima et coefficient de variations des variables des 4 classes de stations au niveau du site de Fouka 1

|                                | T     | Sal   | EC    | pH   | SPM   |
|--------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|
| <b>Cluster 1 (10 stations)</b> |       |       |       |      |       |
| X                              | 25.67 | 37.08 | 55.21 | 8.20 | 3.11  |
| Min                            | 25.00 | 36.53 | 54.20 | 8.01 | 1.02  |
| Max                            | 27.66 | 38.90 | 55.90 | 8.61 | 6.30  |
| SD                             | 1.08  | 0.87  | 0.62  | 0.19 | 1.86  |
| <b>Cluster 2 (24 stations)</b> |       |       |       |      |       |
| X                              | 18.22 | 36.85 | 48.32 | 8.16 | 0.94  |
| Min                            | 17.19 | 36.49 | 46.80 | 8.11 | 0.10  |
| Max                            | 20.10 | 37.71 | 52.88 | 8.32 | 2.96  |
| SD                             | 0.81  | 0.30  | 1.68  | 0.05 | 0.89  |
| <b>Cluster 3 (3 stations)</b>  |       |       |       |      |       |
| X                              | 18.69 | 37.34 | 49.36 | 8.21 | 8.65  |
| Min                            | 17.47 | 36.68 | 47.29 | 8.15 | 6.15  |
| Max                            | 19.31 | 37.67 | 50.41 | 8.25 | 12.60 |
| SD                             | 1.06  | 0.57  | 1.80  | 0.05 | 3.46  |
| <b>Cluster 4 (9 stations)</b>  |       |       |       |      |       |
| X                              | 27.57 | 37.74 | 55.83 | 8.24 | 12.40 |
| Min                            | 27.43 | 36.77 | 55.20 | 7.98 | 8.20  |
| Max                            | 27.64 | 39.94 | 57.51 | 8.58 | 16.10 |
| SD                             | 0.06  | 1.24  | 0.74  | 0.24 | 2.71  |



**Figure 66 :** Distribution des paramètres étudiés au niveau du site de la station de dessalement de Fouka 1 sur le plan factoriel PC1 et PC2

***CHAPITRE IV : MODÉLISATION  
DES REJETS DE SAUMURE DE LA  
STATION DE FOUKA 1 ET  
ANALYSE DE LA PERFORMANCE  
DE L'EFFLUENT***

## **CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES REJETS DE SAUMURE DE LA STATION DE FOUKA 1 ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'EFFLUENT**

L'analyse des mesures effectuées au niveau des deux sites d'étude ; à savoir la station de dessalement d'eau de mer de Palm-Beach et celle de Fouka 1, met en évidence l'influence des effluents de saumures sur les caractéristiques du milieu marin récepteur.

Les stations situées dans la zone proche du rejet présentent pratiquement les valeurs les plus élevées/faibles pour la majorité des variables étudiées, en particulier la salinité, qui a connu une augmentation significative à proximité du point de rejet, atteignant des valeurs nettement supérieures à la salinité de référence de la baie de Bou Ismail ; située généralement entre 37 et 38 psu.

Il faut rappeler que le degré de l'impact des rejets issus des stations de dessalement sur le milieu marin est régit par l'interaction d'un ensemble de facteurs. D'une part, des propriétés du milieu récepteur, comme la bathymétrie. D'autre part, des caractéristiques du rejet ; tels que le débit, la géométrie de l'émissaire et de sa concentration (ALAMEDDINE et EL-FADEL, 2007; EINAV et LOKIEC, 2003; FERNÁNDEZ-TORQUEMADA et LUIS SÁNCHEZ-LIZASO, 2007).

Parmi les principales mesures d'atténuation des risques environnementaux liés à ce type d'installations, nous citerons l'utilisation de diffuseurs et la sélection d'un emplacement optimal pour l'exutoire, afin d'assurer une dilution rapide de la saumure dans la zone de rejet (PORTO PEREIRA et al., 2024).

La première phase de cette étude s'est concentrée sur la caractérisation physico-chimique des effluents de saumure et des eaux réceptrices. Pour compléter cette analyse, la partie suivante se propose d'examiner les caractéristiques techniques de l'émissaire et les conditions d'évacuation des effluents propres aux installations de dessalement concernées. Ces données serviront de base à l'analyse ultérieure de l'efficacité du dispositif d'évacuation des rejets en termes de mélange et de dilution.

L'analyse se fera sur la base des résultats générés par le programme informatique CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System).

Compte tenu du manque de données sur la station de dessalement de Palm-Beach, notre étude se limitera à l'analyse du site de Fouka 1.

Ce chapitre débutera par la présentation des notions fondamentales régissant les processus de mélange et de transport des rejets de saumure, avant d'entamer le volet dédié aux simulations numériques.

## CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES REJETS DE SAUMURE DE LA STATION DE FOUKA 1 ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'EFFLUENT

### 1. Gestion des rejets de saumure

L'industrie du dessalement dispose d'un large éventail de méthodes d'élimination et de gestion de la saumure (Tableau 22). La sélection d'une technique spécifique repose sur l'évaluation d'un certain nombre de paramètres tels que les propriétés de la saumure (volume et composition), les contraintes du site (localisation et accessibilité de la zone de rejet), et la faisabilité économique (PANAGOPOULOS et HARALAMBOUS, 2020).

**Tableau 23:** Méthodes d'élimination et de gestion de la saumure produite par les installations de dessalement d'eau de mer (BELLO ET AL., 2021; LATTEMANN ET HÖPNER, 2008; RODRÍGUEZ-DELANUEZ et al., 2012; SAHU, 2021).

|                                                           | Méthode                                          | Type                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Méthodes de Rejet Traditionnelles</b>                  | Rejet en milieu marin (usines côtières)          | - Émissaires sous-marins et diffuseurs (Annexe 3)                                               |
|                                                           |                                                  | - Rejet en Surface (Annexe 3)                                                                   |
|                                                           |                                                  | - Mélange avec des Effluents ; Co-disposal (Annexe 3)                                           |
|                                                           |                                                  | - Rejet par infiltration sous la mer (Subsurface Ocean Discharge ou Subsurface Brine Discharge) |
| <b>Méthodes de Réduction du Volume et de Valorisation</b> | Rejet en milieu continental (usines intérieures) | - Bassins d'Évaporation.<br>- Injection en Puits Profonds<br>- Rejet en Eaux de Surface         |
|                                                           | Dilution Avancée (Co-Intake)                     | Mélange à l'Admission                                                                           |
|                                                           | Technologies de Concentration                    | Récupération d'eau Élevée (HER) / Minimisation des Rejets Liquides (MLD)                        |
|                                                           | Zéro Rejet Liquide (Zero Liquid Discharge - ZLD) | Évaporation Thermique et Cristallisation                                                        |
|                                                           | Valorisation des Sous-Produits                   | Extraction de Minéraux (sel commun, magnésium, lithium, calcium, potassium)                     |

Bien que les méthodes d'élimination des rejets de saumure soient assez variées, la procédure la plus couramment utilisée pour les usines de dessalement par osmose inverse (SWRO) situées en bord de mer est le rejet par émissaire marin. Ce système se compose généralement d'une longue canalisation immergée ; appelée pipeline, aboutissant à une section terminée par une simple ouverture (buse) ou un diffuseur qui est conçu pour accélérer le processus de dilution (LOYA-FERNÁNDEZ et al., 2012).

## CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES REJETS DE SAUMURE DE LA STATION DE FOUKA 1 ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'EFFLUENT

### 2. Modélisation des panaches d'effluents en milieu marin

Le comportement d'un effluent en milieu aquatique (Annexe 3) est conditionné par un certain nombre de facteurs ; tels que : le mode de rejet, ses caractéristiques, son emplacement et les propriétés du plan d'eau récepteur, etc.....

Dans le milieu récepteur le processus de mélange d'un effluent donné se déroule en deux étapes :

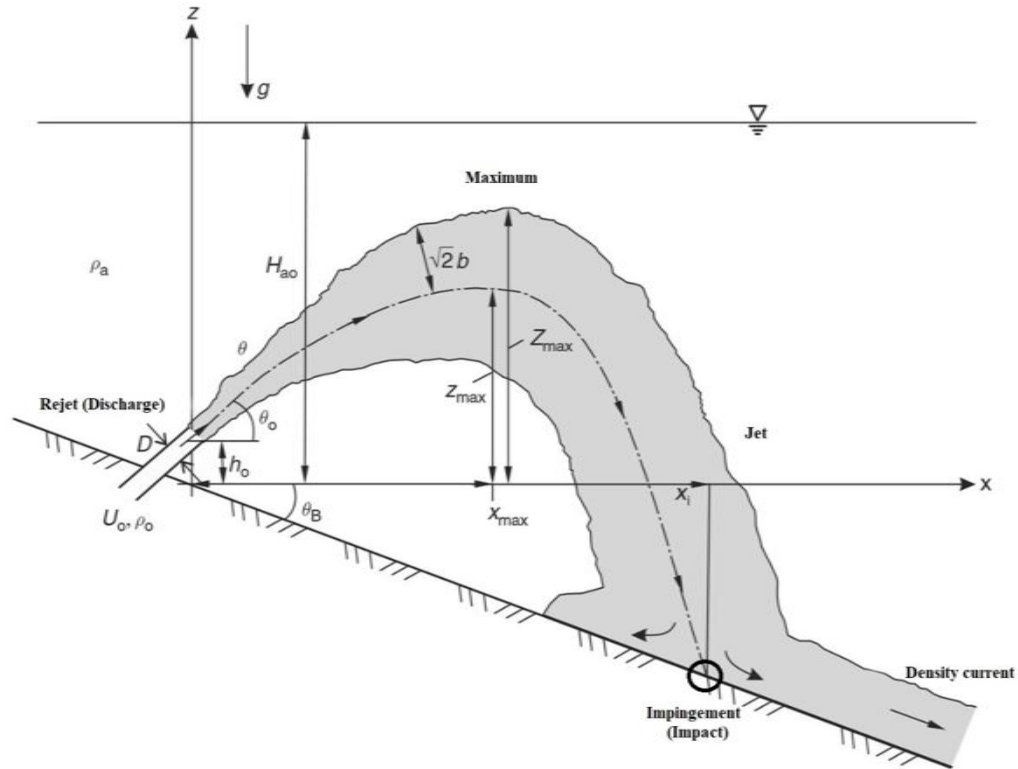
- une dilution initiale au niveau du champ proche (Near-field) ; qui se déroule dans la région spatiale immédiatement adjacente au point d'entrée de l'émissaire. Dans cette zone la dynamique du panache est principalement régie par la configuration de l'émissaire (diamètre, débit, et densité de l'effluent), les propriétés de l'effluent et de celles du milieu ambiant (PALOMAR *et al.*, 2011; ZIJL, 2002).
- Une dilution secondaire et progressive au niveau du champ lointain (Far-field). Cet endroit est situé au-delà du point de rejet. À ce stade, le panache de saumure est dominé par un courant de gravité et s'écoule le long du fond à cause de sa densité élevée. Dans cette zone les processus de mélange dépendent des conditions du milieu récepteur (bathymétrie, vagues, courants marins, turbulence, advection,... etc.) et des différences de densité entre le panache hypersalin et les masses d'eau réceptrices (PALOMAR *et al.*, 2011; ZIJL, 2002).

Les taux de dilution les plus élevés sont atteints dans le champ proche, en raison de la turbulence générée par la couche de cisaillement, résultant de la forte différence de vitesse entre le jet et le milieu récepteur, contrairement au champ lointain où le taux de dilution est nettement plus faible (LATTEMANN et HÖPNER, 2008; PALOMAR *et al.*, 2011).

Pour les effluents des stations de dessalement, la dispersion de la saumure ou encore l'écoulement du panache de saumure est conditionné par la nature du rejet.

En effet, les rejets issus des installations d'osmose inverse ; dont la densité est supérieure à celle du milieu marin récepteur présentent un jet à flottabilité négative (Figure 67). Ils ont donc tendance à plonger et à former un courant sur le fond. Inversement, les effluents des stations de dessalement thermiques ont une flottabilité neutre à positive, ce qui provoque la montée et la dispersion du panache à la surface de l'eau (BLENINGER *et al.*, 2010; FISCHER, 1979).

## CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES REJETS DE SAUMURE DE LA STATION DE FOUKA 1 ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'EFFLUENT



**Figure 67:** Représentation schématisée d'un jet à flottabilité négative d'un émissaire marin installé sur un fond incliné (GIL TRUJILLO et SADHWANI ALONSO, 2025; PISTOCCHI et al., 2020; YOUSFI et CHEDIK, 2023)

Les paramètres illustrés dans la Figure 67 correspondent à :

$H_{ao}$  : Profondeur moyenne au point de rejet ; en mètre (m).

$Z_{max}$  : Hauteur maximale d'élévation (hauteur maximale de la limite supérieure ou du bord supérieur du jet) ; en mètre (m).

$X_{max}$  : Position horizontale de la crête de la ligne centrale ; en mètre (m).

$X_i$  : Position horizontale au point d'impact (point où l'axe du jet heurte le fond) ; en mètre (m).

$\rho_a$  : Masse volumique ambiante ; en  $\text{kg/m}^3$ .

$\rho_0$  : Masse volumique de l'effluent ; en  $\text{kg/m}^3$ .

$U_0$  : Vitesse initiale de décharge du jet ; en m/s.

$D$  : Diamètre du port ; en mètre (m).

$h_0$  : Hauteur du port ; en mètre (m).

$\theta_0$  : Angle de décharge du jet (angle vertical par rapport au fond) ; en degré ( $^\circ$ ).

$\theta_B$  : Pente en mer ; en degré ( $^\circ$ ).

$g$  : Accélération gravitationnelle à n'importe quel point de la décharge ; en  $\text{m/s}^2$ .

$\sqrt{2b}$  : Demi-largeur du jet ; en mètre (m).

Les paramètres qui régissent la trajectoire du panache ; tels que le débit, les flux de flottabilité et de quantité de mouvement sont présentés en Annexe 3. Ils ont été calculés grâce à l'outil « **RO-discharge-Calculator** » décrit plus bas.



### **3. Simulation des rejets de saumure de la station de Fouka 1**

Des modèles numériques de zones de mélange ont été mis au point pour simuler la dynamique et l'évolution des panaches de saumure dans les eaux réceptrices. Ces outils fournissent une représentation spatio-temporelle à la fois qualitative et quantitative du transport et de la dispersion de l'effluent. Ils déterminent le comportement du panache, notamment sa trajectoire, son étendue et le taux de dilution atteint. Parmi les modèles susceptibles d'être appliqués nous citons : CORMIX, Visual Plume, MIKE 3, MEDVSA, RMA 2/RMA 4, MIKE 21, TELEMAC, DELFT 3D.

Dans le cadre de cette étude l'outil CORMIX a été employé afin de simuler le comportement des rejets de saumure de la station de Fouka 1 et d'évaluer les performances de l'effluent.

#### **3.1. Présentation des outils numériques**

##### **3.1.1. Présentation du RO-discharge-Calculator**

Le RO-discharge calculator est un outil destiné aux rejets denses comme ceux des usines de dessalement par osmose inverse (RO); nommé RO-discharge calculator ; développé par (BLENINGER et al, 2010) a été utilisé (Annexe 2).

Cette feuille de calcul d'Excel détermine les propriétés physiques et chimiques de l'effluent (débit, température, salinité, densité, concentrations, etc.) au point de rejet.

Le calculateur qui est basé sur les principes fondamentaux de l'hydrodynamique des jets flottants/denses et sur les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, permet également d'estimer la dilution initiale en champ proche (BLENINGER et al, 2010).

##### **3.1.2. Présentation du modèle CORMIX**

Le CORMIX (Cornell Mixing Zone Expert System) est un logiciel d'analyse et de prévision des rejets en milieu aquatique. Il a été développé par l'Agence américaine de protection de l'environnement (EPA) et l'Université Cornell. Le cœur de ce logiciel est fondé sur la classification des écoulements et l'analyse dimensionnelle (Annexe 3) qui lui permettent de reconnaître et de simuler les différents comportements hydrodynamiques du panache d'effluent (DONEKER et JIRKA, 2007; ZIJL, 2002).

Cet outil d'aide à la décision se distingue par sa capacité à modéliser la majorité des géométries

## CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES REJETS DE SAUMURE DE LA STATION DE FOUKA 1 ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'EFFLUENT

d'émissaire. Il couvre les configurations simples (sortie unique) ou complexes (diffuseurs à orifices multiples), qu'elles soient submersibles ou en surface. Il est également applicable aux effluents à flottabilité positive et négative et permet de prévoir la dynamique de mélange pour divers types de rejets, y compris les saumures des stations de dessalement (PALOMAR *et al.*, 2013).

Enfin, il est applicable à une large gamme de milieux aquatiques, incluant les estuaires, les fleuves peu profonds et les océans (AGUIRRE *et al.*, 2012).

Le CORMIX (Annexe 3) se compose de quatre modèles hydrodynamiques intégrés :

- **CORMIX1** : pour les rejets à port unique (ou à une seule buse).
- **CORMIX2** : pour les rejets par diffuseur multi-ports.
- **CORMIX3** : pour les rejets de surface à flottabilité positive (panache ascendant).
- **DHYDRO** : pour l'analyse des rejets denses et/ou sédimentaires dans les environnements côtiers (DONEKER et JIRKA, 2007).

D'autres outils sont inclus dans ce logiciel ; à savoir :

- **CorJet** (le Modèle Intégral de Jet Flottant de Cornell) : pour une analyse détaillée du comportement du jet flottant en champ proche.
- **FFL** (le Localisateur de Panache en Champ Lointain) : pour la délimitation du panache en champ lointain dans des environnements non uniformes (fleuves ou estuaires).
- **CorSpy** : visualisation interactive en 3D de l'émissaire.
- **CorGIS** : pour la saisie des données USEPA BASINS.
- **CorVue** : graphiques de visualisation interactive en 3D du mélange.
- **CorDocs** : documentation en ligne du système et aide utilisateur.
- **CorSens** : outil d'analyse de sensibilité automatique.
- **CorTime** : analyse des séries chronologiques pour le couplage avec les modèles de circulation côtière en champ lointain.
- Des systèmes pour l'étalonnage des modèles de mélange (mixing model benchmarking) et l'outil de validation de cas de modèle de mélange **CorVal** (DONEKER et JIRKA, 2007; JIRKA *et al.*, 1996).

### 3.2. Paramètres de calcul

Les données d'entrée essentielles à la modélisation concernant les propriétés du rejet de la station

## CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES REJETS DE SAUMURE DE LA STATION DE FOUKA 1 ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'EFFLUENT

de dessalement de Fouka 1 à la sortie, la géométrie de l'émissaire, et les caractéristiques du milieu récepteur sont données dans le Tableau 23.

**Tableau 24:** Données d'entrée pour les simulations

| Caractéristiques du milieu récepteur       |        |
|--------------------------------------------|--------|
| Vitesse du vent (m/s)                      | 2,2    |
| Vitesse du courant (m/s)                   | 0,02   |
| Salinité (psu)                             | 36,5   |
| Température (°C)                           | 19,5   |
| Caractéristiques de l'effluent             |        |
| Salinité (psu)                             | 70     |
| Température (°C)                           | 20     |
| Débit maximal de rejet ( $m^3/s$ )         | 1,70   |
| Limité de salinité tolérée (psu)           | 38,5   |
| Accroissement de salinité (psu)            | 33,5   |
| Caractéristiques du système de rejet       |        |
| $U_0$ : Vitesse initiale de décharge (m/s) | 6      |
| Distance par rapport à la côte (m)         | 450    |
| Profondeur au point de rejet (m)           | 7      |
| Type de sortie                             | Buse   |
| $\theta_0$ : Angle de décharge (°)         | 45     |
| D : Diamètre du port (m)                   | 0,74   |
| $H_0$ : Hauteur du diffuseur/buse (m)      | 2      |
| Coefficient de Manning (Rugosité standard) | 0,02   |
| Pente (°)                                  | 0,9    |
| Darcy-Weisbach friction factor F           | 0,0328 |

### 4. Présentation et interprétation des résultats de simulation

#### 4.1. Caractérisation des jets de saumure

Les paramètres calculés via le RO-Discharge-Calculator sont donnés dans le Tableau 24.

**Tableau 25:** Paramètres clés mesurés à l'aide de l'outil RO-Discharge-Calculator

| Paramètre                                | Valeur  |
|------------------------------------------|---------|
| Densité du milieu récepteur ( $kg/m^3$ ) | 1025,80 |
| Densité du rejet ( $kg/m^3$ )            | 1048,56 |
| $Q_{Drink}$ ( $m^3/s$ )                  | 1,39    |
| $Q_{Desal}$ ( $m^3/s$ )                  | 1,70    |
| $Q_{0.ind}$ ( $m^3/s$ )                  | 2,70    |
| $M_0$ ( $m^4/s^2$ )                      | 16,94   |
| $J_0$ ( $m^4/s^2$ )                      | -0,616  |
| $L_Q$ (m)                                | 0,66    |
| $L_M$ (m)                                | 10,64   |

## CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES REJETS DE SAUMURE DE LA STATION DE FOUKA 1 ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'EFFLUENT

|                |       |
|----------------|-------|
| $Z_{\max}$ (m) | 11,74 |
| $X_{\max}$ (m) | 17,09 |
| $Fr_0$         | 15,27 |
| $g'$ (m/s)     | 0,217 |

Le système d'évacuation des rejets de la station de dessalement d'eau de mer de Fouka 1, présente une différence de densité de 2,22% entre la saumure (1048,56 kg/m<sup>3</sup>) et l'eau de mer ambiante (1025,80 kg/m<sup>3</sup>). Ceci génère comme attendu un rejet à flottabilité négative ( $J_0 = -0,616$ ) qui aura tendance à descendre vers le fond marin plutôt qu'à s'élever en surface.

En se basant sur le nombre de Froude ; assez élevé (15,27), ce système est optimal pour la dilution car il maximise l'entraînement d'eau ambiante avant la descente du panache.

La Figure 68 illustre les trajectoires du jet de saumure pour différents angles de rejet, mettant en évidence l'impact de l'angle sur la forme du panache.

La Figure 69 présente quant à elle une analyse quantitative des paramètres clés du jet ; à savoir la portée horizontale maximale ( $X_{\max}$ ), la hauteur maximale ( $Z_{\max}$ ) et la zone d'influence, en fonction de l'angle de décharge.

Les valeurs de ces paramètres relatifs au comportement du jet de saumure sont résumées dans le Tableau 25.

**Tableau 26:** Paramètres caractéristiques du jet de saumure ( $Z_{\max}$ ,  $X_{\max}$ ,  $Z/X$ , zone d'influence) en fonction de l'angle de rejet

| Angle (°) | $Z_{\max}$ (m) | $X_{\max}$ (m) | $Z/X$ | Zone d'influence (ha) | Type de trajectoire   |
|-----------|----------------|----------------|-------|-----------------------|-----------------------|
| 10        | 2,72           | 61,77          | 0,044 | 1,20                  | Très plate            |
| 20        | 2,32           | 11,61          | 0,2   | 0,04                  | Allongée              |
| 30        | 22,58          | 156,42         | 0,144 | 7,69                  | Allongée              |
| 45        | 45,15          | 180,62         | 0,250 | 10,25                 | Optimale (portée max) |
| 54        | 11,74          | 17,09          | 0,687 | 0,09                  | Élevée                |
| 60        | 67,73          | 156,42         | 0,433 | 7,69                  | Élevée                |
| 70        | 79,74          | 116,10         | 0,687 | 4,23                  | Quasi-verticale       |

L'analyse comparative des trajectoires du jet de saumure pour les différentes configurations d'angles de rejet (Figure 68) nous indique que pour un angle  $\theta$  égale à 10° ; la trajectoire illustre un rejet à faible angle. Le jet reste très proche du niveau de rejet initial ( $z = 0$ ) et parcourt une distance horizontale importante avant de retomber ce qui peut limiter la dilution initiale.

Pour un angle de 20° l'élévation est insuffisante (2,32 m vs 11,74 m pour 54°). Ceci ne permet pas d'assurer une dilution initiale adéquate. Et le rapport  $Z/X$  de 0,200 indique une trajectoire

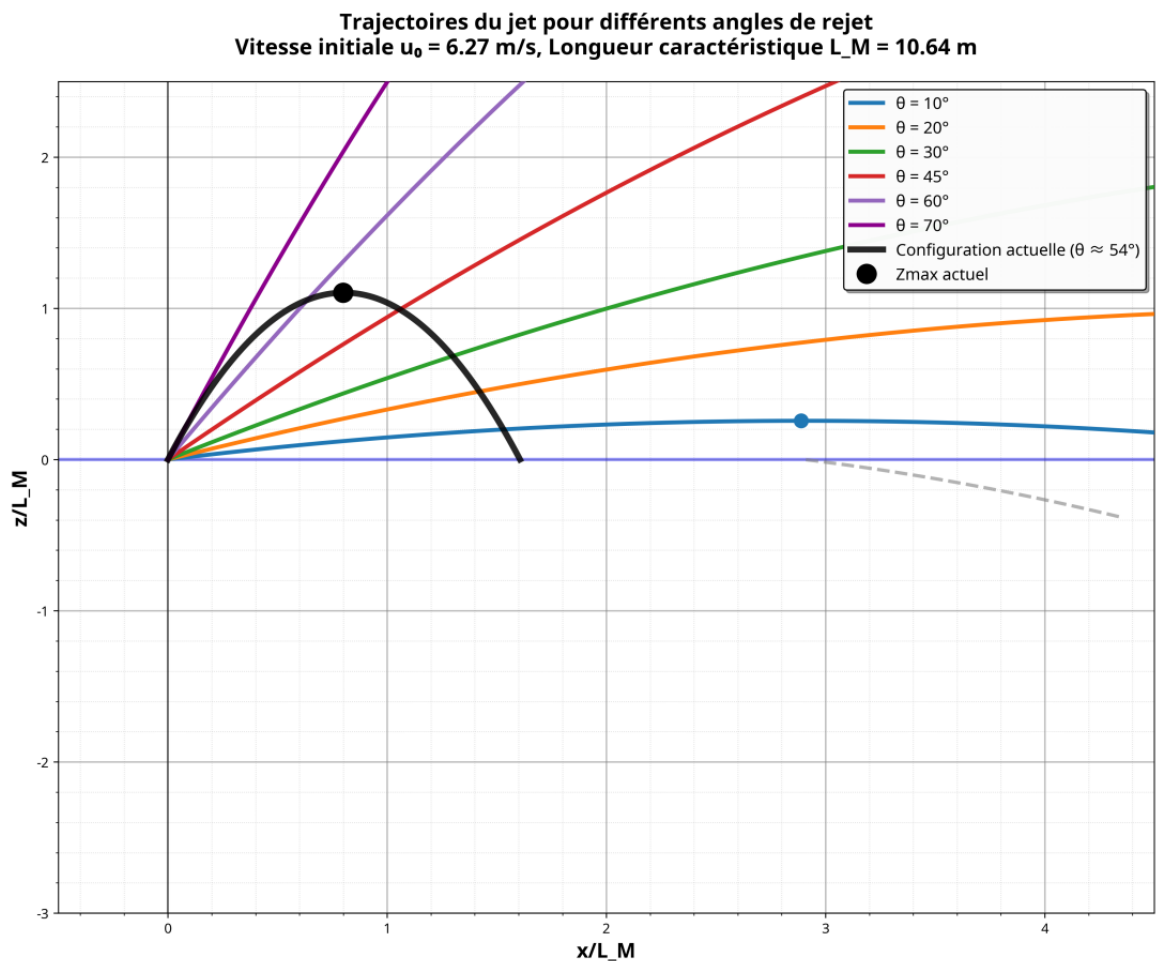
## CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES REJETS DE SAUMURE DE LA STATION DE FOUKA 1 ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'EFFLUENT

plus au moins allongée qui privilégie la dispersion horizontale au détriment de la dilution verticale. Donc inadapté pour les rejets de saumure denses nécessitant un temps de mélange important.

Pour un angle  $\theta$  égale à  $45^\circ$  ; la trajectoire est parabolique et maximise la portée horizontale. Néanmoins, elle sort du cadre du graphique ( $x/L_M > 4,5$ ), illustrant visuellement la portée excessive de cette configuration. Alors que pour un angle  $\theta$  égale à  $54^\circ$  ; la trajectoire est légèrement élevée et peut favoriser la dilution. De plus la zone d'influence est de l'ordre de 10ha.

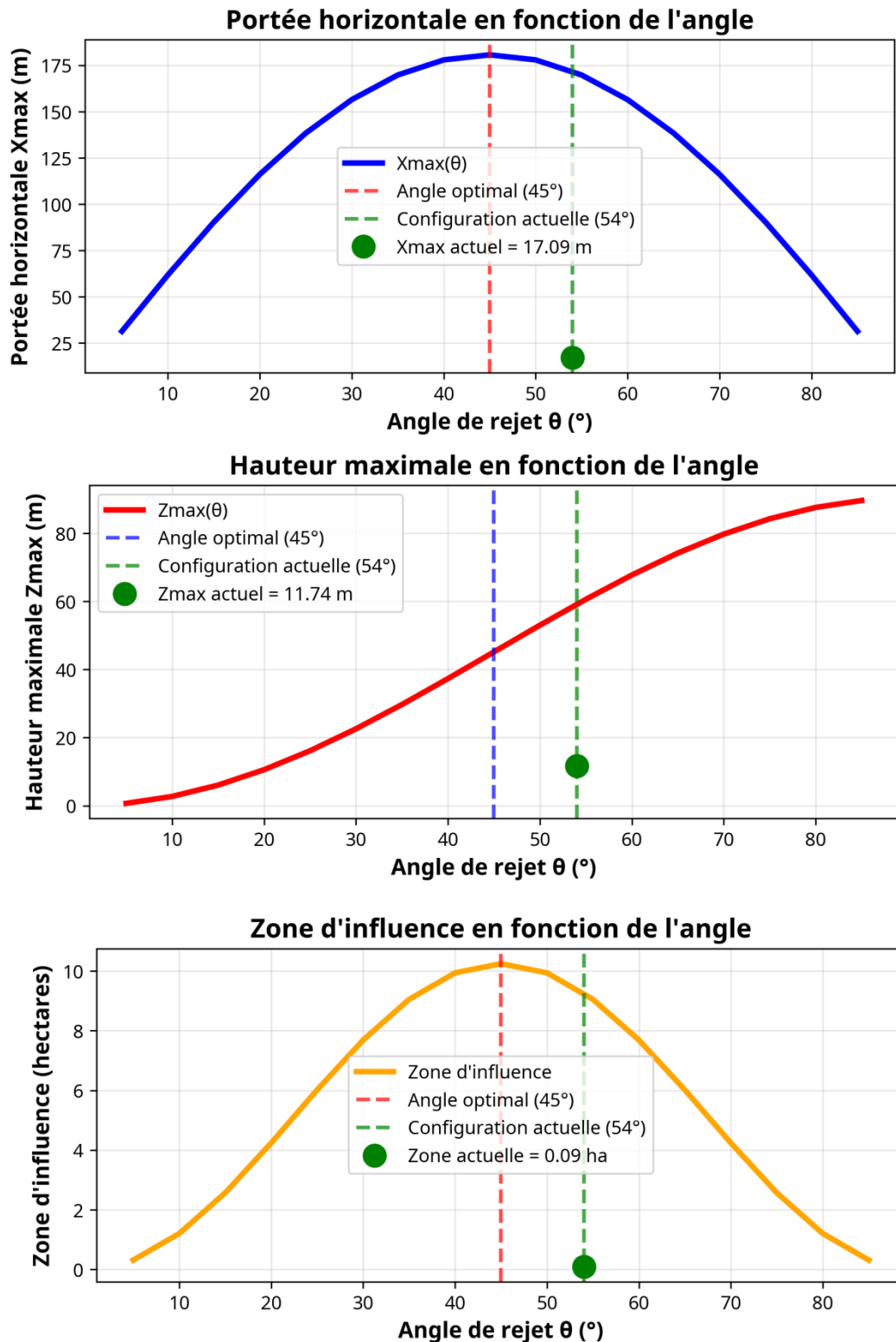
La configuration optimale nommée actuelle suggère un angle de  $54^\circ$  qui favorise l'élévation et donc le temps de mélange et la zone d'influence est de 0,09 ha.

L'angle de  $70^\circ$  est théoriquement intéressant pour maximiser la dilution où l'élévation est maximale (temps de mélange important). Sa trajectoire est la plus élevée de toutes, montrant une ascension quasi-verticale. La zone d'influence y est réduite, mais cette configuration est impraticable en réalité en raison des contraintes de profondeur et de la trajectoire quasi-verticale.



**Figure 68 :** Trajectoires d'un jet de saumure pour différents angles de rejet

# CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES REJETS DE SAUMURE DE LA STATION DE FOUKA 1 ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'EFFLUENT



**Figure 69 :** Évolution de la portée horizontale  $X_{max}$  (a), de la hauteur maximale  $Z_{max}$  (b), et de la zone d'influence (c) en fonction de l'angle

## **CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES REJETS DE SAUMURE DE LA STATION DE FOUKA 1 ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'EFFLUENT**

L'analyse de la Figure 69 en plus des informations citées précédemment, nous indique que l'angle de 54° illustre le meilleur compromis pour les rejets denses comme la saumure ; en raison d'une :

- élévation suffisante ( $Z_{\max} = 11,74$  m) ; qui favorise la dilution initiale (temps de mélange important) ;
- portée maîtrisée ( $X_{\max} = 17,09$  m) limite la zone d'influence à moins de 0,1 ha, facilitant la surveillance ;
- compatibilité avec les contraintes ; la hauteur de 11,74 m est compatible avec des profondeurs d'eau de 15-20 m (Jenkins et al., 2012) ;
- et un rapport  $Z/X$  équilibré de 0,687 qui indique une trajectoire légèrement élevée, priorisant la dilution sur la portée.

### **4.2. Analyse des résultats de simulation**

Une analyse approfondie de la dispersion de la saumure de la station de dessalement de Fouka 1 a été réalisée dans cette partie. L'analyse s'appuie sur les résultats de simulations à l'aide du logiciel CORMIX, afin d'évaluer l'influence de la vitesse du courant ambiant, du nombre de diffuseurs et de l'angle de rejet sur l'efficacité de la dilution. L'étude couvre deux zones distinctes : le champ proche (0-25 m) où la dilution initiale est cruciale, et le champ lointain (0-500 m) où la dispersion secondaire se produit.

#### **4.2.1. Dilution en champ proche selon la vitesse du courant**

L'évolution de la salinité en fonction de la distance depuis le point de rejet dans la zone de mélange initial (0-25 m), pour quatre scénarios de vitesse de courant ambiant est présentée dans la Figure 70.

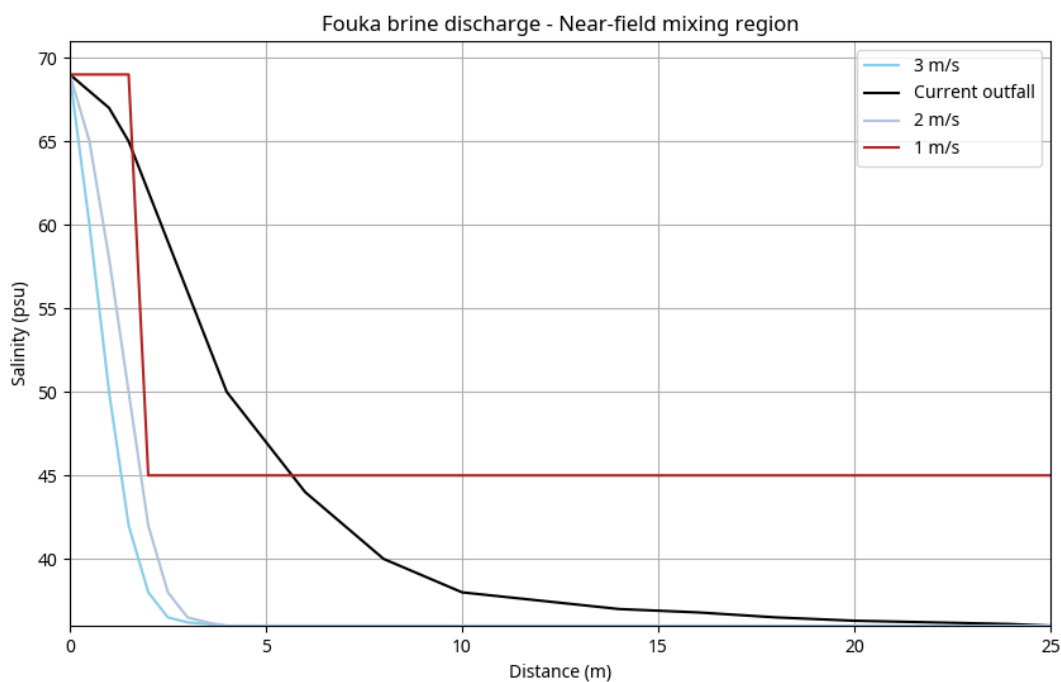
En conditions de courant fort (3 m/s) la dilution est quasi-immédiate et extrêmement efficace. La salinité chute de manière très abrupte depuis la valeur initiale de 69 psu (saumure) jusqu'à environ 36 psu (salinité ambiante de l'eau de mer) en moins de 5 mètres. Au-delà de 5 mètres, la salinité se stabilise complètement à la valeur ambiante, indiquant que le mélange est totalement achevé dans la zone de mélange initial.

En conditions de courant modéré (2 m/s), la dilution est rapide et satisfaisante. La salinité décroît progressivement de 69 psu à 36 psu en 7-8 mètres avec une zone d'impact limitée à moins de 10 mètres.

## CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES REJETS DE SAUMURE DE LA STATION DE FOUKA 1 ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'EFFLUENT

La configuration actuelle présente une dilution intermédiaire mais insuffisante. La salinité décroît progressivement de 69 psu à 37-38 psu à 10 m, puis à 36,5 psu à 25 m, sans atteindre complètement la salinité ambiante dans la zone de champ proche. Cette performance peu optimale est probablement due au courant modéré (2,2 m/s) et à la conception inadéquate (nombre de diffuseurs insuffisant ou angle de rejet inadapté).

En conditions de courant faible (1 m/s), la dilution est lente et très insuffisante. La salinité chute de 69 psu à 45 psu dans les 2 premiers mètres grâce à la turbulence du jet, puis stagne à ce niveau élevé sur toute la zone de champ proche (jusqu'à 25 m).



**Figure 70 :** Évolution de la salinité en fonction de la distance en champ proche selon la vitesse du courant ambiant

### 4.2.2. Dilution en champ proche selon le nombre de diffuseurs

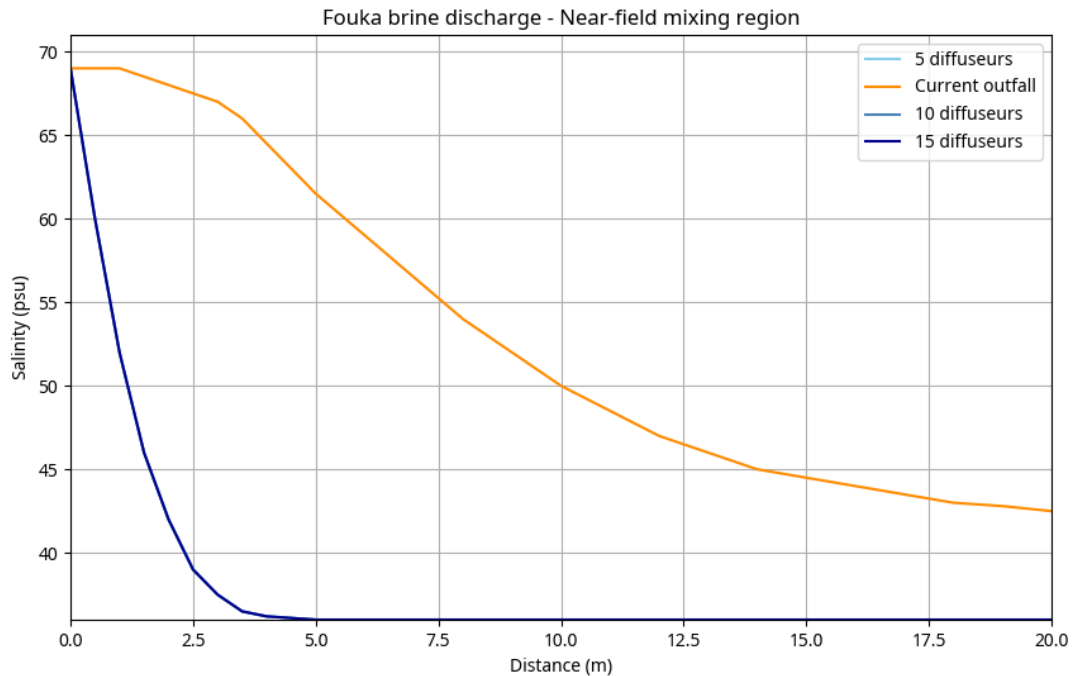
L'analyse de l'influence du nombre de diffuseurs sur l'efficacité de la dilution en champ proche (0-20 m), en comparant quatre configurations : 5, 10, 15 diffuseurs et la configuration actuelle (Figure 80) nous indique que les configurations optimisées présentent des performances quasi-identiques et excellentes en termes de dilution. La salinité chute de manière très abrupte de 69 psu (saumure pure) à environ 36 psu (salinité ambiante) en moins de 5 mètres pour les trois scénarios. Cependant, il existe un effet de saturation au-delà de 5 diffuseurs.

Contrairement à la configuration actuelle, la dilution est lente et très insuffisante. La salinité



## CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES REJETS DE SAUMURE DE LA STATION DE FOUKA 1 ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'EFFLUENT

décroît progressivement de 69 psu à environ 42,5 psu à 20 mètres, La courbe (Figure 71) présente une pente beaucoup plus faible que les configurations optimisées, indiquant un mélange beaucoup moins efficace et une zone d'impact étendue.

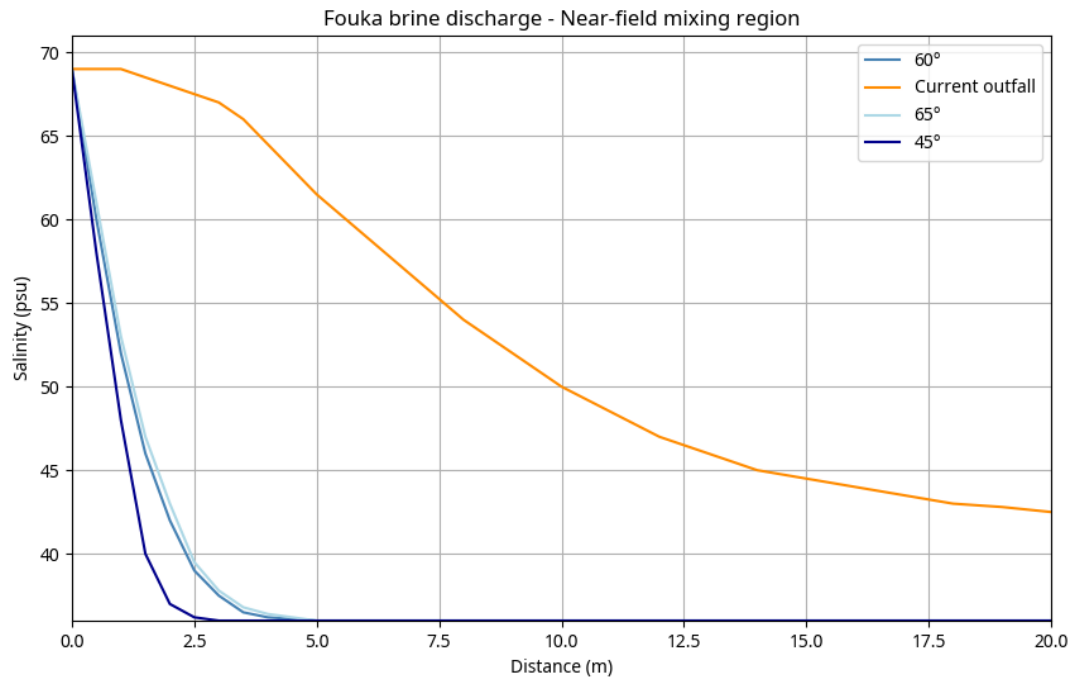


**Figure 131 :** *Évolution de la salinité en fonction de la distance en champ proche selon le nombre de diffuseurs*

### 4.2.3. Dilution en champ proche selon l'angle de rejet

L'analyse de l'influence de l'angle de rejet sur l'efficacité de la dilution en champ proche (0-20 m), en comparant quatre configurations : 45°, 60°, 65° et la configuration proposée (Figure 72) a montré que pour les trois configurations optimisées (45°, 60°, 65°), la salinité chute de 69 psu à 36 psu en moins de 5 mètres, avec une légère préférence pour l'angle de 45° (optimal théorique) dans les tout premiers mètres. Ces angles permettent au jet de s'élever suffisamment dans la colonne d'eau, prolongeant le temps de résidence dans la zone de mélange turbulent et favorisant l'entraînement d'eau ambiante. En revanche, la configuration actuelle présente une performance nettement inférieure (42,5 psu à 20 m), suggérant un angle trop faible (<30°) qui limite l'élévation du jet et réduit considérablement l'efficacité du mélange.

## CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES REJETS DE SAUMURE DE LA STATION DE FOUKA 1 ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'EFFLUENT



**Figure 72 :** *Évolution de la salinité en fonction de la distance en champ proche selon l'angle de rejet*

### 4.2.4. Dilution en champ lointain selon la vitesse du courant

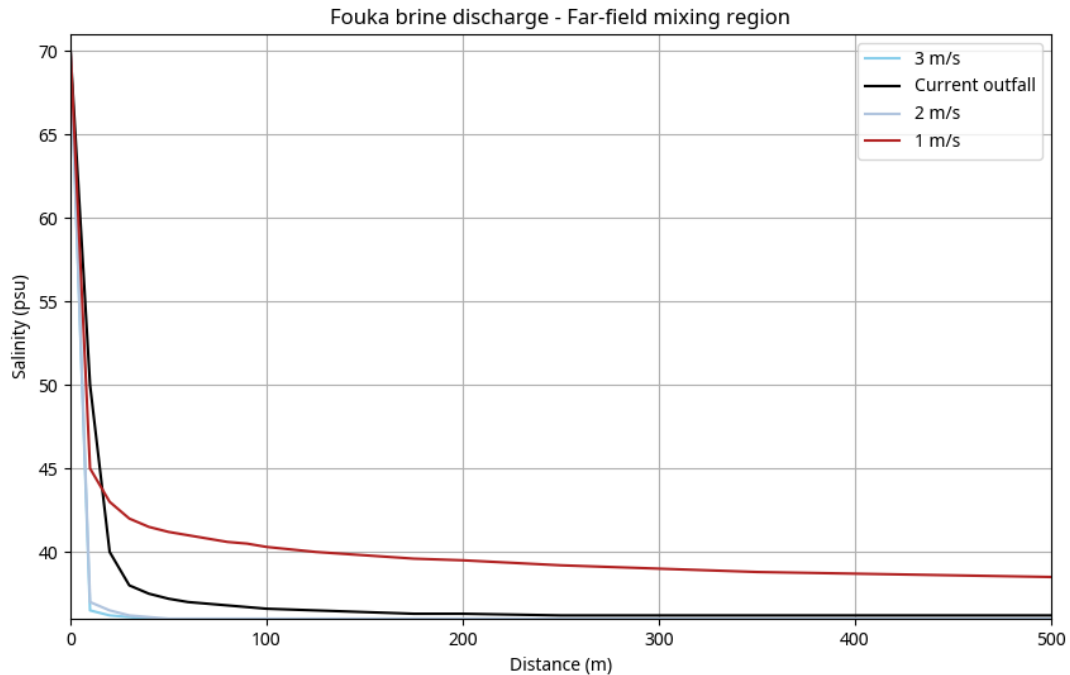
À partir de la Figure 73 nous allons évaluer la persistance de l'influence du rejet sur de plus grandes distances.

En conditions de courant fort (3 m/s), la dilution est complète et immédiate. La salinité atteint la valeur ambiante de 36 psu en moins de 50 mètres et reste parfaitement stable sur toute la zone de champ lointain (jusqu'à 500 m), indiquant l'absence totale d'influence du rejet au-delà de cette distance.

La configuration actuelle génère une dilution en champ lointain progressive et complète, la salinité décroît de 38 psu (à 25 m) à 36 psu à environ 150 mètres. La zone d'influence s'étend donc sur 150 mètres, ce qui est significatif et pourrait affecter des écosystèmes sensibles.

Pour un courant faible (1 m/s) la dilution en champ lointain est lente et incomplète, la salinité décroît très progressivement de 45 psu (à 25 m) à environ 38,5 psu à 500 mètres, sans jamais se stabiliser complètement à la valeur ambiante. Cette persistance d'une salinité supérieure de +7% à l'ambiant (38,5 vs 36 psu) même à 500 m indique une influence étendue du rejet et constitue un risque critique d'impacts chroniques sur les écosystèmes marins.

## CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES REJETS DE SAUMURE DE LA STATION DE FOUKA 1 ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'EFFLUENT



**Figure 73 :** *Évolution de la salinité en fonction de la distance en champ lointain selon la vitesse du courant ambiant porté*

### 4.3. Optimisation de l'émissaire

L'analyse des données fournies révèle un paradoxe entre les paramètres de conception théoriques du système de rejet et ses performances de dilution simulées.

La configuration proposée est définie par :

- un angle de rejet de 45°, considéré comme un "meilleur compromis" théorique.
- un nombre de Froude élevé (15,27), indiquant un régime de jet supercritique favorable à un mélange intense.

Théoriquement, ces paramètres devraient garantir une dilution efficace avec une zone d'influence très limitée (0,09 ha). Cependant, les simulations CORMIX démontrent une réalité très différente :

- dilution en champ proche insuffisante ; la salinité reste élevée (42,5 psu à 20 m).
- zone d'influence en champ lointain étendue ; le panache de saumure s'étend sur 150 mètres avant d'atteindre une dilution complète.
- vulnérabilité critique aux courants faibles ; en conditions de courant de 1 m/s, la dilution est incomplète même à 500 m.

## **CHAPITRE IV : MODÉLISATION DES REJETS DE SAUMURE DE LA STATION DE FOUKA 1 ET ANALYSE DE LA PERFORMANCE DE L'EFFLUENT**

Pour améliorer le système de rejet, nous proposons :

- d'augmenter le nombre de diffuseurs à 5 ; ceci permettrait de réduire la zone d'impact en champ proche de >95% (de 20-25 m à < 5 m).
- Optimiser l'angle de rejet, celui de 54° semble intéressant.
- Favoriser l'élévation du jet pour maximiser le temps de mélange.
- réévaluer l'emplacement du rejet et tenter d'identifier des emplacements alternatifs plus éloignés du rivage, offrant une profondeur supérieure et des conditions de courant plus favorables à la dispersion de la saumure.
- Explorer des technologies de valorisation de la saumure (extraction de minéraux, production de sel).

## ***CONCLUSION***

## CONCLUSION

En conclusion, il est essentiel de rappeler notre objectif principal : analyser les caractéristiques des rejets des stations de dessalement, évaluer et déterminer les impacts de ces installations sur l'écosystème marin local.

Il convient de préciser encore une fois que la sélection des sites, le choix des stations d'échantillonnage et les paramètres mesurés ont été guidés par des impératifs d'accessibilité, de faisabilité technique et, surtout, par la disponibilité des données. Bien que cette étude présente certaines limites, elle pose des bases solides et constituera un point de départ pertinent pour les travaux à venir.

Ainsi, les résultats se structurent autour de trois parties principales : la première concerne la caractérisation des rejets de saumure. Ces derniers ont une salinité élevée qui peut atteindre jusqu'à de 61 psu pour la station monobloc de Palm-Beach et 69 psu pour la méga-station de Fouka 1.

La conductivité est proportionnelle à la salinité, et peut atteindre une valeur de 79 mS/cm.

Les résultats révèlent des concentrations élevées en chlorures et solides dissous totaux (TDS).

La température, matières en suspension, matières organiques, sels nutritifs, et turbidité varient en fonction de l'état de fonctionnement de la station de Palm-Beach.

La deuxième partie porte sur la qualité du milieu marin récepteur.

Dans le cas de la station de Palm-Beach, l'étude a montré :

- variations de température entre la saumure et l'eau d'alimentation selon le fonctionnement de la station ;
- gradient de salinité observable jusqu'à plusieurs dizaines de mètres du point de rejet ;
- modification des communautés phytoplanctoniques dans la zone d'influence ;
- diversité et abondance des espèces affectées par l'hypersalinité (les Dinoflagellés plus abondants que les Diatomées) ;
- présence d'espèces indicatrices de stress environnemental ;
- Le dépassement des normes impératives en Streptocoques Fécaux témoigne d'une contamination fécale sensible et persistante dans la saumure ;
- impact détectable sur une zone étendue en raison de l'absence de système de dispersion optimisé.

Pour l'installation de Fouka 1, l'étude a révélé :

- **Analyses statistiques** : Les données collectées ont été interprétées à l'aide de logiciels statistiques tels qu'Excel, XLSTAT (version 2010.3) et R (version 4.2.1). Ces analyses ont servi à identifier les tendances, les corrélations et les différences significatives entre les différents points de mesure et les conditions de fonctionnement des stations.
- Gradient de salinité fonction de la distance au point de rejet et des conditions hydrodynamiques.
- L'analyse en Composantes Principales a révélé de fortes corrélations entre paramètres liés à la salinité, que les paramètres discriminants étaient : la salinité, la conductivité, les chlorures, et les TDS.
- Séparation nette entre stations impactées et stations de référence grâce à la Classification Hiérarchique, et qui permet de regrouper les stations selon leur degré d'exposition aux rejets.

La troisième partie quant à elle était dédiée à la modélisation du comportement de la saumure.

Les simulations ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- Dilution en champ proche insuffisante (42,5 psu à 20 m).
- Zone d'influence étendue sur 150 mètres.
- Vulnérabilité critique aux courants faibles.
- Nombre de diffuseurs insuffisant.
- Emplacement de l'émissaire trop proche de la côte.
- Profondeur limitée pour la dilution verticale.
- Configuration réelle différente de la conception théorique.

En gros le système de rejet de la station de dessalement d'eau de mer de Fouka 1 est situé près de la côte, où les courants peuvent être moins intenses et plus variables et où les faibles profondeurs peuvent limiter la dilution verticale du panache. Pour un site à courants variables ou faibles, il est impératif d'optimiser la conception du rejet (augmentation du nombre de diffuseurs, ajustement de l'angle) pour assurer une dilution efficace même dans les conditions les plus défavorables.

Les résultats de ce travail ont clairement démontré que la saumure générée des installations de dessalement par osmose inverse constitue un risque environnemental pour les écosystèmes marins, et ils soulignent l'importance d'adopter une approche intégrée pour la gestion de ce type de rejets. Cette approche est indispensable pour concilier la sécurité hydrique et la protection de l'environnement marin, et doit s'articuler autour de trois piliers :

- Une surveillance continue de la qualité de l'eau.
- Une modélisation plus approfondie du comportement de la saumure en faisant appel à des modèles hydrodynamiques 3D (tels que Delft3D, ROMS ou MIKE 3) qui permettent d'intégrer des variables complexes comme les courants et les conditions ambiantes.
- Une optimisation constante des systèmes de rejet.

Enfin, face à l'expansion des installations de dessalement en Algérie, il est impératif d'intégrer les considérations environnementales dès la conception des nouvelles unités et d'optimiser les stations existantes pour minimiser leur empreinte écologique.

Perspectives de recherche future :

- Définir des mesures concrètes de suivi et d'optimisation adaptées aux résultats de l'étude ;
- Étude des impacts à long terme et des effets cumulatifs de ces deux cas d'études et de d'autres installations ;
- Inclure l'étude de la matrice sédimentaire et du biote ;
- Évaluation de l'impact sur la macrofaune benthique et les herbiers marins ;
- Intégrer l'analyse des éléments toxiques dans les travaux futurs ;
- Développement des technologies de traitement de la saumure ;
- Analyse coût-bénéfice des différentes options d'optimisation ;
- Tenter une approche intégrée combinant surveillance, modélisation et gestion adaptative pour concilier sécurité hydrique et protection de l'environnement marin ;
- Définir des seuils d'acceptabilité pour les paramètres clés (salinité, produits chimiques) ;
- Établir des normes nationales pour les rejets de saumure ;
- Promouvoir l'efficacité énergétique et la réduction des volumes de rejet.



***RÉFÉRENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES***

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adem, A.A., Bachari, F.H., Hamdi, B., Belkacem, Y., Bachari, N.E.I. (2023).** Assessment of coastal water characteristics near brine discharge sites by applying multivariate statistical techniques and GIS, case study from BouIsmaïl Bay, Algeria. *Model. Earth Syst. Environ.* 2030. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01871-7>
- Afsharian, S., Khedri, P., Valinassab, T. (2022).** Spatial and temporal variation of physicochemical parameters in northern Persian Gulf. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 19, 1121–1130. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03187-4>
- Aguirre, J.C., Sarasate, J.V., Correa, M.D.A., Piedeleu, M. (2012).** NOTA TÉCNICA-Reparación del emisario de Las Palmas de Gran Canaria. Parte II: simulaciones de vertido. *Rev. Paralia* 5, 1–7.
- Ailane, F., Kassar, A., Hemida, F. (2021).** Growth and mortality of *Serranus cabrilla* (Linnaeus, 1758)(Actinopterygii: Perciformes: Serranidae) from Bou Ismaïl Bay, off Algeria, south-western Mediterranean. *Indian J Fish* 68, 1–7.
- Aimar, P., Bacchin, P., et Maurel, A. (2010).** Filtration membranaire (OI, NF, UF, MFT)-Aspects théoriques : perméabilité et sélectivité. Editions TII Techniques de l'Ingénieur
- Ait Younes, C., Akarkar, L. (2022).** Suivi du procédé de dessalement de l' eau de mer à la station Palm Beach de Staouali et évaluation de sa qualité physico-chimique et bactériologique. Mémoire de Master, Eau et Environnement. Tizi Ouzou: Université Mouloud Mammerie, 76 p.
- Fodhil, F., Bessenasse, M., & Cherrar, I. (2019).** Feasibility study of grid-connected photovoltaic system for seawater desalination station in Algeria. *Desalination and Water Treatment*, 165, 35-44. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24350>
- Alameddine, I., El-Fadel, M. (2007).** Brine discharge from desalination plants: a modeling approach to an optimized outfall design. *Desalination* 214, 241–260. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.103>
- Alkaisi, A., Mossad, R., Sharifian-Barforoush, A. (2017).** A Review of the Water Desalination Systems Integrated with Renewable Energy. *Energy Procedia* 110, 268–274. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.138>
- Almasoud, F.I., Usman, A.R., Al-Farraj, A.S. (2015).** Heavy metals in the soils of the Arabian Gulf coast affected by industrial activities: analysis and assessment using enrichment factor and multivariate analysis. *Arab. J. Geosci.* 8, 1691–1703. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1298-x>
- Al-Mutairi, N., Abahussain, A., El-Battay, A.(2014).** Spatial and temporal characterizations of water quality in Kuwait Bay. *Mar. Pollut. Bull.* 83, 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.04.009>

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Al-Mutaz, I.S. (1991).** Environmental impact of seawater desalination plants. *Environ. Monit. Assess.* 16, 75–84. <https://doi.org/10.1007/BF00399594>
- Alshahri, F. (2017).** Heavy metal contamination in sand and sediments near to disposal site of reject brine from desalination plant, Arabian Gulf: Assessment of environmental pollution. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 1821–1831. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7961-x>
- Amarouche, K., Akpınar, A., Bachari, N.E.I., Çakmak, R.E., Houma, F. (2019).** Evaluation of a high-resolution wave hindcast model SWAN for the West Mediterranean basin. *Appl. Ocean Res.* 84, 225–241. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.01.014>
- Aminot, A., Chaussepied, M. (1983).** Manuel des Analyses Chimiques en Milieu Marin. 1<sup>er</sup> ed. Brest Cedex Cent. Natl. Pour L'Exploitation Océans CNEXO.
- Aminot, A., Kérouel, R. (2007).** Dosage automatique des nutriments dans les eaux marines: méthodes en flux continu. Editions Quae.
- Amitouche, M., Lefkir, A., Remini, B., Meradji, H., Mokhtari, O. (2017).** Rejets Chimiques Des Stations De Dessalement En. *Larhyss J.* 199–211.
- Ammour, F., Chekroud, R., Houli, S., Kettab, A. (2018).** Performance Evaluation of SWRO Desalination Plant at Skikda (Algeria). *Exergy Better Environ. Improv. Sustain.* 2 Appl. 1131–1138.
- Amokrane, M., Salmi, A. (2021).** Surface spreading of the brine discharge from the seawater reverse osmosis plants: Hamma Water Desalination plant in Algeria 222, 81–91. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27103>
- Angelakis, A.N., Valipour, M., Choo, K.H., Ahmed, A.T., Baba, A., Kumar, R., Toor, G.S., Wang, Z. (2021).** Desalination: From ancient to present and future. *Water Switz.* 13. <https://doi.org/10.3390/w13162222>
- Asala, A.F.M.K., Eisa, K.T.H., Abdelhameed, I.M. (2022).** Environmental impact of seawater desalination processes in china - a review 49, 825–839.
- Aziz, N.I.H.A., Hanafiah, M.M. (2021).** Application of life cycle assessment for desalination: Progress, challenges and future directions. *Environ. Pollut.* 268. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115948>
- Baalousha, H.M. (2016).** The potential of using beach wells for reverse osmosis desalination in Qatar. *Model. Earth Syst. Environ.* 2, 1–12.
- Bachari Houma, F. (2009).** Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire. Thèse de doctorat d'état. Université Paris-Est (Créteil): 232 p.
- Bakalem, A., Hassam, N., Oulmi, Y., Martinez, M., Dauvin, J.C. (2020).** Diversity and geographical distribution of soft-bottom macrobenthos in the bay of Bou Ismail (Algeria,

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Mediterranean Sea). *Reg. Stud. Mar. Sci.* 33, 100938. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100938>
- Bashithalshaer, R. (2009).** Worldwide Oil Prize , Desalination and Population Growth Correlation Study. *Vatten Tidskr. För Vattenvård J. Water Manag. Res.* 65(1), 37–46.
- Belatoui, A., Bouabessalam, H., Hacene, O.R., De-La-Ossa-Carretero, J.A., Martinez-Garcia, E., Sanchez-Lizaso, J.L. (2017).** Environmental effects of brine discharge from two desalination plants in Algeria (South Western Mediterranean). *Desalination Water Treat.* 76, 311–318. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20812>
- Belhouchet, N., Inal, A., Nait-Mohand, H., Belkacem, Y., Chenchouni, H. (2024).** Assessment of pollutants in coastal waters, sediments, and biota of marine ecosystems in Algeria, North Africa. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 70, 103355.
- Belhout, D., Belgroun, Z., Abbas, M., Tigrine, Z., Djilali, et T. (2018).** Approaches and Processes for Recovering Reverse Osmosis Discharges from Desalination Plants. 2018 6th Int. Renew. Sustain. Energy Conf. IRSEC 2018, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2018.8702276>
- Belkacem, Y., Benfares, R., Adem, A., & Bachari, H. (2017).** Evaluation of the Impact of the Desalination Plant on the Marine Environment: Case Study in Algeria. *Larhyss J.* 30, 317–331.
- Bello, A.S., Zouari, N., Da'ana, D.A., Hahladakis, J.N., Al-Ghouti, M.A. (2021).** An overview of brine management: Emerging desalination technologies, life cycle assessment, and metal recovery methodologies. *J. Environ. Manage.* 288, 112358. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112358>
- Benaissa, M., Rouane-Hacene, O., Boutiba, Z., Guibbolini-Sabatier, M.E., Faverney, C.R. De. (2017).** Ecotoxicological impact assessment of the brine discharges from a desalination plant in the marine waters of the Algerian west coast, using a multibiomarker approach in a limpet, *Patella rustica*. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 24521–24532. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0081-4>
- Benaissa, M., Rouane-Hacene, O., Boutiba, Z., Habib, D., Guibbolini-Sabatier, M.E., Risso-De Faverney, C. (2020).** Ecotoxicological effects assessment of brine discharge from desalination reverse osmosis plant in Algeria (South Western Mediterranean). *Reg. Stud. Mar. Sci.* 39, 101407. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101407>
- Bencheikh, Z., Refes, W., Brito, P.M., Prodocimo, M.M., Gusso-Choueri, P.K., Choueri, R.B., de Oliveira Ribeiro, C.A. (2022).** Chemical pollution impairs the health of fish species and fishery activities along the Algeria coastline, Mediterranean Sea. *Environ. Monit. Assess.* 194, 497.
- Benhalima, M., Baha, M., Boulahdid, M., Inal, A. (2024).** Nutrient level in Algerian coastal waters: Algiers, Bou-Ismaïl and Zemmouri bays. *OCEANOGRAPHIA* 25.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Berland, J.-M., Juery, C. (2002).** Les procédés membranaires pour le traitement de l'eau. Doc. Tech. FNDAE 14.
- Bessenasse, M., Kettab, A., & Moulla, A. S. (2010).** Seawater desalination : Study of three coastal stations in Algiers region. *Desalination* 250, 423–427. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.09.069>
- Bleninger, T., Niepelt, A., & Jirka, G. (2010).** Desalination plant discharge calculator. *Desalination Water Treat.* 13, 156–173.
- Bleninger, T., Niepelt, A., Jirka, G.H., Lattemann, S., Purnama, A., Al-Barwani, H.H., Doneker, R.L. (2010).** Environmental hydraulics framework of the design of discharges from desalination plants. *Environ. Hydraul. - Proc. 6th Int. Symp. Environ. Hydraul.* 1, 571–576. <https://doi.org/10.1201/b10553-92>
- Bombar, G., Dölgen, D., Alpaslan, M.N. (2016).** Environmental impacts and impact mitigation plans for desalination facilities. *Desalination Water Treat.* 57, 11528–11539.
- Bounifa, M., Lakhdari, K.E. (2015).** Impact des rejets de dessalement sur la qualité des eaux de mer (cas des trois stations : Cap Djenat, El Hamma, et Fouka). Mémoire d'ingénieur en Sciences de la Mer, Environnement. ENSSMAL (Alger) : 82 p.
- Brahimi, M., Dine, N. (2018).** Conception et dimensionnement de la station de dessalement d'eau de mer de Fouka. Mémoire de Master, ingénierie des eaux. USTHB, (Alger): 133 p.
- Brierley, B., Carvalho, L., Davies, S., Krokowski, J. (2007).** Guidance on the quantitative analysis of phytoplankton in Freshwater Samples. Report to SNIFFER (Project WFD80), Edinburgh, December 2007.
- Brika, B., Omran, A.A., Dia Addien, O. (2016).** Chemical elements of brine discharge from operational Tajoura reverse osmosis desalination plant. *Desalination Water Treat.* 57, 5345–5349. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.1003330>
- Cambridge, M.L., Zavala-Perez, A., Cawthray, G.R., Mondon, J., Kendrick, G.A. (2017).** Effects of high salinity from desalination brine on growth, photosynthesis, water relations and osmolyte concentrations of seagrass *Posidonia australis*. *Mar. Pollut. Bull.* 115, 252–260. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.066>
- Chaufer, B., Mereilles-Masbernart, M., Aimar, P. (1998).** Présentation des membranes in: Les séparations par membrane dans les procédés de l'industrie alimentaire. Daufin G René F Aimar P Paris Lavoisier-Tec Doc 41–56.
- Cloern, J.E. (2001).** Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 210, 223–253.
- Cho, H., Lee, S., Choi, Y., Lee, S., & Kim, S. H. (2025).** *Analysis of Fouling in Hollow Fiber Membrane Distillation Modules for Desalination Brine Reduction.* **Membranes**, 15(12), 371.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Dach, H. (2008).** Comparison of nanofiltration and reverse osmosis processes for a selective desalination of brackish water feeds. Université d'Angers.
- Danis, P. (2003).** Dessalement de l'eau de mer. Ed. Techniques Ingénieur.
- Dawoud, M.A., Al Mulla, M.M. (2012).** Environmental impacts of seawater desalination: Arabian Gulf case study. *Int. J. Environ. Sustain.* 1, 22–37.
- De-la-Ossa-Carretero, J.A., Del-Pilar-Ruso, Y., Loya-Fernández, A., Ferrero-Vicente, L.M., Marco-Méndez, C., Martinez-Garcia, E., Sánchez-Lizaso, J.L. (2016).** Response of amphipod assemblages to desalination brine discharge: impact and recovery. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 172, 13–23.
- Díaz-Herrera, N., Esteban, O., Navarrete, M.C., Le Haitre, M., Gonzalez-Cano, A. (2006).** In situ salinity measurements in seawater with a fibre-optic probe. *Meas. Sci. Technol.* 17, 2227–2232. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/8/024>
- Dif, N., Moutarfi, S. (2018).** Optimisation de l'énergie électrique dans les stations de dessalement des eaux de mer par osmose inverse cas de la station Palm Beach. Mémoire de Master, Génie civil. Université Mouloud Mammeri (Tizi-Ouzou) : 67 p.
- Djahnit, N., Otmani, H., Lounas, R., Abd El Motaleb, A.Y. Ben, Chamma, N., DJERRA, N., Berkani, M. (2023).** Évaluation de la qualité microbienne de l'eau de mer et des moules d'une ferme conchylicole algérienne. *Geo-Eco-Mar.* 29, 39–50.
- Doneker, R.L., Jirka, G.H. (2007).** CORMIX user manual: A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters. US Environ. Prot. Agency Wash. DC.
- Drouiche, N., Ghaffour, N., Naceur, M.W., Lounici, H., Drouiche, M. (2012).** Towards sustainable water management in Algeria. *Desalination Water Treat.* 50, 272–284. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.719477>
- Drouiche, N., Villarreal, O.R., Ouali, S., Lebouachera, S.E.I., Soni, R. (2022).** Role of desalination technologies and water reuse in Water-Energy-Food nexus: an opportunity for Algeria. *Desalination Water Treat.* 261, 83–93.
- Dunglas, J. (2014).** Le dessalement de l'eau de mer une nouvelle méthode pour accroître la ressource en eau. *Académie D'agriculture Fr.* 10.
- Edler, L., Elbrächter, M. (2010).** The Utermöhl method for quantitative phytoplankton analysis. *Microsc. Mol. Methods Quant. Phytoplankton Anal.* 110, 13–20.
- Einav, R., Lokiec, F. (2003).** Environmental aspects of a desalination plant in Ashkelon. *Desalination* 156, 79–85. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00328-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00328-X)
- Eke, J., Yusuf, A., Giwa, A., Sodiq, A. (2020).** The global status of desalination: An assessment of current desalination technologies, plants and capacity. *Desalination* 495, 114633.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- El Amine, L. (2023).** Seawater Desalination in Algeria: A Comprehensive Assessment of its Viability as a Water Security Strategy. *Rev. Manag.* 10, 2023.
- Elamine, Z.B.M., Moudjeber, D.-E., Djennad, M., Mahmoudi, H., Goosen, M.F. (2022).** Coupling a brackish water greenhouse desalination system with membrane distillation for Southern Algeria. *DESALINATION WATER Treat.* 255, 229–235.
- Elimelech, M., Phillip, W.A. (2011).** The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science* 333, 712–717. <https://doi.org/10.1126/science.1200488>
- Elsaid, K., Kamil, M., Sayed, E.T., Abdelkareem, M.A., Wilberforce, T., Olabi, A. (2020).** Environmental impact of desalination technologies: A review. *Sci. Total Environ.* 748, 141528. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141528>
- Elsaie, Y., Soussa, H., Gado, M., Balah, A. (2022).** Water desalination in Egypt; literature review and assessment. *Ain Shams Eng. J.* 14, 101998. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101998>
- Fallatah, M.M., Kavil, Y.N., Ibrahim, A.S.A., Orif, M.I., Shaban, Y.A., Al Farawati, R. (2018).** Hydrographic parameters and distribution of dissolved Cu, Ni, Zn and nutrients near Jeddah desalination plant. *Open Chem.* 16, 245–257. <https://doi.org/10.1515/chem-2018-0029>
- Far, H.A., Hassani, A.H., Taghavi, L., Fazeli, M., Mehrabadi, A.R. (2022).** Electro dialysis reversal (EDR) performance for reject brine treatment of reverse osmosis desalination system. *PLoS ONE* 17, 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0273240>
- Farsi, A., Rosen, M.A. (2022).** Assessment of a geothermal combined system with an organic Rankine cycle and multi-effect distillation desalination. *Earth Syst. Environ.* 6, 15–27.
- Fawal, N. (2016).** Parametres Affectants Le Dessalement De L'Eau De Mer Par Osmose Inverse. Thèse de Doctorat d'état, Université de Lille(France) : 177 p.
- Farias, L., Martínez-López, N., García, M. R., Rode, M., Schäfer, R. B., & Yen Le, T. T. (2026).** Mechanistic prediction of dissolved oxygen concentrations in surface water considering the influence of salinity and temperature. *Hydrology Research*, 57(4), 643-675.
- Fernández-Torquemada, Y., Sola, I., Valle, C., & Sánchez-Lizaso, J. L. (2019).** *Long-term monitoring of the brine discharge from the Alicante desalination plant (SE Spain)*. Rapport de synthèse / Présentation scientifique - Département des Sciences Marines et de Biologie Appliquée, Université d'Alicante.
- Fernández-Torquemada, Y., González-Correa, J.M., Loya, A., Ferrero, L.M., Díaz-Valdés, M., Sánchez-Lizaso, J.L. (2009).** Dispersion of brine discharge from seawater reverse osmosis desalination plants. *Desalination Water Treat.* 5, 137–145.
- Fernández-Torquemada, Y., Luis Sánchez-Lizaso, J. (2007).** Monitoring of brine discharges from seawater desalination plants in the Mediterranean, *Int. J. Environment and Health*.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Fernández-Torquemada, Y., Sánchez-Lizaso, J.L., González-Correa, J.M. (2005).** Preliminary results of the monitoring of the brine discharge produced by the SWRO desalination plant of Alicante (SE Spain). *Desalination* 182, 395–402.
- Figarella et al, 2001. *Microbiologie générale et appliquée*. Ed. Jacques Lanore. 285p.
- Filali, B., Katteb, A., Bessenasse, M. (2018).** MODELLING AND DESIGN OF BRINE OUTFALL DISCHARGES: CASE OF A DESALINATION PLANT IN MEDITERRANEAN. *J. Ind. Pollut. Control* 34, 1862–1871.
- Fischer, H.B. ( 1979).** Mixing in inland and coastal waters. Academic press.
- Gaujous (1995).** La pollution des milieux aquatiques : aide mémoire .Ed. Technique et Document, Paris. 220 p.
- Gil Trujillo, A., Sadhwani Alonso, J.J. (2025).** Improvements in the design of brine diffusers in shallow waters: A numerical study applied to the Canary Islands. *Ain Shams Eng. J.* 16. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.103225>
- Guendouzi, Y., Boulahdid, M., Rouane Hacene, O., Inal, A., Boudjellal, B., Fowler, S.W., (2021).** Contamination level and ecological risk assessment of particulate trace metals in Southwestern Mediterranean Sea. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 46, 101876. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101876>
- Gupta, P., Arciniegas-Perez, M. D., & Barrios-Piña, H. A. (2025).** Impact of Brine Discharge from Desalination Plants on Marine Ecosystems: A Review. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 100693.
- Haied, N., Fougou, A., Khadri, S., Boussaid, A., Azlaoui, M., Bougherira, N. (2023).** Spatial and Temporal Assessment of Drought Hazard, Vulnerability and Risk in Three Different Climatic Zones in Algeria Using Two Commonly Used Meteorological Indices. *Sustain. Switz.* 15, 12–14. <https://doi.org/10.3390/su15107803>
- Hamiche, A. M., Stambouli, A. B., Flazi, S., & Tayeb, A. (2020).** Desalination in Algeria : Photovoltaic Power Plant for TMM ( Tahlyat Myah Magtaa ) of Oran as a Case Study. <https://doi.org/10.1007/698>
- Hamlat, A., et Guidoum, A. (2018).** Assessment of groundwater quality in a semiarid region of Northwestern Algeria using water quality index (WQI). *Appl. Water Sci.* 8, 220.
- Helstrup, T., Jørgensen, N.O., Banoeng-Yakubo, B. (2007).** Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater from the Cretaceous-Eocene limestone aquifer in southern Ghana and southern Togo using hierarchical cluster analysis. *Hydrogeol. J.* 15, 977–989. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0165-1>
- Hoepner, T., Lattemann, S. (2003).** Chemical impacts from seawater desalination plants—a case study of the northern Red Sea. *Desalination* 152, 133–140.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Hussain, M.I., Muscolo, A., Farooq, M., Ahmad, W. (2019).** Sustainable use and management of non-conventional water resources for rehabilitation of marginal lands in arid and semiarid environments. *Agric. Water Manag.* 221, 462–476. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.014>
- Idir, S. (2014).** Evaluation de l'impact de la station de dessalement de la région ouest algéroise (Palm Beach) sur le milieu marin. Mémoire d'ingénieur en Environnement. ENSSMAL, Alger : 62 p.
- Ihsanullah, I., Atieh, M.A., Sajid, M., Nazal, M.K. (2021).** Desalination and environment: A critical analysis of impacts, mitigation strategies, and greener desalination technologies. *Sci. Total Environ.* 780, 146585. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146585>
- Jenkins, S., Paduan, J., Roberts, P., Schlenk, D., Weis, J. (2012).** Management of brine discharges to coastal waters recommendations of a science advisory panel. Mesa CA USA South. Calif. Coast. Water Res. Proj. Costa.
- Jirka, G.H., Doneker, R.L., Hinton, S.W. (1996).** User's manual for CORMIX: A hydrodynamic mixing zone model and decision support system for pollutant discharges into surface waters. US Environmental Protection Agency, Office of Science and Technology.
- Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M.T.H., Smakhtin, V., Kang, S. mu. (2019).** The state of desalination and brine production: A global outlook. *Sci. Total Environ.* 657, 1343–1356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>
- JORA, Journal Officiel de la République Algérienne. (2009).** Décret exécutif n° 09-209 du 17 Joumada Ethania 1430 correspondant au 11 juin 2009 fixant les 5 modalités d'octroi de l'autorisation de déversement des eaux usées autres que domestiques dans un réseau public de d'assainissement ou dans une station d'épuration.
- JORA, Journal Officiel de la République Algérienne. (2006).** O Section 1, article 3.
- JORA, Journal Officiel de la République Algérienne. (1993).** Principaux critères de qualité des eaux de baignade. Extrait de l'annexe 1 du décret n° 93-164 du 10 juillet 1993. Techniques et Documentation. Paris .356 p.
- Kaab, I., Hama, N. (2023).** Suivi du procédé de dessalement de l'eau de mer de la station d'El Marsa et caractérisation des rejets de saumure. Mémoire d'ingénieur, Environnement marin et côtier. Alger: ENSSMAL, 59 p.
- Kassouar, S., Dergal, N.B., Abi-Ayad, S.-M.E.-A. (2024).** Monitoring of water quality generated by MSF and reverse osmosis at the Kahrama and Mactâa plants in West Algeria. *J. Surv. Fish. Sci.* 11, 124–133. <https://doi.org/10.53555/sfs.v11i3.2347>
- Kenigsberg, C., Abramovich, S., Hyams-Kaphzan, O. (2020).** The effect of long-term brine discharge from desalination plants on benthic foraminifera. *PLoS ONE* 15, 1–20. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227589>

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Kravchishina, M.D., Lein, A.Y., Sukhanova, I.N., Artem'ev, V.A., Novigatsky, A.N. (2015).** Genesis and spatial distribution of suspended particulate matter concentrations in the Kara Sea during maximum reduction of the Arctic ice sheet. *Oceanology* 55, 623–643. <https://doi.org/10.1134/S000143701503008X>
- Kress et al, N. (2020).** Seawater quality at the brine discharge site from two mega size seawater reverse osmosis desalination plants in Israel (Eastern Mediterranean). *Water Res.* 171, 115402. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115402>
- Laabir, M., Jauzein, C., Genovesi, B., Masseret, E., Grzebyk, D., Cecchi, P., Vaquer, A., Perrin, Y., Collos, Y. (2011).** Influence of temperature, salinity and irradiance on the growth and cell yield of the harmful red tide dinoflagellate *Alexandrium catenella* colonizing Mediterranean waters. *J. Plankton Res.* 33, 1550–1563. <https://doi.org/10.1093/plankt/fbr050>
- Lattemann, S., Höpner, T. (2008).** Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. *Desalination* 220, 1–15.
- Liou, J.K. (1998).** Géométrie des modules in: Les séparations par membrane dans les procédés de l'industrie alimentaire. Daufin G René F Aimar P Paris Lavoisier-Tec Doc 41–56.
- Loizide, L. (2003).** Evaluation des activités de dessalement de l'eau de mer dans la région méditerranéenne et impacts sur l'environnement.
- Loya-Fernández, Á., Ferrero-Vicente, L.M., Marco-Méndez, C., Martínez-García, E., Zubcoff, J., Sánchez-Lizaso, J.L. (2012).** Comparing four mixing zone models with brine discharge measurements from a reverse osmosis desalination plant in Spain. *Desalination* 286, 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.11.026>
- Mabrook, B. (1994).** Environmental impact of waste brine disposal of desalination plants, Red Sea, Egypt. *Desalination* 97, 453–465.
- Maleika, W. (2020).** Inverse distance weighting method optimization in the process of digital terrain model creation based on data collected from a multibeam echosounder. *Appl. Geomat.* 12, 397–407. <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00307-6>
- Marion, G.M., Millero, F.J., Camões, M.F., Spitzer, P., Feistel, R., Chen, C.T.A. (2011).** PH of seawater. *Mar. Chem.* 126, 89–96. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2011.04.002>
- Matin, A., Laoui, T., Falath, W., & Farooque, M. (2021).** Fouling control in reverse osmosis for water desalination & reuse: Current practices & emerging environment-friendly technologies. *Science of The Total Environment*, 765, 142721.
- Maurel, A. (2007).** Dessalement de l'eau de mer Technique de l'ingénieur J1. J2700 1.
- Maurel, A. (2006).** Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres. *Libr Lavoisier* 286.
- Maurel, A. (1979).** Dessalement et energies nouvelles. *Desalination* 31, 489–499.
- Meerganz von Medeazza, G.L. (2005).** “Direct” and socially-induced environmental impacts of

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

desalination. Desalination 185, 57–70. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2005.03.071>

**Mehtougui, M., Kerfouf, A. (2018).** Assessment of the Quality of Water Discharges from a Desalination Plant : International Journal of Sciences : Assessment of the Quality of Water Discharges from a Desalination Plant : Case of Honaine Station ( Western Algeria ).

**Mehtougui, M.S., Mehtougui, F., Kerfouf, A. (2015).** Impact of Desalination of Sea Water on a Coastal Environment of Chatt El Hillal (Beni Saf – Western Northern Alg ... Related papers Impact of Desalination of Sea Water on a Coastal Environment of Chatt El Hillal ( Beni Saf – Western 327–333.

**Méricq, J.-P. (2009).** Approche intégrée du dessalement d’eau de mer: Distillation membranaire sous vide pour la réduction des rejets salins et possibilités de couplage avec l’énergie solaire.

**Miri, R., Chouikhi, A. (2005).** Ecotoxicological marine impacts from seawater desalination plants. Desalination 182, 403–410. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.034>

**Missimer, T.M., Maliva, R.G. (2018).** Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. Desalination 434, 198–215. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.012>

**Mohamed, A.M.O., Maraqa, M., Al Handhaly, J. (2005).** Impact of land disposal of reject brine from desalination plants on soil and groundwater. Desalination 182, 411–433. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.035>

**Moradi, M., Chertouk, N., Ilinca, A. (2022).** Modelling of a Wave Energy Converter Impact on Coastal Erosion, a Case Study for Palm Beach-Azur, Algeria. Sustain. Switz. 14. <https://doi.org/10.3390/su142416595>

**Morote, Á.F., Olcina, J., Hernández, M. (2019).** The use of non-conventional water resources as a means of adaptation to drought and climate change in semi-arid regions: South-eastern Spain. Water Switz. 11. <https://doi.org/10.3390/w11010093>

**Morton, A.J., Callister, I.K., Wade, N.M. (1997).** Environmental impacts of seawater distillation and reverse osmosis processes. desalination 108, 1–10.

**Moudjeber, D.-E. (2015).** Thèse de doctorat:Utilisation des énergies renouvelables dans le dessalement : Cas de l’Algérie. Thèse de doctorat en Génie Mécanique, Université Abdelhamid Ibn Badis. Mostaganem : 159 p.

**Mukherjee, S.P., Sinha, B.K., Chattopadhyay, A.K. (2018).** Statistical Methods in Social Science Research. Stat. Methods Soc. Sci. Res. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2146-7>

**Muñoz, P.T., Rodríguez-Rojas, F., Celis-Plá, P.S.M., López-Marras, A., Blanco-Murillo, F., Sola, I., Lavergne, C., Valenzuela, F., Orrego, R., Sánchez-Lizaso, J.L., Sáez, C.A. (2023).** Desalination effects on macroalgae (part b): Transplantation experiments at brine-impacted sites with Dictyota spp. from the Pacific Ocean and Mediterranean Sea. Front. Mar. Sci. 10, 1–11.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

<https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1042799>

**Murphy, J., Riley, J.P. (1962).** A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27, 31–36.

**Naimi-Ait-Aoudia (2014).** Algiers carrying capacity with respect to per capita domestic water use. *Sustain. Cities Soc.* 13, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.03.006>

**Nasr, H., Yousef, M., Madkour, H. (2019).** Impacts of Discharge of Desalination Plants on Marine Environment at the Southern Part of the Egyptian Red Sea Coast (Case Study). *Int. J. Ecotoxicol. Ecobiol.* 4, 66. <https://doi.org/10.11648/j.ijee.20190403.12>

**Omerspahic, M., Al-Jabri, H., Siddiqui, S.A., Saadaoui, I. (2022).** Characteristics of Desalination Brine and Its Impacts on Marine Chemistry and Health, With Emphasis on the Persian/Arabian Gulf: A Review. *Front. Mar. Sci.* 9, 1–12. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.845113>

**Ouhamdouch, S., Bahir, M., Carreira, P.M. (2018).** Impact du changement climatique sur la ressource en eau en milieu semi-aride: exemple du bassin d'Essaouira (Maroc). *Rev. Sci. L'Eau* 31, 13–27.

**Oulmane, A. (2022).** Assessment of surface water management institutions : a case of public irrigation schemes in northern Algeria 24, 229–241. <https://doi.org/10.2166/wp.2022.025>

**Palomar, Lara, J.L., Losada, I.J., Tarrade, L. (2013).** Numerical modeling of brine discharge: commercial models, MEDVSA online simulation tools and advanced computational fluid dynamics. *Desalination Water Treat.* 51, 543–559.

**Palomar, P., J., Inigo. (2011).** Impacts of Brine Discharge on the Marine Environment. Modelling as a Predictive Tool. *Desalination Trends Technol.* <https://doi.org/10.5772/14880>

**Panagopoulos, A. (2025).** Assessing the energy footprint of desalination technologies and minimal/zero liquid discharge (MLD/ZLD) systems for sustainable water protection via renewable energy integration. *Energies*, 18(4), 962.

**Panagopoulos, A., Haralambous, K.J. (2020).** Environmental impacts of desalination and brine treatment - Challenges and mitigation measures. *Mar. Pollut. Bull.* 161, 111773. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111773>

**Pérez-Zuñiga, G., Rivas-Perez, R., Sotomayor-Moriano, J., Sánchez-Zurita, V. (2020).** Fault detection and isolation system based on structural analysis of an industrial seawater reverse Osmosis desalination plant. *Processes* 8. <https://doi.org/10.3390/pr8091100>

**Pistocchi, A., Bleninger, T., Dorati, C. (2020).** Screening the hurdles to sea disposal of desalination brine around the Mediterranean. *Desalination* 491, 114570. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114570>

**PNUE (2001).** Plan d'action pour la méditerranée dessalement de l ' eau de mer dans les pays

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

méditerranéens : évaluation des impacts sur l' environnement et 11–14.

**Porto Pereira, S., Rodrigues, M.F., Rosman, P.C.C., Rosman, P., Bleninger, T., Lima Neto, I.E., Teixeira, C.E.P., Sola, I., Sánchez Lizaso, J.L. (2024).** A novel tool for modeling the near- and far-field dispersion of brine effluent from desalination plants. *Front. Mar. Sci.* 11. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1377252>

Quon et Jiang, 2023. Decision making for implementing non-traditional water sources: a review of challenges and potential solutions. *Npj Clean Water* 6. <https://doi.org/10.1038/s41545-023-00273-7>

**Radjai, A., Lifa, A. (2021).** Caractérisation des stations de dessalement et leur impact sur le milieu récepteur. Mémoire d'ingénieur en Environnement marin et côtier. ENSSMAL, Alger : 76 p.

**Raluy, G., Serra, L., Uche, J. (2006).** Life cycle assessment of MSF, MED and RO desalination technologies. *Energy* 31, 2361–2372.

**Rejsek, F. (2002).** Analyse des eaux: Aspects réglementaires et techniques. Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine, France. 360 p. Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine.

**Rezim, F., Tachetaoui, K. (2020).** Etude des performances de la station de dessalement d'eau de mer de FOUKA Wilaya de TIPAZA. Mémoire de Master en Hydraulique, Université Saad Dahlab., Blida 1: 97 p.

**Roberts, D. A., Johnston, E. L., & Knott, N. A. (2010).** Impacts of desalination plant discharges on the marine environment : A critical review of published studies. *Water Res.* 44, 5117–5128. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.04.036>

**Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2016).** L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (10e éd.). Dunod.

**Rodríguez-delanuez, F., Franquiz-Suárez, N., Santiago, D.E., Veza, J.M., Sadhwani, J.J. (2012).** Reuse and minimization of desalination brines: A review of alternatives. *Desalination Water Treat.* 39, 137–148. <https://doi.org/10.5004/dwt.2012.2977>

**Rosner, A., Grossmark, Y., Gertner, Y., Rabinowitz, C., Reem, E., Rinkevich, B. (2023).** Genotoxicity Signatures near Brine Outflows from Desalination Plants in the Levant. *Water* 15, 1079. <https://doi.org/10.3390/w15061079>

**Sadhwani, J.J., Veza, J.M., Santana, C. (2005).** Case studies on environmental impact of seawater desalination. *Desalination* 185, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.072>

**Sadi, A., Kehal, S. (2003).** Retrospectives and potential use of saline water desalination in Algeria. *Desalination* 152, 51–56. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01047-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01047-0)

**Sahu, P. (2021).** A comprehensive review of saline effluent disposal and treatment:

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Conventional practices, emerging technologies, and future potential. *J. Water Reuse Desalination* 11, 33–65. <https://doi.org/10.2166/wrd.2020.065>

**Salami, E.S., Ehetshami, M., Karimi-Jashni, A., Salari, M., Nikbakht Sheibani, S., Ehteshami, A. (2016).** A mathematical method and artificial neural network modeling to simulate osmosis membrane's performance. *Model. Earth Syst. Environ.* 2, 1–11.

**Shammi, M., Rahman, M.M., Islam, M.A., Bodrud-Doza, M., Zahid, A., Akter, Y., Quaiyum, S., Kurasaki, M. (2017).** Spatio-temporal assessment and trend analysis of surface water salinity in the coastal region of Bangladesh. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 14273–14290. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8976-7>

**Shokri, A., & Sanavi Fard, M. (2022).** *A comprehensive overview of environmental footprints of water desalination and alleviation strategies.* *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20, 2347–2374.

**Skalar Analytical. (1998).** User manual San Plus. SA1050 RANDOM ACCESS AUTO Sola, I., Zarzo, D., Carratalá, A., Fernández-Torquemada, Y., de-la-Ossa-Carretero, J.A., Del-Pilar-Ruso, Y., Sánchez-Lizaso, J.L. (2020). Review of the management of brine discharges in Spain. *Ocean Coast. Manag.* 196. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2020.105301>

**Soliman, M.N., Guen, F.Z., Ahmed, S.A., Saleem, H., Khalil, M.J., Zaidi, S.J. (2021).** Energy consumption and environmental impact assessment of desalination plants and brine disposal strategies. *Process Saf. Environ. Prot.* 147, 589–608. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.12.038>

**Spellman, F.R. (2020).** *The science of water: concepts and applications.* CRC press.

**Taibi, S. (2016).** Les facteurs influençant le vieillissement des membranes d'osmose inverse. Étude d'un cas. Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique-Arbaoui Abdellah, Alger.

**Taminiau, B., Korsak, N., Lemaire, C., Delcenserie, V., Daube, G. (2014).** Validation of real-time PCR for detection of six major pathogens in seafood products. *Food Control* 44, 130–137.

**Tan, X., Sheldon, F., Bunn, S.E., Zhang, Q. (2013).** Using diatom indices for water quality assessment in a subtropical river, China. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 20, 4164–4175.

**Tarekegn, N., Abate, B., Muluneh, A., Dile, Y. (2022).** Modeling the impact of climate change on the hydrology of Andasa watershed. *Model. Earth Syst. Environ.* 8, 103–119. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01063-7>

**Temmar, S. (2016).** Etude de la performance de la station de dessalement de l'eau de mer de Fouka et son impact sur l'environnement marin. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (ENSSMAL).

**Thabet, H. K., El-Shamy, O. A. A., Ashmawy, A. M., & Deyab, M. A. (2023).** *The Impact of Corrosion Inhibitors in Desalination Systems.* *ACS Omega*, 8(49), 45224–45231.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Tigrine, Z., Aburideh, H., Abbas, M., Hout, S., Merzouk, N.K., Zioui, D., Khateb, M. (2018).** Membrane desalination technology in Algeria: Reverse osmosis for coastal areas, in: **Voutchkov, N., Kaiser, G., Stover, R., Lienhart, J., Awerbuch, L. (2019).** Sustainable Management Of Desalination Plant Concentrate-Desalination Industry Position Paper–Energy And Environment Committee Of The International Desalination Association (IDA), in: The International Desalination Association World Congress on Desalination and Water Reuse. UAE REF: IDAWC19-Voutchkov, pp. 1–32.
- Wagner, J. (2001).** Membrane filtration handbook: Practical tips and hints. Osmonics Minnetonka, MN.
- Wang, Z., Feng, W., Cao, J., Zhang, H., Zhang, D., Qian, J., Xu, H.T., Hao, Z. (2020).** Effects of  $\text{Ca}^{2+}$  on encystment and growth in *Scrippsiella trochoidea*. bioRxiv 2012–2020.
- Yang, L., Wang, L. (2023).** Emergy analysis of seawater desalination system in coastal areas: a case study in Qingdao of China. Environ. Dev. Sustain. 1–13.
- Yfantis, D., Yfantis, A. (2020).** Aristotle and seawater desalination: A new explanation of an experiment described in meteorologica and historia animalium. Cap. Knowl. 167–173.
- Younos, T. (2005).** Environmental issues of desalination. J. Contemp. Water Res. Educ. 132, 3.
- Yousfi et Chedik. (2023).** Étude des rejets de saumures des usines de dessalement de l’eau de mer en utilisant l’imagerie satellite.
- Zaniolo, M., Fletcher, S.M., Mauter, M.S. (2026).** Expedited desalination permitting enables adaptive planning and water system cost reduction. Environ. Res. Infrastruct. Sustain. 6, 011002.
- Zijl, F. (2002).** On the effect of non-hydrostatic simulation on buoyant jets. MSc-Rep. Delft Univ. Technolgy.
- Zotalis, K., Dialynas, E.G., Mamassis, N., Angelakis, A.N. (2014).** Desalination technologies: Hellenic experience. Water Switz. 6, 1134–1150. <https://doi.org/10.3390/w6051134>

# ***ANNEXES***



## **Annexe 1**

**Tableau 1:** *Coordonnées géographiques des stations de prélèvement au voisinage du point de rejet de la station de dessalement de Palm-Beach*

| <b>Code station</b> | <b>Longitude</b> | <b>Latitude</b>   |
|---------------------|------------------|-------------------|
| <b>S1</b>           | 2° 50' 29,832" E | 36° 44' 20,037" N |
| <b>S1"</b>          | 2° 50' 31,056" E | 36° 44' 17,524" N |
| <b>S2</b>           | 2° 50' 31,128" E | 36° 44' 20,394" N |
| <b>S2"</b>          | 2° 50' 30,228" E | 36° 44' 16,796" N |
| <b>S3</b>           | 2° 50' 30,768" E | 36° 44' 19,680" N |
| <b>S3"</b>          | 2° 50' 29,472" E | 36° 44' 15,725" N |
| <b>S4"</b>          | 2° 50' 28,824" E | 36° 44' 14,283" N |
| <b>S5</b>           | 2° 50' 22,344" E | 36° 44' 18,966" N |
| <b>S8</b>           | 2° 50' 28,284" E | 36° 44' 23,635" N |
| <b>S9</b>           | 2° 50' 18,744" E | 36° 44' 14,640" N |
| <b>S11</b>          | 2° 50' 28,104" E | 36° 44' 17,881" N |
| <b>S12</b>          | 2° 50' 25,332" E | 36° 44' 18,595" N |
| <b>S13</b>          | 2° 50' 22,956" E | 36° 44' 16,082" N |
| <b>S14</b>          | 2° 50' 23,46" E  | 36° 44' 13,555" N |
| <b>S15</b>          | 2° 50' 26,016" E | 36° 44' 15,354" N |
| <b>S18</b>          | 2° 50' 23,028" E | 36° 44' 21,479" N |
| <b>S20</b>          | 2° 50' 25,332" E | 36° 44' 22,564" N |
| <b>SR</b>           | 2° 50' 11,328" E | 36° 44' 24,720" N |

**SR :** Station de Référence

**Tableau 2:** Coordonnées géographiques des stations de prélèvement et distance au point de rejet de la station de dessalement de Fouka 1 (Adem et al., 2023)

| Code Station | GPS Coordonats; WGS 84 |             | Distance par rapport au point de rejet (m) | Date de prélèvement |
|--------------|------------------------|-------------|--------------------------------------------|---------------------|
|              | Latitude (N)           | Longitude E |                                            |                     |
| 1            | 36,68110               | 2,76270     | 435                                        | 1, 2, 3             |
| 2            | 36,67970               | 2,76000     | 300                                        | 1, 2, 3             |
| 3            | 36,67900               | 2,75700     | 322                                        | 1, 2, 3             |
| 4            | 36,68100               | 2,75600     | 193                                        | 1, 2, 3             |
| 5            | 36,68200               | 2,75800     | 22                                         | 1, 2, 3             |
| 6            | 36,68400               | 2,76000     | 306                                        | 1, 2, 3             |
| 7            | 36,68700               | 2,75700     | 581                                        | 1, 2, 3             |
| 8            | 36,68600               | 2,75300     | 638                                        | 1, 2, 3             |
| 9            | 36,68300               | 2,75330     | 432                                        | 3                   |
| 10           | 36,67970               | 2,75300     | 497                                        | 3                   |
| 11           | 36,67770               | 2,75360     | 596                                        | 3                   |
| 12           | 36,68780               | 2,75710     | 668                                        | 4                   |
| 13           | 36,67900               | 2,75300     | 537                                        | 4                   |
| 14           | 36,67810               | 2,75360     | 563                                        | 4                   |
| 15           | 36,67880               | 2,75720     | 340                                        | 4                   |
| 16           | 36,68000               | 2,75600     | 263                                        | 4                   |
| 17           | 36,68171               | 2,75450     | 304                                        | 4                   |
| 18           | 36,68324               | 2,75306     | 461                                        | 4                   |
| 19           | 36,68432               | 2,75164     | 625                                        | 4                   |
| 20           | 36,68660               | 2,75064     | 838                                        | 4                   |
| 21           | 36,68636               | 2,75346     | 642                                        | 4                   |
| 22           | 36,68369               | 2,75697     | 224                                        | 4                   |
| 23           | 36,68204               | 2,75770     | 31                                         | 4                   |
| 24           | 36,67981               | 2,75983     | 280                                        | 4                   |
| 25           | 36,68247               | 2,76043     | 237                                        | 4                   |
| 26           | 36,68145               | 2,75096     | 621                                        | 4                   |
| 27           | 36,69096               | 2,75888     | 1018                                       | 4                   |
| 28           | 36,68674               | 2,76008     | 580                                        | 4                   |
| 29           | 36,68196               | 2,76282     | 439                                        | 4                   |
| 30           | 36,68468               | 2,77062     | 1 180                                      | 4                   |
| RS1          | 36,70100               | 2,80200     | 4 477                                      | 1                   |
| RS2          | 36,71700               | 2,74100     | 4 185                                      | 2                   |
| RS3          | 36,72460               | 2,75591     | 4 749                                      | 3                   |
| RS4          | 36,76069               | 2,81344     | 10 057                                     | 4                   |

**1** : Compagne de mai 2016 ; **2** : Compagne de septembre 2016 ; **3** : Compagne de août 2017 ; **4** : Compagne de décembre 2018.

**RS1** : Station de Référence de la compagne 1 ; **RS2** : Station de Référence de la compagne 2 ;

**RS3** : Station de Référence de la compagne 3 ; **RS4** : Station de Référence de la compagne 4.

## Annexe 2

### 1.1. Gammes d'étalonnage

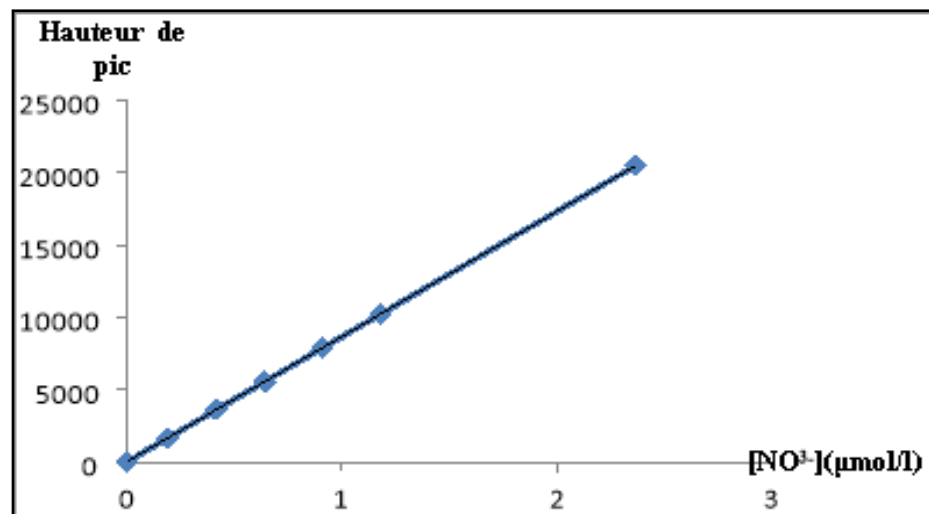


Figure 1 : Courbe d'étalonnage des nitrates.

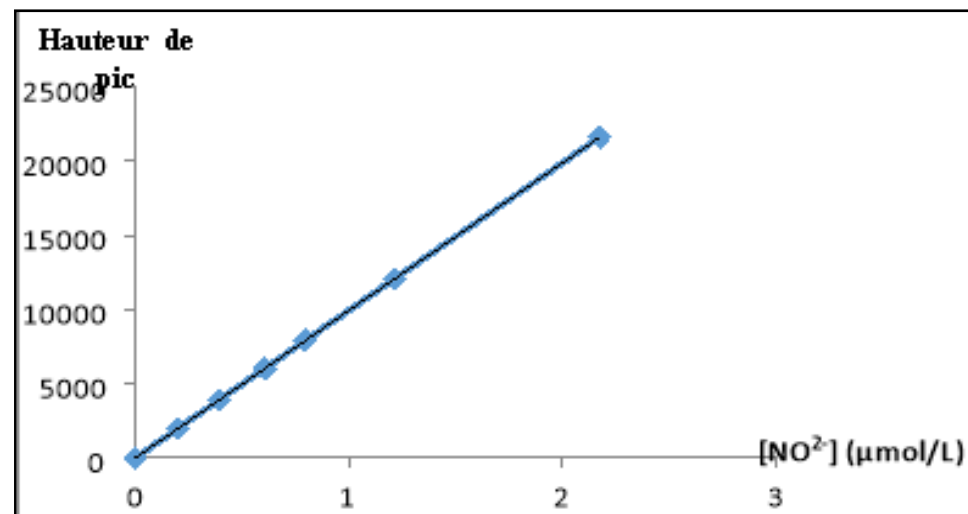


Figure 2 : Courbe d'étalonnage des nitrites.

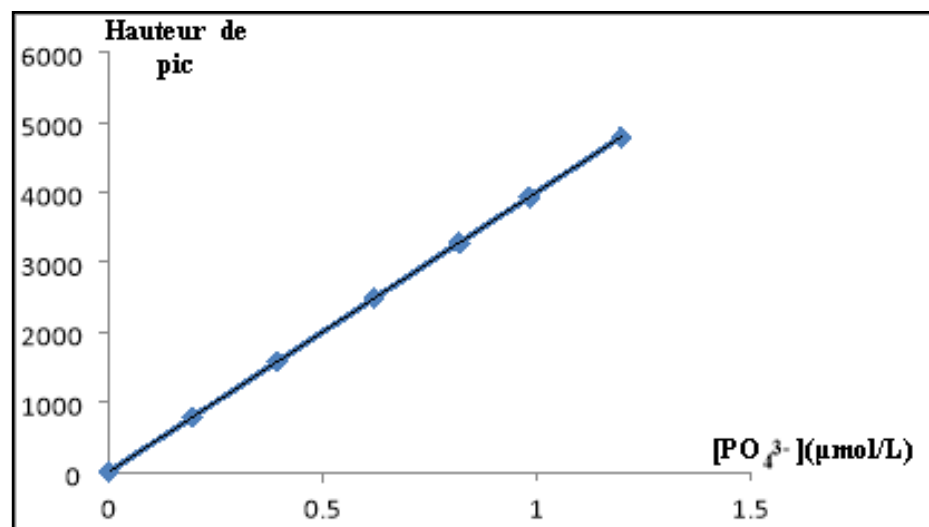


Figure 3 : Courbe d'étalonnage des phosphates.

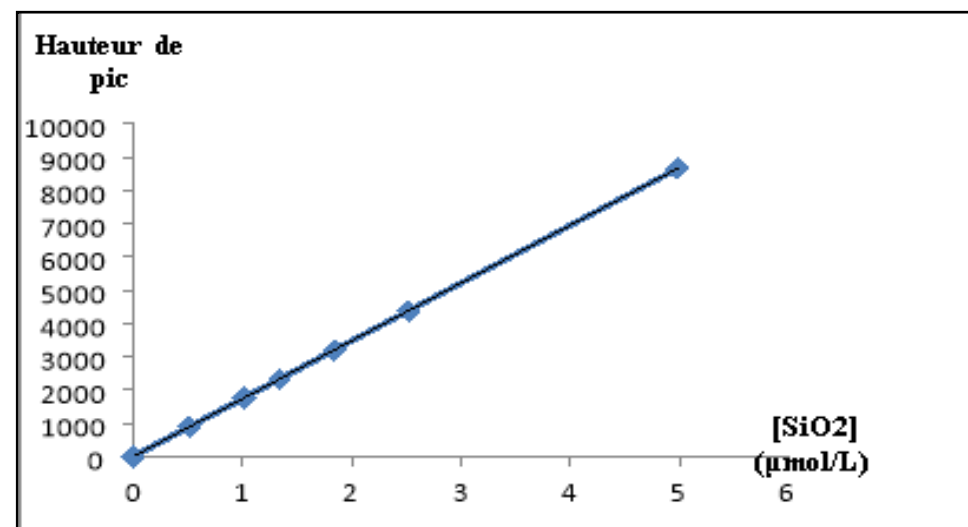
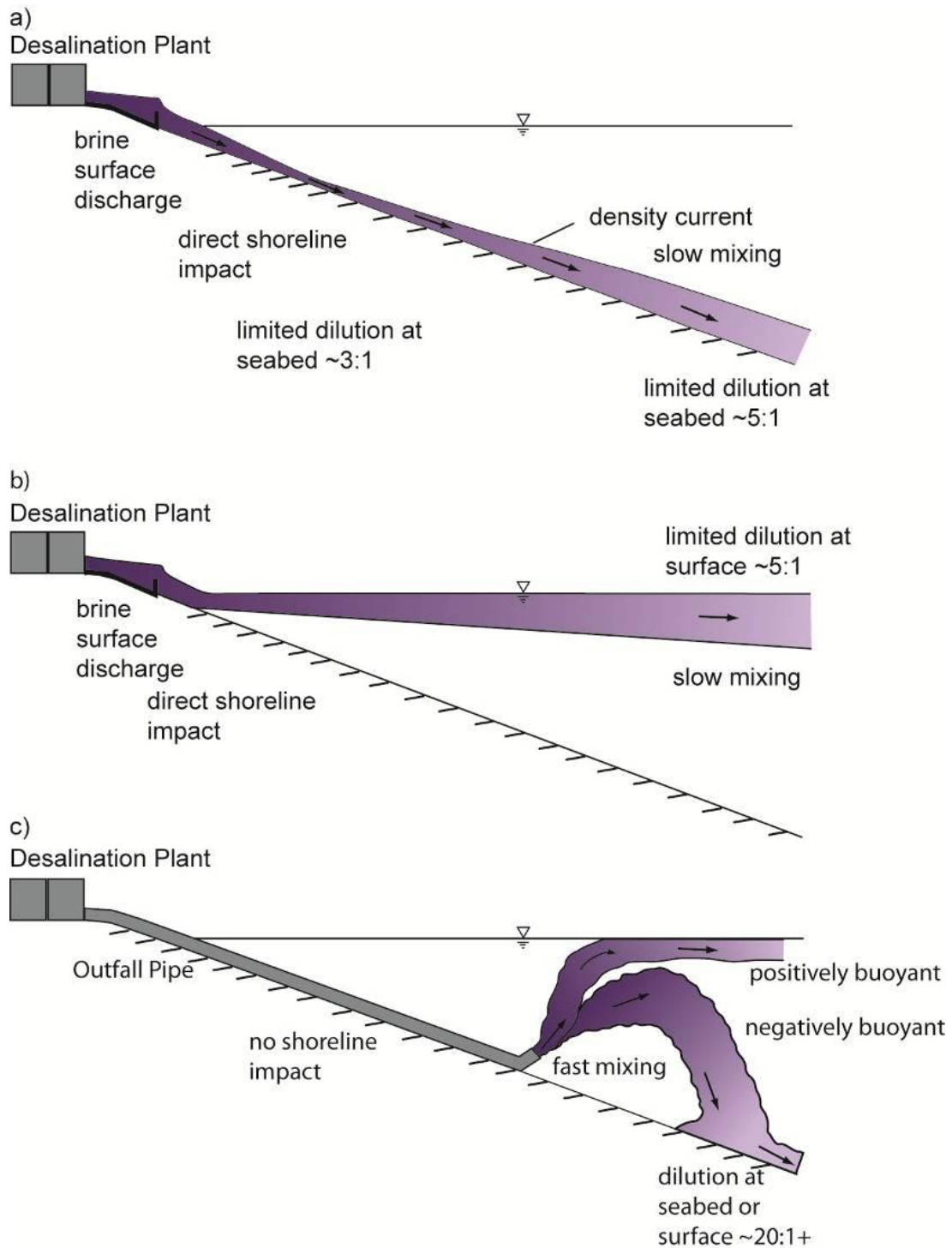


Figure 4 : Courbe d'étalonnage des silices.

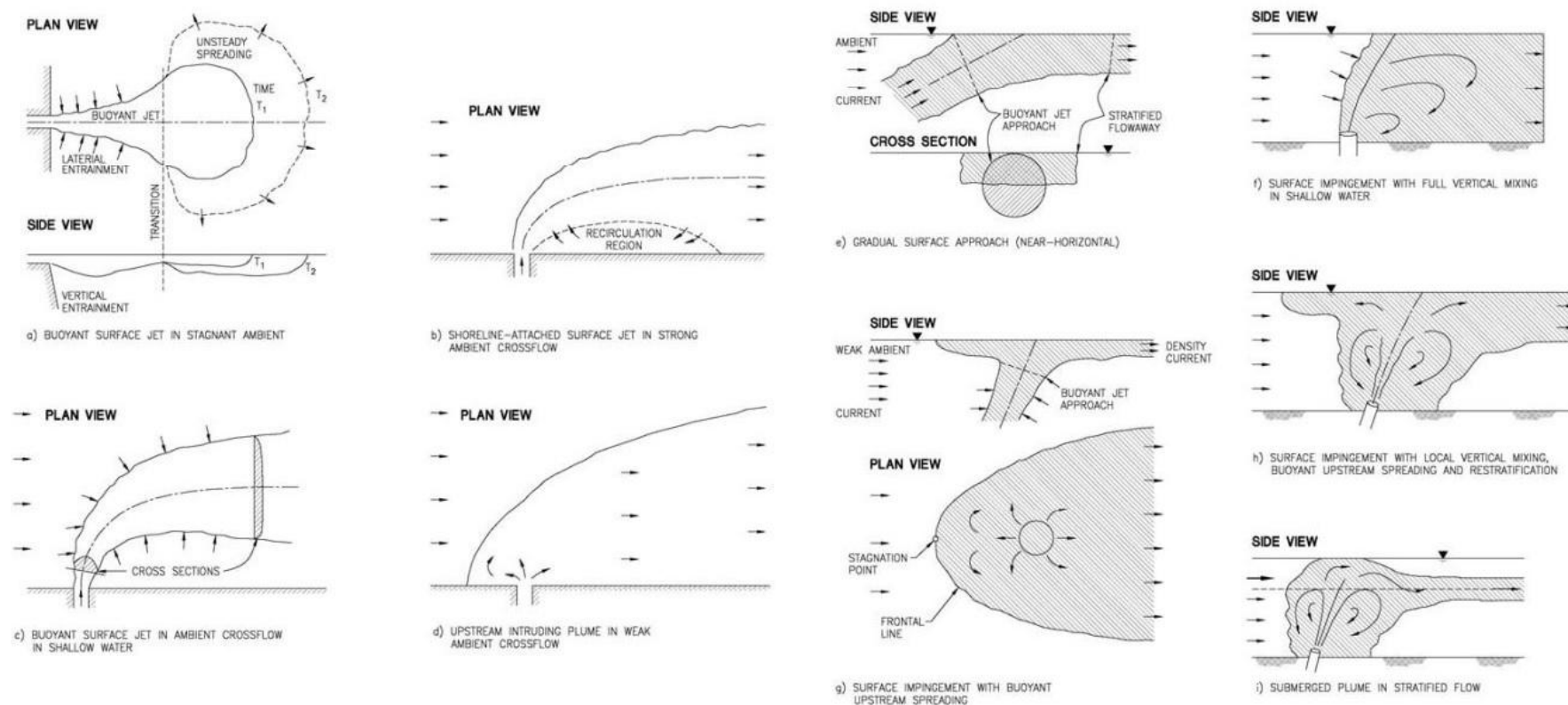
## Annexe 3

### 1. Caractéristiques de mélange des effluents



**Figure 5 :** Caractéristiques de mélange et distributions de substances pour diverses configurations de rejet de saumure et d'effluents. a) Usine d'osmose inverse (effluent dense) rejet direct, b) Centrale thermique (effluent dense mélangé à de l'eau de refroidissement flottante) rejet sur la côte, c) rejet immergé (effluent dense) par canalisation, une buse ou un diffuseur (Jirka et al., 1996)

## 2. Comportement du panache dans le milieu récepteur



**Figure 6 :** Exemples de comportement du panache dans les milieux récepteurs. a) Jet de surface flottant dans un milieu stagnant, b) Jet de surface littoral dans un milieu à fort écoulement transversal, c) Jet de surface flottant dans un milieu à écoulement transversal en eau peu profonde, d) Panache arrivant en amont dans un milieu à faible écoulement transversal, e) Approche graduelle en surface (quasihorizontale), f) Incidence en surface et mélange vertical complet en eau peu profonde, g) Incidence en surface et étalement flottant en amont, h) Incidence en surface, mélange vertical local, étalement flottant en amont et restratification, i) Panache submergé dans un écoulement stratifié (Jirka et al., 1996)

### 3. Captures d'écran du RO-Discharge-Calculator

#### Discharge Calculator - *Flowrates, Jet Properties and Outfall Design*

The following spreadsheet was developed for the estimation of effluent flowrates and their characteristics of a reverse osmosis (RO) desalination plant. The procedure is based on the technical note "Improved Discharge Configurations for Brine Effluents from Desalination Plants" by Jirka (2006).

First, the flowrates of the desalination plant are estimated related to the drinking water flowrate  $Q_{drink}$ . Additionally the effluent properties (e.g. density, salinity) are calculated.

Second, the required design of the outfall (geometry) and its characteristics (e.g. discharge velocity  $U_o$ , momentum flux  $M_o$ , length scales  $L_Q$  &  $L_M$ ) are calculated for a discharge into a **stagnant** water body.

Third, the properties of the negatively buoyant jet are estimated (Dilution  $S$ , maximum level of rise  $z_{max}$ ,  $x_{max}$ , impingement point  $z_i$ ,  $x_i$ ) and a recommendation for the outfall location is given (distance to shore).

In the summary all important parameters are listed.

The density & viscosity calculator is attached and can be used separately. The figures for the calculation of the jet trajectory and the dilution are also attached.

Note that the calculations are only valid for dense discharges (= effluent is more dense than the ambient)!

For the calculation following parameters are required:

- ambient characteristics: temperature  $T_a$ , salinity  $Sal_a$ , bottom slope  $\theta_B$
- plant characteristics: flow rate  $Q_{drink}$ , recovery rate  $r$ , brine temperature  $T_{desal}$
- if existent blended effluent char.: flow rate  $Q_{eff,ex}$ , temperature  $T_{eff,ex}$ , salinity  $Sal_{eff,ex}$
- outfall geometry: discharge angle  $\theta_o$ , port openings  $n$

Please enter the values of these parameters into the highlighted cells on the following three worksheets.

Declaration of the colors of the highlighted cells:

- yellow fixed parameters (ambient characteristics, plant/effluent properties)
- blue freely selectable (outfall geometry)
- green calculation not yet implemented

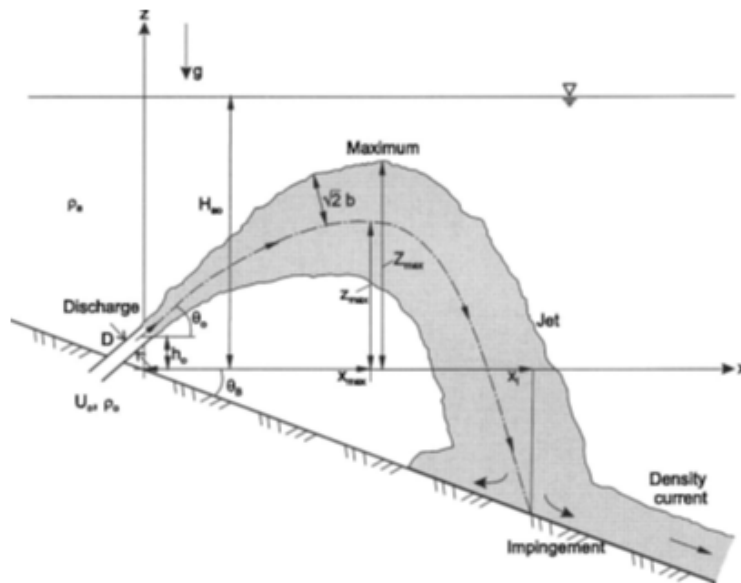


Figure 7 : Capture d'écran de l'interface du RO-discharge-calculator

## Flowrates & Effluent Characteristics RO

### - ambient characteristics (seawater)

|                        |            |          |                   |
|------------------------|------------|----------|-------------------|
| ambient temperature    | $T_a =$    | 22.00    | °C                |
| ambient salinity       | $Sal_a =$  | 33.00    | ppt               |
| ambient density        | $\rho_a =$ | 1022.44  | kg/m <sup>3</sup> |
| ambient kin. viscosity | $\nu_a =$  | 9.98E-07 | m <sup>2</sup> /s |

annotations/limitations:

$T = 10$  to  $180^\circ\text{C}$

$Sal = 0$  to  $160$  ppt (ppt = g/kg)

allowed ranges for viscosity calculation:

$Sal = 0$  to  $130$  ppt,  $T = 10$  to  $180^\circ\text{C}$  (El-Dessouky, Ettouney (2002))

### - fresh water (permeate)

|                 |               |      |                   |
|-----------------|---------------|------|-------------------|
| flowrate        | $Q_{drink} =$ | 1.00 | m <sup>3</sup> /s |
| recovery rate   | $r =$         | 50   | %                 |
| intake flowrate | $Q_{in} =$    | 2.00 | m <sup>3</sup> /s |

recovery rate:

percentage of intake water converted into permeate;

plant characteristic; following Lattemann:  $r = 40$ -65%

### - brine characteristics (effluent from desalination process)

|                         |                  |         |                   |
|-------------------------|------------------|---------|-------------------|
| plant effluent flowrate | $Q_{desal} =$    | 1.00    | m <sup>3</sup> /s |
| temperature             | $T_{desal} =$    | 22.00   | °C                |
| salinity                | $Sal_{desal} =$  | 66.00   | ppt               |
| density                 | $\rho_{desal} =$ | 1047.49 | kg/m <sup>3</sup> |
| substance concentration | $c_{desal} =$    | 20.00   | ppm               |

usually ambient or  $1^\circ\text{C}$  above

with  $Sal_{drink} = 0$  ppt

e.g. coagulants, anti-scalants, ...

(has no effect on density or mixing characteristics)

### - blended effluent - external - (e.g. waste water or others)

|             |                    |        |                   |
|-------------|--------------------|--------|-------------------|
| flowrate    | $Q_{effl,ex} =$    | 1.00   | m <sup>3</sup> /s |
| temperature | $T_{effl,ex} =$    | 20.00  | °C                |
| salinity    | $Sal_{effl,ex} =$  | 0.00   | ppt               |
| density     | $\rho_{effl,ex} =$ | 998.40 | kg/m <sup>3</sup> |

$Sal = 0$  to  $160$  ppt,  $T = 10$  to  $180^\circ\text{C}$

### Final effluent characteristics:

|                            |            |          |                   |
|----------------------------|------------|----------|-------------------|
| flowrate                   | $Q_o =$    | 2.00     | m <sup>3</sup> /s |
| effluent temperature       | $T_o =$    | 21.00    | °C                |
| effluent salinity          | $Sal_o =$  | 33.00    | ppt               |
| effluent density           | $\rho_o =$ | 1022.73  | kg/m <sup>3</sup> |
| buoyant acceleration       | $g_o' =$   | -0.00281 | m/s <sup>2</sup>  |
| -> negatively buoyant, ok! |            |          |                   |
| kin. viscosity             | $\nu_o =$  | 1.02E-06 | m <sup>2</sup> /s |
| substance concentration    | $c_o =$    | 10.00    | ppm               |

mean average

mean average

$g_o' = g \cdot (|\rho_a - \rho_o|) / \rho_a$

$g_o' < 0$ : negatively buoyant,  $g_o' > 0$ : positively buoyant

allowed ranges for viscosity calculation:

$Sal = 0$  to  $130$  ppt,  $T = 10$  to  $180^\circ\text{C}$  (El-Dessouky, Ettouney (2002))

**Figure 8 :** Capture d'écran pour le calcul des Flux et des caractéristiques des effluents généré par une station d'osmose inverse depuis le RO-discharge-calculator

## Discharge Characteristics RO

### - ambient characteristics

|                      |              |          |                   |
|----------------------|--------------|----------|-------------------|
| ambient density      | $\rho_a =$   | 1022.44  | kg/m <sup>3</sup> |
| buoyant acceleration | $g'_a =$     | -0.00281 | m/s <sup>2</sup>  |
| offshore slope       | $\theta_B =$ | 10       | °                 |

### - effluent characteristics

|                   |            |          |                   |
|-------------------|------------|----------|-------------------|
| flowrate          | $Q_o =$    | 2.00     | m <sup>3</sup> /s |
| discharge density | $\rho_o =$ | 1022.73  | kg/m <sup>3</sup> |
| kin. viscosity    | $\nu_o =$  | 1.02E-06 | m <sup>2</sup> /s |

### - discharge characteristics

Choose a discharge angle (recommended: 45°) :

|                         |              |      |     |
|-------------------------|--------------|------|-----|
| discharge angle         | $\theta_o =$ | 15   | °   |
| discharge angle ok!     |              |      |     |
| port discharge velocity | $U_o =$      | 5.00 | m/s |
| number of openings      | $n =$        | 6    |     |
| port diameter           | $D =$        | 0.29 | m   |

|                     |          |          |  |
|---------------------|----------|----------|--|
| dens. Froude Number | $Fr_o =$ | 174.75   |  |
| Reynolds Number     | $Re_o =$ | 1.43E+06 |  |

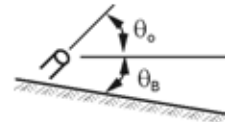
Checking of characteristic properties:

Diameter  $D$ : in required range, ok!

Froude Number  $Fr_o$ : huge value, please check openings!

Reynolds Number  $Re_o$ : in required range, ok!

annotations:



$[0^\circ \leq \theta_o \leq 90^\circ]$  only integer!

recommended:  $U_o = 4-6$  m/s

start with one opening!

$$Fr_o = U_o / (g'_o \cdot D)^{1/2} = Q_o / (D^2 \pi / 4) / (g'_o \cdot D)^{1/2}$$

$$Re_o = U_o \cdot D / \nu_o$$

required:

$$0.1 \leq D \leq 1.0$$

$$Fr_o \geq 10, \text{ recommended: } Fr_o = 20-25$$

$$Re_o > 4000$$

Choose an appropriate port diameter (DN according to ISO standard):

|               |       |      |   |
|---------------|-------|------|---|
| port diameter | $D =$ | 0.30 | m |
|---------------|-------|------|---|

### Final discharge characteristics:

|                         |                |          |                                |
|-------------------------|----------------|----------|--------------------------------|
| port diameter           | $D =$          | 0.30     | m                              |
| number of openings      | $n =$          | 6        |                                |
| discharge angle         | $\theta_o =$   | 15       | °                              |
| flowrate (individual)   | $Q_{o,ind.} =$ | 0.33     | m <sup>3</sup> /s              |
| port discharge velocity | $U_o =$        | 4.72     | m/s                            |
| dens. Froude Number     | $Fr_o =$       | 162.42   |                                |
| Reynolds Number         | $Re_o =$       | 1.39E+06 |                                |
| momentum flux           | $M_o =$        | 1.57     | m <sup>4</sup> /s <sup>2</sup> |
| buoyancy flux           | $J_o =$        | -0.001   | m <sup>4</sup> /s <sup>3</sup> |
| discharge length scale  | $L_Q =$        | 0.27     | m                              |
| momentum length scale   | $L_M =$        | 45.87    | m                              |

$$M_o = U_o \cdot Q_o$$

$$J_o = g'_o \cdot Q_o \quad (<0: \text{negatively buoyant})$$

$$L_Q = (D^2 \pi / 4)^{1/2} = Q_o / M_o^{1/2}$$

$$L_M = M_o^{3/4} / J_o^{1/2}$$

**Figure 9** : Capture d'écran pour le calcul des caractéristiques du rejet d'osmose inverse depuis le du RO-discharge-calculator



## Jet Properties RO

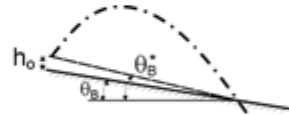
### - discharge & ambient characteristics

|                          |                |        |   |
|--------------------------|----------------|--------|---|
| discharge angle          | $\theta_o =$   | 15     | ° |
| port height              | $h_o =$        | 0.50   | m |
| in required range, ok!   |                |        |   |
| offshore slope           | $\theta_B =$   | 10     | ° |
| imaginary offshore slope | $\theta_B^* =$ | 10     | ° |
| momentum length scale    | $L_M =$        | 45.87  | m |
| dens. Froude Number      | $Fr_o =$       | 162.42 |   |

annotations:

$h_o = 0\text{m}$  or  $h_o = 0.5\text{--}1.0\text{m}$

due to port height, not yet implemented



### - geometric jet properties (for discharge angles that are not a multiple of 15°: linear interpolation!)

|                                                  |                       |        |                        |                                        |
|--------------------------------------------------|-----------------------|--------|------------------------|----------------------------------------|
|                                                  | $Z_{max}/L_M$ (3%) =  | 0.564  | (taken from Fig. 2(a)) | ( $c/c_{max} = 3\%$ )                  |
|                                                  | $Z_{max}/L_M$ (25%) = | 0.447  |                        | ( $c/c_{max} = 25\%$ )                 |
|                                                  | $z_{max}/L_M$ =       | 0.232  | (taken from Fig. 4(a)) | !port height not considered!           |
|                                                  | $x_{max}/L_M$ =       | 1.241  |                        |                                        |
|                                                  | $z_i/L_M$ =           | -0.487 |                        |                                        |
|                                                  | $x_i/L_M$ =           | 2.700  |                        |                                        |
| upper jet boundary                               | $Z_{max}$ (3%) =      | 25.86  | m                      |                                        |
|                                                  | $Z_{max}$ (25%) =     | 20.51  | m                      |                                        |
| maximum jet centerline position                  | $z_{max}$ =           | 10.64  | m                      |                                        |
|                                                  | $x_{max}$ =           | 56.94  | m                      |                                        |
| jet centerline position at the impingement point | $z_i$ =               | -22.34 | m                      |                                        |
|                                                  | $x_i$ =               | 123.85 | m                      |                                        |
| offshore location                                | $x \geq$              | 869.62 | m                      |                                        |
| local water depth                                | $H_{ao} \geq$         | 15.38  | m                      | $H_{ao} \geq 0.75 \cdot Z_{max}$ (25%) |

### Choose an appropriate outfall location:

|                   |            |       |   |                       |
|-------------------|------------|-------|---|-----------------------|
| offshore location | $x =$      | 870.0 | m | in required range,    |
| local water depth | $H_{ao} =$ | 15.39 | m | offshore location ok! |

### - dilutions & concentration (for bottom slopes that are not a multiple of 10°: linear interpolation!)

|                                                                               |              |       |           |
|-------------------------------------------------------------------------------|--------------|-------|-----------|
| minimum centerline dilution at $z_{max}$                                      | $S_m/Fr_o =$ | 0.21  | Fig. 2(b) |
|                                                                               | $S_m =$      | 34.8  |           |
| bulk dilution at impingement point                                            | $S_i/Fr_o =$ | 1.00  | Fig. 4(b) |
|                                                                               | $S_i =$      | 162.5 |           |
| substance concentration at the centerline of max. level of rise ( $z_{max}$ ) | $c_m =$      | 0.29  | ppm       |
| impingement point ( $z_i$ )                                                   | $c_i =$      | 0.06  | ppm       |

$S = c_o/c_e \rightarrow c_e = c_o/S$

**Figure 10 :** Capture d'écran pour le calcul des propriétés du jet d'osmose inverse depuis le RO-discharge-calculator





# MIXING ZONE / TOXIC DILUTION / REGION OF INTEREST PARAMETERS

C0 =0.3350E+02 CUNITS= mg/l  
 NTOX = 0  
 NSTD = 0  
 REGMZ = 1  
 REGSPC= 1 XREG = 500.00 WREG = 0.00 AREG =  
 0.00  
 XINT = 1500.00 XMAX = 1500.00

## X-Y-Z COORDINATE SYSTEM:

ORIGIN is located at the WATER SURFACE and:

- 1) directly above the port center for submerged discharges, OR
- 2) at the point of entry into the water for above surface discharges:  
450.00 m from the LEFT bank/shore.

X-axis points downstream, Y-axis points to left, Z-axis points upward.

NSTEP =100 display intervals per module

## BEGIN MOD101: DISCHARGE MODULE

COANDA ATTACHMENT immediately following the discharge.

| X    | Y    | Z     | S   | C         | B    | Uc    | TT         |
|------|------|-------|-----|-----------|------|-------|------------|
| 0.00 | 0.00 | -7.01 | 1.0 | 0.335E+02 | 0.52 | 0.986 | .00000E+00 |

## END OF MOD101: DISCHARGE MODULE

## BEGIN CORJET (MOD110): JET/PLUME NEAR-FIELD MIXING REGION

Bottom-attached jet motion.

UNSTABLE NEAR-FIELD: Jet/plume will mix over full layer depth.

Following MOD133 will include recirculation into jet region.

### Profile definitions:

B = Gaussian 1/e (37%) half-width, normal to trajectory

Half wall jet, attached to bottom.

S = hydrodynamic centerline dilution

C = centerline concentration (includes reaction effects, if any)

Uc = Local centerline excess velocity (above ambient)

TT = Cumulative travel time

| X    | Y    | Z     | S   | C         | B    | Uc    | TT         |
|------|------|-------|-----|-----------|------|-------|------------|
| 0.00 | 0.00 | -7.01 | 1.0 | 0.335E+02 | 0.39 | 0.986 | .87126E-01 |
| 0.66 | 0.00 | -7.01 | 1.0 | 0.335E+02 | 0.46 | 0.986 | .47540E+00 |
| 1.48 | 0.00 | -7.01 | 1.0 | 0.335E+02 | 0.55 | 0.986 | .10499E+01 |
| 2.14 | 0.00 | -7.01 | 1.0 | 0.335E+02 | 0.62 | 0.986 | .15806E+01 |
| 2.96 | 0.00 | -7.01 | 1.1 | 0.293E+02 | 0.70 | 0.986 | .23324E+01 |
| 3.62 | 0.00 | -7.01 | 1.3 | 0.266E+02 | 0.77 | 0.927 | .30043E+01 |
| 4.44 | 0.00 | -7.01 | 1.4 | 0.238E+02 | 0.86 | 0.832 | .39317E+01 |
| 5.10 | 0.00 | -7.01 | 1.5 | 0.220E+02 | 0.93 | 0.769 | .47435E+01 |
| 5.93 | 0.00 | -7.01 | 1.7 | 0.201E+02 | 1.02 | 0.702 | .58451E+01 |

|       |      |       |     |           |      |       |            |
|-------|------|-------|-----|-----------|------|-------|------------|
| 6.58  | 0.00 | -7.01 | 1.8 | 0.188E+02 | 1.08 | 0.656 | .67956E+01 |
| 7.41  | 0.00 | -7.01 | 1.9 | 0.173E+02 | 1.17 | 0.607 | .80698E+01 |
| 8.07  | 0.00 | -7.01 | 2.0 | 0.164E+02 | 1.24 | 0.573 | .91578E+01 |
| 8.89  | 0.00 | -7.01 | 2.2 | 0.153E+02 | 1.32 | 0.535 | .10603E+02 |
| 9.55  | 0.00 | -7.01 | 2.3 | 0.145E+02 | 1.39 | 0.508 | .11827E+02 |
| 10.37 | 0.00 | -7.01 | 2.5 | 0.136E+02 | 1.47 | 0.478 | .13442E+02 |
| 11.03 | 0.00 | -7.01 | 2.6 | 0.130E+02 | 1.54 | 0.457 | .14802E+02 |
| 11.85 | 0.00 | -7.01 | 2.7 | 0.123E+02 | 1.62 | 0.432 | .16585E+02 |
| 12.51 | 0.00 | -7.01 | 2.8 | 0.118E+02 | 1.69 | 0.414 | .18078E+02 |
| 13.33 | 0.00 | -7.01 | 3.0 | 0.112E+02 | 1.77 | 0.394 | .20028E+02 |
| 13.99 | 0.00 | -7.01 | 3.1 | 0.108E+02 | 1.84 | 0.380 | .21654E+02 |
| 14.82 | 0.00 | -7.01 | 3.3 | 0.103E+02 | 1.92 | 0.363 | .23769E+02 |
| 15.47 | 0.00 | -7.01 | 3.4 | 0.991E+01 | 1.98 | 0.350 | .25527E+02 |
| 16.30 | 0.00 | -7.01 | 3.5 | 0.949E+01 | 2.06 | 0.336 | .27806E+02 |
| 16.96 | 0.00 | -7.01 | 3.6 | 0.918E+01 | 2.13 | 0.325 | .29694E+02 |
| 17.78 | 0.00 | -7.01 | 3.8 | 0.882E+01 | 2.21 | 0.312 | .32136E+02 |
| 18.44 | 0.00 | -7.01 | 3.9 | 0.855E+01 | 2.27 | 0.303 | .34153E+02 |
| 19.26 | 0.00 | -7.01 | 4.1 | 0.824E+01 | 2.35 | 0.292 | .36756E+02 |
| 19.92 | 0.00 | -7.01 | 4.2 | 0.800E+01 | 2.42 | 0.284 | .38902E+02 |
| 20.74 | 0.00 | -7.01 | 4.3 | 0.773E+01 | 2.50 | 0.274 | .41664E+02 |
| 21.40 | 0.00 | -7.01 | 4.5 | 0.752E+01 | 2.56 | 0.267 | .43937E+02 |
| 22.22 | 0.00 | -7.01 | 4.6 | 0.727E+01 | 2.64 | 0.258 | .46858E+02 |
| 22.88 | 0.00 | -7.01 | 4.7 | 0.709E+01 | 2.70 | 0.252 | .49257E+02 |
| 23.71 | 0.00 | -7.01 | 4.9 | 0.687E+01 | 2.78 | 0.244 | .52334E+02 |
| 24.36 | 0.00 | -7.01 | 5.0 | 0.670E+01 | 2.84 | 0.239 | .54859E+02 |
| 25.19 | 0.00 | -7.01 | 5.1 | 0.651E+01 | 2.92 | 0.232 | .58092E+02 |
| 25.85 | 0.00 | -7.01 | 5.3 | 0.636E+01 | 2.98 | 0.227 | .60740E+02 |
| 26.67 | 0.00 | -7.01 | 5.4 | 0.618E+01 | 3.06 | 0.221 | .64127E+02 |
| 27.33 | 0.00 | -7.01 | 5.5 | 0.604E+01 | 3.12 | 0.216 | .66899E+02 |
| 28.15 | 0.00 | -7.01 | 5.7 | 0.588E+01 | 3.19 | 0.210 | .70439E+02 |
| 28.81 | 0.00 | -7.01 | 5.8 | 0.576E+01 | 3.25 | 0.206 | .73332E+02 |
| 29.63 | 0.00 | -7.01 | 6.0 | 0.561E+01 | 3.33 | 0.201 | .77025E+02 |
| 30.29 | 0.00 | -7.01 | 6.1 | 0.550E+01 | 3.39 | 0.197 | .80039E+02 |
| 31.11 | 0.00 | -7.01 | 6.2 | 0.537E+01 | 3.47 | 0.192 | .83881E+02 |
| 31.77 | 0.00 | -7.01 | 6.4 | 0.526E+01 | 3.52 | 0.189 | .87015E+02 |
| 32.59 | 0.00 | -7.01 | 6.5 | 0.514E+01 | 3.60 | 0.184 | .91007E+02 |
| 33.25 | 0.00 | -7.01 | 6.6 | 0.505E+01 | 3.66 | 0.181 | .94260E+02 |
| 34.08 | 0.00 | -7.01 | 6.8 | 0.493E+01 | 3.73 | 0.177 | .98400E+02 |
| 34.73 | 0.00 | -7.01 | 6.9 | 0.485E+01 | 3.79 | 0.174 | .10177E+03 |
| 35.56 | 0.00 | -7.01 | 7.1 | 0.474E+01 | 3.87 | 0.171 | .10606E+03 |
| 36.22 | 0.00 | -7.01 | 7.2 | 0.466E+01 | 3.92 | 0.168 | .10955E+03 |
| 37.04 | 0.00 | -7.01 | 7.3 | 0.456E+01 | 4.00 | 0.164 | .11398E+03 |
| 37.70 | 0.00 | -7.01 | 7.5 | 0.449E+01 | 4.06 | 0.162 | .11758E+03 |
| 38.52 | 0.00 | -7.01 | 7.6 | 0.440E+01 | 4.13 | 0.159 | .12216E+03 |
| 39.18 | 0.00 | -7.01 | 7.7 | 0.433E+01 | 4.19 | 0.156 | .12588E+03 |
| 40.00 | 0.00 | -7.01 | 7.9 | 0.424E+01 | 4.26 | 0.153 | .13060E+03 |
| 40.66 | 0.00 | -7.01 | 8.0 | 0.418E+01 | 4.31 | 0.151 | .13443E+03 |
| 41.48 | 0.00 | -7.01 | 8.2 | 0.410E+01 | 4.39 | 0.148 | .13929E+03 |
| 42.14 | 0.00 | -7.01 | 8.3 | 0.404E+01 | 4.44 | 0.146 | .14324E+03 |
| 42.97 | 0.00 | -7.01 | 8.4 | 0.397E+01 | 4.51 | 0.144 | .14824E+03 |
| 43.62 | 0.00 | -7.01 | 8.6 | 0.391E+01 | 4.57 | 0.142 | .15230E+03 |
| 44.45 | 0.00 | -7.01 | 8.7 | 0.384E+01 | 4.64 | 0.139 | .15744E+03 |
| 45.11 | 0.00 | -7.01 | 8.8 | 0.379E+01 | 4.70 | 0.137 | .16161E+03 |
| 45.93 | 0.00 | -7.01 | 9.0 | 0.372E+01 | 4.77 | 0.135 | .16689E+03 |
| 46.59 | 0.00 | -7.01 | 9.1 | 0.367E+01 | 4.82 | 0.133 | .17117E+03 |
| 47.41 | 0.00 | -7.01 | 9.3 | 0.361E+01 | 4.89 | 0.131 | .17659E+03 |
| 48.07 | 0.00 | -7.01 | 9.4 | 0.356E+01 | 4.95 | 0.129 | .18098E+03 |

|       |      |       |      |           |      |       |            |
|-------|------|-------|------|-----------|------|-------|------------|
| 48.89 | 0.00 | -7.01 | 9.6  | 0.350E+01 | 5.02 | 0.127 | .18653E+03 |
| 49.55 | 0.00 | -7.01 | 9.7  | 0.346E+01 | 5.07 | 0.126 | .19103E+03 |
| 50.37 | 0.00 | -7.01 | 9.8  | 0.341E+01 | 5.14 | 0.124 | .19672E+03 |
| 51.03 | 0.00 | -7.01 | 10.0 | 0.336E+01 | 5.20 | 0.122 | .20132E+03 |
| 51.85 | 0.00 | -7.01 | 10.1 | 0.331E+01 | 5.26 | 0.121 | .20715E+03 |
| 52.51 | 0.00 | -7.01 | 10.2 | 0.327E+01 | 5.32 | 0.119 | .21186E+03 |
| 53.34 | 0.00 | -7.01 | 10.4 | 0.322E+01 | 5.39 | 0.117 | .21782E+03 |
| 53.99 | 0.00 | -7.01 | 10.5 | 0.318E+01 | 5.44 | 0.116 | .22264E+03 |
| 54.82 | 0.00 | -7.01 | 10.7 | 0.314E+01 | 5.51 | 0.115 | .22872E+03 |
| 55.48 | 0.00 | -7.01 | 10.8 | 0.310E+01 | 5.56 | 0.113 | .23365E+03 |
| 56.30 | 0.00 | -7.01 | 11.0 | 0.306E+01 | 5.63 | 0.112 | .23987E+03 |
| 56.96 | 0.00 | -7.01 | 11.1 | 0.302E+01 | 5.68 | 0.111 | .24490E+03 |
| 57.78 | 0.00 | -7.01 | 11.2 | 0.298E+01 | 5.75 | 0.109 | .25125E+03 |
| 58.44 | 0.00 | -7.01 | 11.4 | 0.295E+01 | 5.80 | 0.108 | .25638E+03 |
| 59.26 | 0.00 | -7.01 | 11.5 | 0.291E+01 | 5.87 | 0.106 | .26286E+03 |
| 59.92 | 0.00 | -7.01 | 11.6 | 0.288E+01 | 5.92 | 0.105 | .26809E+03 |
| 60.74 | 0.00 | -7.01 | 11.8 | 0.284E+01 | 5.98 | 0.104 | .27470E+03 |
| 61.40 | 0.00 | -7.01 | 11.9 | 0.281E+01 | 6.04 | 0.103 | .28003E+03 |
| 62.23 | 0.00 | -7.01 | 12.1 | 0.277E+01 | 6.10 | 0.102 | .28677E+03 |
| 62.88 | 0.00 | -7.01 | 12.2 | 0.275E+01 | 6.15 | 0.101 | .29220E+03 |
| 63.71 | 0.00 | -7.01 | 12.4 | 0.271E+01 | 6.22 | 0.100 | .29906E+03 |
| 64.37 | 0.00 | -7.01 | 12.5 | 0.268E+01 | 6.27 | 0.099 | .30460E+03 |
| 65.19 | 0.00 | -7.01 | 12.6 | 0.265E+01 | 6.33 | 0.097 | .31158E+03 |
| 65.85 | 0.00 | -7.01 | 12.8 | 0.262E+01 | 6.38 | 0.096 | .31722E+03 |
| 66.67 | 0.00 | -7.01 | 12.9 | 0.259E+01 | 6.45 | 0.095 | .32433E+03 |
| 67.33 | 0.00 | -7.01 | 13.0 | 0.257E+01 | 6.50 | 0.094 | .33007E+03 |
| 68.15 | 0.00 | -7.01 | 13.2 | 0.254E+01 | 6.56 | 0.093 | .33730E+03 |
| 68.81 | 0.00 | -7.01 | 13.3 | 0.251E+01 | 6.61 | 0.093 | .34313E+03 |
| 69.63 | 0.00 | -7.01 | 13.5 | 0.248E+01 | 6.68 | 0.092 | .35048E+03 |
| 70.29 | 0.00 | -7.01 | 13.6 | 0.246E+01 | 6.73 | 0.091 | .35641E+03 |
| 71.12 | 0.00 | -7.01 | 13.8 | 0.243E+01 | 6.79 | 0.090 | .36389E+03 |
| 71.77 | 0.00 | -7.01 | 13.9 | 0.241E+01 | 6.84 | 0.089 | .36992E+03 |
| 72.60 | 0.00 | -7.01 | 14.0 | 0.238E+01 | 6.90 | 0.088 | .37751E+03 |
| 73.26 | 0.00 | -7.01 | 14.2 | 0.236E+01 | 6.95 | 0.087 | .38363E+03 |
| 73.91 | 0.00 | -7.01 | 14.3 | 0.234E+01 | 7.00 | 0.087 | .38980E+03 |

Cumulative travel time = 389.7995 sec ( 0.11 hrs)

END OF CORJET (MOD110): JET/PLUME NEAR-FIELD MIXING REGION

-----  
-----  
-----  
-----

BEGIN MOD133: LAYER BOUNDARY IMPINGEMENT/FULL VERTICAL MIXING

Control volume inflow:

| X     | Y    | Z     | S    | C         | B    | TT         |
|-------|------|-------|------|-----------|------|------------|
| 73.91 | 0.00 | -7.01 | 14.3 | 0.234E+01 | 7.00 | .38980E+03 |

Profile definitions:

BV = layer depth (vertically mixed)  
 BH = top-hat half-width, in horizontal plane normal to trajectory  
 ZU = upper plume boundary (Z-coordinate)  
 ZL = lower plume boundary (Z-coordinate)  
 S = hydrodynamic average (bulk) dilution  
 C = average (bulk) concentration (includes reaction effects, if any)  
 TT = Cumulative travel time



[illegible]



[illegible]

[illegible]



|                                                                            |            |       |       |      |           |      |        |       |   |
|----------------------------------------------------------------------------|------------|-------|-------|------|-----------|------|--------|-------|---|
|                                                                            | 182.33     | -0.63 | -7.01 | 32.9 | 0.102E+01 | 0.39 | 137.45 | -6.62 | - |
| 7.01                                                                       | .50696E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 195.98     | -0.84 | -7.01 | 34.3 | 0.976E+00 | 0.40 | 146.01 | -6.61 | - |
| 7.01                                                                       | .51751E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 209.54     | -1.04 | -7.02 | 35.7 | 0.937E+00 | 0.40 | 154.58 | -6.61 | - |
| 7.02                                                                       | .52837E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 223.10     | -1.24 | -7.02 | 37.1 | 0.903E+00 | 0.41 | 163.21 | -6.61 | - |
| 7.02                                                                       | .53959E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 236.74     | -1.45 | -7.02 | 38.4 | 0.871E+00 | 0.42 | 171.92 | -6.61 | - |
| 7.02                                                                       | .55123E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 250.30     | -1.65 | -7.03 | 39.7 | 0.843E+00 | 0.42 | 180.62 | -6.60 | - |
| 7.03                                                                       | .56313E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 263.86     | -1.85 | -7.03 | 41.0 | 0.817E+00 | 0.42 | 189.33 | -6.60 | - |
| 7.03                                                                       | .57535E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 277.42     | -2.04 | -7.03 | 42.2 | 0.793E+00 | 0.43 | 198.05 | -6.60 | - |
| 7.03                                                                       | .58787E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 291.06     | -2.24 | -7.03 | 43.5 | 0.771E+00 | 0.43 | 206.83 | -6.60 | - |
| 7.03                                                                       | .60078E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 304.62     | -2.44 | -7.04 | 44.7 | 0.750E+00 | 0.44 | 215.55 | -6.60 | - |
| 7.04                                                                       | .61390E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 318.18     | -2.63 | -7.04 | 45.8 | 0.731E+00 | 0.44 | 224.27 | -6.60 | - |
| 7.04                                                                       | .62730E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 331.83     | -2.83 | -7.04 | 47.0 | 0.713E+00 | 0.44 | 233.04 | -6.60 | - |
| 7.04                                                                       | .64106E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 345.39     | -3.02 | -7.05 | 48.1 | 0.696E+00 | 0.44 | 241.74 | -6.60 | - |
| 7.05                                                                       | .65500E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 358.94     | -3.22 | -7.05 | 49.2 | 0.681E+00 | 0.45 | 250.43 | -6.60 | - |
| 7.05                                                                       | .66921E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 372.59     | -3.41 | -7.05 | 50.3 | 0.666E+00 | 0.45 | 259.16 | -6.60 | - |
| 7.05                                                                       | .68376E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 386.15     | -3.60 | -7.06 | 51.4 | 0.652E+00 | 0.45 | 267.81 | -6.60 | - |
| 7.06                                                                       | .69846E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 399.71     | -3.79 | -7.06 | 52.5 | 0.638E+00 | 0.45 | 276.45 | -6.61 | - |
| 7.06                                                                       | .71341E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 413.27     | -3.98 | -7.06 | 53.5 | 0.626E+00 | 0.46 | 285.07 | -6.61 | - |
| 7.06                                                                       | .72859E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 426.91     | -4.17 | -7.06 | 54.6 | 0.614E+00 | 0.46 | 293.72 | -6.61 | - |
| 7.06                                                                       | .74410E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 440.47     | -4.35 | -7.07 | 55.6 | 0.603E+00 | 0.46 | 302.30 | -6.61 | - |
| 7.07                                                                       | .75974E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 454.03     | -4.54 | -7.07 | 56.6 | 0.592E+00 | 0.46 | 310.86 | -6.61 | - |
| 7.07                                                                       | .77561E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 467.68     | -4.73 | -7.07 | 57.6 | 0.582E+00 | 0.46 | 319.44 | -6.61 | - |
| 7.07                                                                       | .79179E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 481.24     | -4.91 | -7.08 | 58.6 | 0.572E+00 | 0.46 | 327.95 | -6.61 | - |
| 7.08                                                                       | .80808E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 494.79     | -5.10 | -7.08 | 59.6 | 0.562E+00 | 0.47 | 336.44 | -6.61 | - |
| 7.08                                                                       | .82458E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
| ** REGULATORY MIXING ZONE BOUNDARY **                                      |            |       |       |      |           |      |        |       |   |
| In this prediction interval the plume DOWNSTREAM distance meets or exceeds |            |       |       |      |           |      |        |       |   |
| the regulatory value = 500.00 m.                                           |            |       |       |      |           |      |        |       |   |
| This is the extent of the REGULATORY MIXING ZONE.                          |            |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 508.44     | -5.28 | -7.08 | 60.5 | 0.553E+00 | 0.47 | 344.96 | -6.61 | - |
| 7.08                                                                       | .84139E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |
|                                                                            | 522.00     | -5.46 | -7.09 | 61.5 | 0.545E+00 | 0.47 | 353.39 | -6.62 | - |
| 7.09                                                                       | .85829E+04 |       |       |      |           |      |        |       |   |

|      |            |        |       |      |           |      |        |       |   |
|------|------------|--------|-------|------|-----------|------|--------|-------|---|
|      | 535.56     | -5.65  | -7.09 | 62.4 | 0.537E+00 | 0.47 | 361.81 | -6.62 | - |
| 7.09 | .87539E+04 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 549.12     | -5.83  | -7.09 | 63.3 | 0.529E+00 | 0.47 | 370.20 | -6.62 | - |
| 7.09 | .89268E+04 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 562.76     | -6.01  | -7.09 | 64.3 | 0.521E+00 | 0.47 | 378.62 | -6.62 | - |
| 7.09 | .91028E+04 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 576.32     | -6.19  | -7.10 | 65.2 | 0.514E+00 | 0.47 | 386.96 | -6.62 | - |
| 7.10 | .92794E+04 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 589.88     | -6.37  | -7.10 | 66.1 | 0.507E+00 | 0.48 | 395.28 | -6.62 | - |
| 7.10 | .94579E+04 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 603.53     | -6.55  | -7.10 | 67.0 | 0.500E+00 | 0.48 | 403.62 | -6.63 | - |
| 7.10 | .96394E+04 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 617.09     | -6.73  | -7.10 | 67.9 | 0.494E+00 | 0.48 | 411.89 | -6.63 | - |
| 7.10 | .98215E+04 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 630.65     | -6.90  | -7.11 | 68.8 | 0.487E+00 | 0.48 | 420.14 | -6.63 | - |
| 7.11 | .10005E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 644.29     | -7.08  | -7.11 | 69.6 | 0.481E+00 | 0.48 | 428.41 | -6.63 | - |
| 7.11 | .10192E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 657.85     | -7.26  | -7.11 | 70.5 | 0.475E+00 | 0.48 | 436.60 | -6.63 | - |
| 7.11 | .10379E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 671.41     | -7.43  | -7.12 | 71.4 | 0.469E+00 | 0.48 | 444.77 | -6.63 | - |
| 7.12 | .10568E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 684.97     | -7.61  | -7.12 | 72.2 | 0.464E+00 | 0.48 | 452.92 | -6.63 | - |
| 7.12 | .10759E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 698.61     | -7.79  | -7.12 | 73.0 | 0.459E+00 | 0.48 | 461.10 | -6.64 | - |
| 7.12 | .10952E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 712.17     | -7.96  | -7.12 | 73.9 | 0.453E+00 | 0.49 | 469.20 | -6.64 | - |
| 7.12 | .11146E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 725.73     | -8.13  | -7.13 | 74.7 | 0.448E+00 | 0.49 | 477.27 | -6.64 | - |
| 7.13 | .11341E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 739.38     | -8.31  | -7.13 | 75.5 | 0.444E+00 | 0.49 | 485.38 | -6.64 | - |
| 7.13 | .11539E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 752.94     | -8.48  | -7.13 | 76.3 | 0.439E+00 | 0.49 | 493.41 | -6.64 | - |
| 7.13 | .11737E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 766.50     | -8.65  | -7.13 | 77.2 | 0.434E+00 | 0.49 | 501.41 | -6.65 | - |
| 7.13 | .11937E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 780.14     | -8.82  | -7.14 | 78.0 | 0.430E+00 | 0.49 | 509.45 | -6.65 | - |
| 7.14 | .12140E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 793.70     | -8.99  | -7.14 | 78.8 | 0.425E+00 | 0.49 | 517.41 | -6.65 | - |
| 7.14 | .12342E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 807.26     | -9.16  | -7.14 | 79.5 | 0.421E+00 | 0.49 | 525.35 | -6.65 | - |
| 7.14 | .12547E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 820.82     | -9.33  | -7.15 | 80.3 | 0.417E+00 | 0.49 | 533.26 | -6.65 | - |
| 7.15 | .12752E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 834.47     | -9.50  | -7.15 | 81.1 | 0.413E+00 | 0.49 | 541.21 | -6.65 | - |
| 7.15 | .12961E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 848.03     | -9.67  | -7.15 | 81.9 | 0.409E+00 | 0.49 | 549.08 | -6.66 | - |
| 7.15 | .13169E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 861.59     | -9.84  | -7.15 | 82.7 | 0.405E+00 | 0.50 | 556.93 | -6.66 | - |
| 7.15 | .13379E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 875.23     | -10.01 | -7.16 | 83.4 | 0.402E+00 | 0.50 | 564.80 | -6.66 | - |
| 7.16 | .13591E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
|      | 888.79     | -10.18 | -7.16 | 84.2 | 0.398E+00 | 0.50 | 572.61 | -6.66 | - |
| 7.16 | .13804E+   |        |       |      |           |      |        |       |   |

|         |            |       |       |           |      |        |       |   |
|---------|------------|-------|-------|-----------|------|--------|-------|---|
| 916.00  | -10.51     | -7.16 | 85.7  | 0.391E+00 | 0.50 | 588.21 | -6.67 | - |
| 7.16    | .14234E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 929.56  | -10.68     | -7.17 | 86.4  | 0.388E+00 | 0.50 | 595.95 | -6.67 | - |
| 7.17    | .14450E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 943.11  | -10.84     | -7.17 | 87.2  | 0.384E+00 | 0.50 | 603.67 | -6.67 | - |
| 7.17    | .14668E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 956.67  | -11.01     | -7.17 | 87.9  | 0.381E+00 | 0.50 | 611.37 | -6.67 | - |
| 7.17    | .14886E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 970.32  | -11.17     | -7.17 | 88.6  | 0.378E+00 | 0.50 | 619.10 | -6.67 | - |
| 7.17    | .15108E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 983.88  | -11.34     | -7.18 | 89.4  | 0.375E+00 | 0.50 | 626.76 | -6.67 | - |
| 7.18    | .15329E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 997.44  | -11.50     | -7.18 | 90.1  | 0.372E+00 | 0.50 | 634.40 | -6.68 | - |
| 7.18    | .15552E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1011.08 | -11.66     | -7.18 | 90.8  | 0.369E+00 | 0.50 | 642.07 | -6.68 | - |
| 7.18    | .15777E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1024.64 | -11.83     | -7.18 | 91.5  | 0.366E+00 | 0.50 | 649.67 | -6.68 | - |
| 7.18    | .16002E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1038.20 | -11.99     | -7.19 | 92.2  | 0.363E+00 | 0.50 | 657.24 | -6.68 | - |
| 7.19    | .16228E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1051.85 | -12.15     | -7.19 | 92.9  | 0.360E+00 | 0.50 | 664.85 | -6.68 | - |
| 7.19    | .16456E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1065.41 | -12.31     | -7.19 | 93.6  | 0.358E+00 | 0.51 | 672.39 | -6.69 | - |
| 7.19    | .16685E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1078.97 | -12.48     | -7.19 | 94.3  | 0.355E+00 | 0.51 | 679.91 | -6.69 | - |
| 7.19    | .16914E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1092.53 | -12.64     | -7.20 | 95.0  | 0.353E+00 | 0.51 | 687.42 | -6.69 | - |
| 7.20    | .17145E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1106.17 | -12.80     | -7.20 | 95.7  | 0.350E+00 | 0.51 | 694.95 | -6.69 | - |
| 7.20    | .17378E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1119.73 | -12.96     | -7.20 | 96.4  | 0.348E+00 | 0.51 | 702.41 | -6.69 | - |
| 7.20    | .17611E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1133.29 | -13.12     | -7.20 | 97.1  | 0.345E+00 | 0.51 | 709.86 | -6.70 | - |
| 7.20    | .17845E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1146.94 | -13.28     | -7.21 | 97.8  | 0.343E+00 | 0.51 | 717.33 | -6.70 | - |
| 7.21    | .18081E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1160.50 | -13.44     | -7.21 | 98.4  | 0.340E+00 | 0.51 | 724.74 | -6.70 | - |
| 7.21    | .18317E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1174.06 | -13.59     | -7.21 | 99.1  | 0.338E+00 | 0.51 | 732.13 | -6.70 | - |
| 7.21    | .18554E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1187.70 | -13.75     | -7.21 | 99.8  | 0.336E+00 | 0.51 | 739.55 | -6.70 | - |
| 7.21    | .18794E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1201.26 | -13.91     | -7.22 | 100.4 | 0.334E+00 | 0.51 | 746.91 | -6.71 | - |
| 7.22    | .19033E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1214.82 | -14.07     | -7.22 | 101.1 | 0.331E+00 | 0.51 | 754.25 | -6.71 | - |
| 7.22    | .19273E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1228.38 | -14.23     | -7.22 | 101.8 | 0.329E+00 | 0.51 | 761.57 | -6.71 | - |
| 7.22    | .19515E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1242.03 | -14.38     | -7.22 | 102.4 | 0.327E+00 | 0.51 | 768.91 | -6.71 | - |
| 7.22    | .19758E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1255.59 | -14.54     | -7.23 | 103.1 | 0.325E+00 | 0.51 | 776.20 | -6.71 | - |
| 7.23    | .20002E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1269.15 | -14.70     | -7.23 | 103.7 | 0.323E+00 | 0.51 | 783.47 | -6.72 | - |
| 7.23    | .20246E+05 |       |       |           |      |        |       |   |
| 1282.79 | -14.85     | -7.23 | 104.4 | 0.321E+00 | 0.51 | 790.76 | -6.72 | - |
| 7.23    | .20493E+05 |       |       |           |      |        |       |   |



```
Site name/label:    Myah Tipaza
Design case:       cas_2
FILE NAME:
C:\...cuments\données_stage\simulation_cormix\cas_2.prd
Time stamp:        03/12/2019--17:06:25
```

```

Unbounded section
Single (constant) offshore slope:
SLOPE = 1.14 deg. UA      = 0.020 F      = 0.033 USTAR =0.1281E-
02
UW      = 2.200 UWSTAR=0.2429E-02
Uniform density environment:
STRCND= U      RHOAM = 1026.0400

```

```

BANK  =   LEFT      DISTB =    450.00  HD      =    -    9.00  LEVDIS=    0
D0     =    0.740  A0     =    0.430  H0      =    2.00  SUB0  =    7.00
THETA  =    45.00  SIGMA  =    0.00
U0     =    2.000  Q0     =    0.860              =0.8602E+00
RHO0   = 1051.3560  DRHO0 =-.2532E+02  RHOCW  = 1051.3560  GP0    =-
.2420E+00
C0     =0.3350E+02  CUNITS=   mg/l
IPOLL  =    1      KS     =0.0000E+00  KD      =0.0000E+00

```

```
Q0      =0.8602E+00   M0      =0.1720E+01   J0       =-.2081E+00   SIGNJ0=        -1.0  
Associated length scales (meters)  
LQ      =         0.66   LM      =          3.29   Lm       =          65.58   Lb       =  
26016.26                                     Lmp      =    99999.00   Lbp      =  
99999.00
```

FR0 = 4.73 R = 100.00

[illegible]

```

C0      =0.3350E+02  CUNITS=   mg/l
NTOX    =   0
NSTD    =   0
REGMZ   =   1
REGSPC  =   1          XREG   =      500.00  WREG   =      0.00  AREG   =
0.00
XINT    =   1500.00  XMAX   =   1500.00

```



X-Y-Z COORDINATE SYSTEM:

ORIGIN is located at the WATER SURFACE and:

- 1) directly above the port center for submerged discharges, OR
- 2) at the point of entry into the water for above surface discharges:  
450.00 m from the LEFT bank/shore.

X-axis points downstream, Y-axis points to left, Z-axis points upward.  
NSTEP =100 display intervals per module

BEGIN MOD101: DISCHARGE MODULE

COANDA ATTACHMENT immediately following the discharge.

| X    | Y    | Z     | S   | C         | B    | Uc    | TT         |
|------|------|-------|-----|-----------|------|-------|------------|
| 0.00 | 0.00 | -8.99 | 1.0 | 0.335E+02 | 0.52 | 1.986 | .00000E+00 |

END OF MOD101: DISCHARGE MODULE

BEGIN CORJET (MOD110): JET/PLUME NEAR-FIELD MIXING REGION

Bottom-attached jet motion.

UNSTABLE NEAR-FIELD: Jet/plume will mix over full layer depth.

Following MOD133 will include recirculation into jet region.

Profile definitions:

B = Gaussian 1/e (37%) half-width, normal to trajectory

Half wall jet, attached to bottom.

S = hydrodynamic centerline dilution

C = centerline concentration (includes reaction effects, if any)

Uc = Local centerline excess velocity (above ambient)

TT = Cumulative travel time

| X     | Y    | Z     | S   | C         | B    | Uc    | TT         |
|-------|------|-------|-----|-----------|------|-------|------------|
| 0.00  | 0.00 | -8.99 | 1.0 | 0.335E+02 | 0.41 | 1.986 | .90742E-01 |
| 0.66  | 0.00 | -8.99 | 1.0 | 0.335E+02 | 0.48 | 1.986 | .29624E+00 |
| 1.65  | 0.00 | -8.99 | 1.0 | 0.335E+02 | 0.58 | 1.986 | .66438E+00 |
| 2.63  | 0.00 | -8.99 | 1.1 | 0.301E+02 | 0.69 | 1.986 | .11042E+01 |
| 3.29  | 0.00 | -8.99 | 1.2 | 0.273E+02 | 0.76 | 1.912 | .14372E+01 |
| 4.28  | 0.00 | -8.99 | 1.4 | 0.239E+02 | 0.87 | 1.675 | .19960E+01 |
| 5.27  | 0.00 | -8.99 | 1.6 | 0.213E+02 | 0.97 | 1.491 | .26260E+01 |
| 5.93  | 0.00 | -8.99 | 1.7 | 0.198E+02 | 1.05 | 1.389 | .30854E+01 |
| 6.91  | 0.00 | -8.99 | 1.9 | 0.179E+02 | 1.15 | 1.260 | .38335E+01 |
| 7.90  | 0.00 | -8.99 | 2.0 | 0.164E+02 | 1.26 | 1.153 | .46522E+01 |
| 8.56  | 0.00 | -8.99 | 2.2 | 0.155E+02 | 1.33 | 1.091 | .52371E+01 |
| 9.55  | 0.00 | -8.99 | 2.3 | 0.144E+02 | 1.43 | 1.010 | .61730E+01 |
| 10.54 | 0.00 | -8.99 | 2.5 | 0.134E+02 | 1.53 | 0.940 | .71789E+01 |
| 11.52 | 0.00 | -8.99 | 2.7 | 0.125E+02 | 1.64 | 0.879 | .82546E+01 |
| 12.18 | 0.00 | -8.99 | 2.8 | 0.120E+02 | 1.71 | 0.842 | .90105E+01 |
| 13.17 | 0.00 | -8.99 | 3.0 | 0.113E+02 | 1.81 | 0.793 | .10202E+02 |
| 14.16 | 0.00 | -8.99 | 3.2 | 0.106E+02 | 1.91 | 0.749 | .11463E+02 |
| 14.82 | 0.00 | -8.99 | 3.3 | 0.102E+02 | 1.98 | 0.723 | .12342E+02 |
| 15.80 | 0.00 | -8.99 | 3.4 | 0.972E+01 | 2.09 | 0.686 | .13718E+02 |

|       |      |       |      |           |      |       |            |
|-------|------|-------|------|-----------|------|-------|------------|
| 16.79 | 0.00 | -8.99 | 3.6  | 0.924E+01 | 2.19 | 0.653 | .15163E+02 |
| 17.45 | 0.00 | -8.99 | 3.7  | 0.895E+01 | 2.26 | 0.633 | .16164E+02 |
| 18.44 | 0.00 | -8.99 | 3.9  | 0.855E+01 | 2.36 | 0.605 | .17723E+02 |
| 19.43 | 0.00 | -8.99 | 4.1  | 0.818E+01 | 2.46 | 0.579 | .19350E+02 |
| 20.41 | 0.00 | -8.99 | 4.3  | 0.784E+01 | 2.56 | 0.555 | .21045E+02 |
| 21.07 | 0.00 | -8.99 | 4.4  | 0.763E+01 | 2.63 | 0.540 | .22213E+02 |
| 22.06 | 0.00 | -8.99 | 4.6  | 0.733E+01 | 2.73 | 0.520 | .24021E+02 |
| 23.05 | 0.00 | -8.99 | 4.7  | 0.706E+01 | 2.83 | 0.500 | .25897E+02 |
| 23.71 | 0.00 | -8.99 | 4.9  | 0.689E+01 | 2.90 | 0.488 | .27184E+02 |
| 24.69 | 0.00 | -8.99 | 5.0  | 0.664E+01 | 3.00 | 0.471 | .29172E+02 |
| 25.68 | 0.00 | -8.99 | 5.2  | 0.642E+01 | 3.10 | 0.456 | .31227E+02 |
| 26.34 | 0.00 | -8.99 | 5.3  | 0.627E+01 | 3.17 | 0.446 | .32634E+02 |
| 27.33 | 0.00 | -8.99 | 5.5  | 0.607E+01 | 3.27 | 0.431 | .34799E+02 |
| 28.32 | 0.00 | -8.99 | 5.7  | 0.588E+01 | 3.36 | 0.418 | .37032E+02 |
| 29.30 | 0.00 | -8.99 | 5.9  | 0.570E+01 | 3.46 | 0.406 | .39330E+02 |
| 29.96 | 0.00 | -8.99 | 6.0  | 0.559E+01 | 3.53 | 0.398 | .40900E+02 |
| 30.95 | 0.00 | -8.99 | 6.2  | 0.543E+01 | 3.63 | 0.386 | .43308E+02 |
| 31.94 | 0.00 | -8.99 | 6.4  | 0.527E+01 | 3.73 | 0.376 | .45783E+02 |
| 32.60 | 0.00 | -8.99 | 6.5  | 0.518E+01 | 3.79 | 0.369 | .47469E+02 |
| 33.58 | 0.00 | -8.99 | 6.7  | 0.504E+01 | 3.89 | 0.359 | .50052E+02 |
| 34.57 | 0.00 | -8.99 | 6.8  | 0.490E+01 | 3.99 | 0.350 | .52701E+02 |
| 35.23 | 0.00 | -8.99 | 7.0  | 0.482E+01 | 4.05 | 0.344 | .54503E+02 |
| 36.22 | 0.00 | -8.99 | 7.1  | 0.470E+01 | 4.15 | 0.335 | .57261E+02 |
| 37.21 | 0.00 | -8.99 | 7.3  | 0.458E+01 | 4.25 | 0.327 | .60083E+02 |
| 38.19 | 0.00 | -8.99 | 7.5  | 0.447E+01 | 4.34 | 0.320 | .62969E+02 |
| 38.85 | 0.00 | -8.99 | 7.6  | 0.440E+01 | 4.41 | 0.315 | .64930E+02 |
| 39.84 | 0.00 | -8.99 | 7.8  | 0.430E+01 | 4.50 | 0.308 | .67924E+02 |
| 40.83 | 0.00 | -8.99 | 8.0  | 0.420E+01 | 4.60 | 0.301 | .70982E+02 |
| 41.49 | 0.00 | -8.99 | 8.1  | 0.414E+01 | 4.66 | 0.296 | .73056E+02 |
| 42.47 | 0.00 | -8.99 | 8.3  | 0.405E+01 | 4.76 | 0.290 | .76220E+02 |
| 43.46 | 0.00 | -8.99 | 8.5  | 0.396E+01 | 4.85 | 0.284 | .79448E+02 |
| 44.12 | 0.00 | -8.99 | 8.6  | 0.391E+01 | 4.92 | 0.280 | .81636E+02 |
| 45.11 | 0.00 | -8.99 | 8.8  | 0.383E+01 | 5.01 | 0.274 | .84970E+02 |
| 46.10 | 0.00 | -8.99 | 8.9  | 0.375E+01 | 5.11 | 0.269 | .88366E+02 |
| 47.08 | 0.00 | -8.99 | 9.1  | 0.367E+01 | 5.20 | 0.264 | .91826E+02 |
| 47.74 | 0.00 | -8.99 | 9.2  | 0.363E+01 | 5.26 | 0.260 | .94168E+02 |
| 48.73 | 0.00 | -8.99 | 9.4  | 0.356E+01 | 5.36 | 0.256 | .97732E+02 |
| 49.72 | 0.00 | -8.99 | 9.6  | 0.349E+01 | 5.45 | 0.251 | .10136E+03 |
| 50.38 | 0.00 | -8.99 | 9.7  | 0.345E+01 | 5.52 | 0.248 | .10381E+03 |
| 51.36 | 0.00 | -8.99 | 9.9  | 0.338E+01 | 5.61 | 0.243 | .10754E+03 |
| 52.35 | 0.00 | -8.99 | 10.1 | 0.332E+01 | 5.70 | 0.239 | .11133E+03 |
| 53.01 | 0.00 | -8.99 | 10.2 | 0.328E+01 | 5.76 | 0.236 | .11390E+03 |
| 54.00 | 0.00 | -8.99 | 10.4 | 0.322E+01 | 5.86 | 0.232 | .11779E+03 |
| 54.99 | 0.00 | -8.99 | 10.6 | 0.317E+01 | 5.95 | 0.228 | .12175E+03 |
| 55.97 | 0.00 | -8.99 | 10.8 | 0.312E+01 | 6.04 | 0.225 | .12577E+03 |
| 56.63 | 0.00 | -8.99 | 10.9 | 0.308E+01 | 6.10 | 0.222 | .12848E+03 |
| 57.62 | 0.00 | -8.99 | 11.1 | 0.303E+01 | 6.19 | 0.219 | .13260E+03 |
| 58.61 | 0.00 | -8.99 | 11.2 | 0.298E+01 | 6.29 | 0.215 | .13678E+03 |
| 59.27 | 0.00 | -8.99 | 11.4 | 0.295E+01 | 6.35 | 0.213 | .13961E+03 |
| 60.26 | 0.00 | -8.99 | 11.5 | 0.290E+01 | 6.44 | 0.210 | .14389E+03 |
| 61.24 | 0.00 | -8.99 | 11.7 | 0.286E+01 | 6.53 | 0.206 | .14823E+03 |
| 61.90 | 0.00 | -8.99 | 11.9 | 0.283E+01 | 6.59 | 0.204 | .15116E+03 |
| 62.89 | 0.00 | -8.99 | 12.0 | 0.278E+01 | 6.68 | 0.201 | .15560E+03 |
| 63.88 | 0.00 | -8.99 | 12.2 | 0.274E+01 | 6.77 | 0.198 | .16011E+03 |
| 64.86 | 0.00 | -8.99 | 12.4 | 0.270E+01 | 6.86 | 0.196 | .16467E+03 |
| 65.52 | 0.00 | -8.99 | 12.5 | 0.268E+01 | 6.92 | 0.194 | .16775E+03 |
| 66.51 | 0.00 | -8.99 | 12.7 | 0.264E+01 | 7.01 | 0.191 | .17241E+03 |





|                 |      |       |      |           |      |        |       |   |
|-----------------|------|-------|------|-----------|------|--------|-------|---|
| 118.98          | 0.00 | -9.00 | 26.7 | 0.126E+01 | 1.87 | 44.73  | -7.12 | - |
| 8.99 .12712E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 122.04          | 0.00 | -9.00 | 27.1 | 0.124E+01 | 1.77 | 48.63  | -7.22 | - |
| 8.99 .13967E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 125.10          | 0.00 | -9.00 | 27.5 | 0.122E+01 | 1.69 | 52.45  | -7.30 | - |
| 8.99 .15242E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 128.15          | 0.00 | -9.00 | 27.9 | 0.120E+01 | 1.62 | 56.20  | -7.37 | - |
| 8.99 .16535E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 131.21          | 0.00 | -9.00 | 28.3 | 0.118E+01 | 1.56 | 59.90  | -7.43 | - |
| 8.99 .17847E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 134.27          | 0.00 | -9.00 | 28.7 | 0.117E+01 | 1.51 | 63.55  | -7.48 | - |
| 8.99 .19177E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 137.33          | 0.00 | -9.00 | 29.0 | 0.115E+01 | 1.46 | 67.16  | -7.53 | - |
| 8.99 .20526E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 140.39          | 0.00 | -9.00 | 29.4 | 0.114E+01 | 1.42 | 70.73  | -7.57 | - |
| 8.99 .21892E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 143.44          | 0.00 | -9.00 | 29.8 | 0.112E+01 | 1.39 | 74.28  | -7.61 | - |
| 8.99 .23276E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 146.50          | 0.00 | -9.00 | 30.2 | 0.111E+01 | 1.36 | 77.80  | -7.64 | - |
| 8.99 .24677E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 149.56          | 0.00 | -9.00 | 30.5 | 0.110E+01 | 1.33 | 81.30  | -7.67 | - |
| 8.99 .26096E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 152.62          | 0.00 | -9.00 | 30.9 | 0.108E+01 | 1.30 | 84.79  | -7.69 | - |
| 8.99 .27532E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 155.68          | 0.00 | -9.00 | 31.3 | 0.107E+01 | 1.28 | 88.25  | -7.72 | - |
| 8.99 .28984E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 158.74          | 0.00 | -9.00 | 31.6 | 0.106E+01 | 1.25 | 91.71  | -7.74 | - |
| 8.99 .30453E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 161.79          | 0.00 | -9.00 | 32.0 | 0.105E+01 | 1.23 | 95.15  | -7.76 | - |
| 8.99 .31938E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 164.85          | 0.00 | -9.00 | 32.3 | 0.104E+01 | 1.21 | 98.58  | -7.78 | - |
| 8.99 .33440E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 167.91          | 0.00 | -9.00 | 32.6 | 0.103E+01 | 1.20 | 102.00 | -7.80 | - |
| 8.99 .34957E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 170.97          | 0.00 | -9.00 | 33.0 | 0.102E+01 | 1.18 | 105.42 | -7.81 | - |
| 8.99 .36491E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 174.03          | 0.00 | -9.00 | 33.3 | 0.101E+01 | 1.16 | 108.83 | -7.83 | - |
| 8.99 .38040E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 177.08          | 0.00 | -9.00 | 33.7 | 0.995E+00 | 1.15 | 112.23 | -7.84 | - |
| 8.99 .39605E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 180.14          | 0.00 | -9.00 | 34.0 | 0.986E+00 | 1.14 | 115.63 | -7.86 | - |
| 8.99 .41185E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 183.20          | 0.00 | -9.00 | 34.3 | 0.977E+00 | 1.12 | 119.02 | -7.87 | - |
| 8.99 .42781E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 186.26          | 0.00 | -9.00 | 34.6 | 0.967E+00 | 1.11 | 122.41 | -7.88 | - |
| 8.99 .44391E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 189.32          | 0.00 | -9.00 | 34.9 | 0.959E+00 | 1.10 | 125.80 | -7.89 | - |
| 8.99 .46017E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 192.38          | 0.00 | -9.00 | 35.3 | 0.950E+00 | 1.09 | 129.18 | -7.90 | - |
| 8.99 .47657E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 195.43          | 0.00 | -9.00 | 35.6 | 0.942E+00 | 1.08 | 132.57 | -7.92 | - |
| 8.99 .49312E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 198.49          | 0.00 | -9.00 | 35.9 | 0.934E+00 | 1.07 | 135.95 | -7.93 | - |
| 8.99 .50982E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 201.55          | 0.00 | -9.00 | 36.2 | 0.926E+00 | 1.06 | 139.33 | -7.93 | - |
| 8.99 .52666E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |

|                 |      |       |      |           |      |        |       |   |
|-----------------|------|-------|------|-----------|------|--------|-------|---|
| 204.61          | 0.00 | -9.00 | 36.5 | 0.918E+00 | 1.05 | 142.71 | -7.94 | - |
| 8.99 .54365E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 207.67          | 0.00 | -9.00 | 36.8 | 0.910E+00 | 1.04 | 146.09 | -7.95 | - |
| 8.99 .56077E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 210.72          | 0.00 | -9.00 | 37.1 | 0.903E+00 | 1.03 | 149.48 | -7.96 | - |
| 8.99 .57804E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 213.78          | 0.00 | -9.00 | 37.4 | 0.896E+00 | 1.03 | 152.86 | -7.97 | - |
| 8.99 .59545E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 216.84          | 0.00 | -9.00 | 37.7 | 0.889E+00 | 1.02 | 156.24 | -7.98 | - |
| 8.99 .61300E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 219.90          | 0.00 | -9.00 | 38.0 | 0.882E+00 | 1.01 | 159.62 | -7.98 | - |
| 8.99 .63068E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 222.96          | 0.00 | -9.00 | 38.3 | 0.875E+00 | 1.00 | 163.01 | -7.99 | - |
| 8.99 .64850E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 226.02          | 0.00 | -9.00 | 38.6 | 0.869E+00 | 1.00 | 166.39 | -8.00 | - |
| 8.99 .66646E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 229.07          | 0.00 | -9.00 | 38.9 | 0.862E+00 | 0.99 | 169.78 | -8.00 | - |
| 8.99 .68455E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 232.13          | 0.00 | -9.00 | 39.1 | 0.856E+00 | 0.98 | 173.16 | -8.01 | - |
| 8.99 .70277E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 235.19          | 0.00 | -9.00 | 39.4 | 0.850E+00 | 0.98 | 176.55 | -8.02 | - |
| 8.99 .72113E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 238.25          | 0.00 | -9.00 | 39.7 | 0.844E+00 | 0.97 | 179.95 | -8.02 | - |
| 8.99 .73962E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 241.31          | 0.00 | -9.00 | 40.0 | 0.838E+00 | 0.97 | 183.34 | -8.03 | - |
| 8.99 .75824E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 244.36          | 0.00 | -9.00 | 40.3 | 0.832E+00 | 0.96 | 186.73 | -8.03 | - |
| 8.99 .77699E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 247.42          | 0.00 | -9.00 | 40.5 | 0.826E+00 | 0.95 | 190.13 | -8.04 | - |
| 8.99 .79587E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 250.48          | 0.00 | -9.00 | 40.8 | 0.821E+00 | 0.95 | 193.53 | -8.04 | - |
| 8.99 .81487E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 253.54          | 0.00 | -9.00 | 41.1 | 0.816E+00 | 0.94 | 196.93 | -8.05 | - |
| 8.99 .83400E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 256.60          | 0.00 | -9.00 | 41.3 | 0.810E+00 | 0.94 | 200.34 | -8.06 | - |
| 8.99 .85326E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 259.66          | 0.00 | -9.00 | 41.6 | 0.805E+00 | 0.93 | 203.75 | -8.06 | - |
| 8.99 .87265E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 262.71          | 0.00 | -9.00 | 41.9 | 0.800E+00 | 0.93 | 207.16 | -8.06 | - |
| 8.99 .89216E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 265.77          | 0.00 | -9.00 | 42.1 | 0.795E+00 | 0.92 | 210.57 | -8.07 | - |
| 8.99 .91179E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 268.83          | 0.00 | -9.00 | 42.4 | 0.790E+00 | 0.92 | 213.98 | -8.07 | - |
| 8.99 .93155E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 271.89          | 0.00 | -9.00 | 42.7 | 0.785E+00 | 0.92 | 217.40 | -8.08 | - |
| 8.99 .95142E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 274.95          | 0.00 | -9.00 | 42.9 | 0.780E+00 | 0.91 | 220.82 | -8.08 | - |
| 8.99 .97142E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 278.00          | 0.00 | -9.00 | 43.2 | 0.776E+00 | 0.91 | 224.25 | -8.09 | - |
| 8.99 .99154E+04 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 281.06          | 0.00 | -9.00 | 43.4 | 0.771E+00 | 0.90 | 227.67 | -8.09 | - |
| 8.99 .10118E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 284.12          | 0.00 | -9.00 | 43.7 | 0.767E+00 | 0.90 | 231.10 | -8.09 | - |
| 8.99 .10321E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 287.18          | 0.00 | -9.00 | 44.0 | 0.762E+00 | 0.90 | 234.54 | -8.10 | - |
| 8.99 .10526E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |

|                 |      |       |      |           |      |        |       |   |
|-----------------|------|-------|------|-----------|------|--------|-------|---|
| 290.24          | 0.00 | -9.00 | 44.2 | 0.758E+00 | 0.89 | 237.97 | -8.10 | - |
| 8.99 .10732E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 293.30          | 0.00 | -9.00 | 44.5 | 0.754E+00 | 0.89 | 241.41 | -8.11 | - |
| 8.99 .10939E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 296.35          | 0.00 | -9.00 | 44.7 | 0.749E+00 | 0.88 | 244.85 | -8.11 | - |
| 8.99 .11148E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 299.41          | 0.00 | -9.00 | 44.9 | 0.745E+00 | 0.88 | 248.30 | -8.11 | - |
| 8.99 .11357E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 302.47          | 0.00 | -9.00 | 45.2 | 0.741E+00 | 0.88 | 251.74 | -8.12 | - |
| 8.99 .11568E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 305.53          | 0.00 | -9.00 | 45.4 | 0.737E+00 | 0.87 | 255.19 | -8.12 | - |
| 8.99 .11780E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 308.59          | 0.00 | -9.00 | 45.7 | 0.733E+00 | 0.87 | 258.65 | -8.12 | - |
| 8.99 .11992E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 311.64          | 0.00 | -9.00 | 45.9 | 0.729E+00 | 0.87 | 262.11 | -8.13 | - |
| 8.99 .12206E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 314.70          | 0.00 | -9.00 | 46.2 | 0.726E+00 | 0.86 | 265.57 | -8.13 | - |
| 8.99 .12422E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 317.76          | 0.00 | -9.00 | 46.4 | 0.722E+00 | 0.86 | 269.03 | -8.13 | - |
| 8.99 .12638E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 320.82          | 0.00 | -9.00 | 46.6 | 0.718E+00 | 0.86 | 272.50 | -8.14 | - |
| 8.99 .12855E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 323.88          | 0.00 | -9.00 | 46.9 | 0.715E+00 | 0.85 | 275.97 | -8.14 | - |
| 8.99 .13074E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 326.94          | 0.00 | -9.00 | 47.1 | 0.711E+00 | 0.85 | 279.44 | -8.14 | - |
| 8.99 .13294E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 329.99          | 0.00 | -9.00 | 47.4 | 0.707E+00 | 0.85 | 282.92 | -8.15 | - |
| 8.99 .13514E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 333.05          | 0.00 | -9.00 | 47.6 | 0.704E+00 | 0.85 | 286.40 | -8.15 | - |
| 8.99 .13736E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 336.11          | 0.00 | -9.00 | 47.8 | 0.701E+00 | 0.84 | 289.88 | -8.15 | - |
| 8.99 .13959E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 339.17          | 0.00 | -9.00 | 48.1 | 0.697E+00 | 0.84 | 293.36 | -8.15 | - |
| 8.99 .14183E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 342.23          | 0.00 | -9.00 | 48.3 | 0.694E+00 | 0.84 | 296.85 | -8.16 | - |
| 8.99 .14408E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 345.28          | 0.00 | -9.00 | 48.5 | 0.691E+00 | 0.84 | 300.35 | -8.16 | - |
| 8.99 .14634E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 348.34          | 0.00 | -9.00 | 48.7 | 0.687E+00 | 0.83 | 303.84 | -8.16 | - |
| 8.99 .14862E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 351.40          | 0.00 | -9.00 | 49.0 | 0.684E+00 | 0.83 | 307.34 | -8.16 | - |
| 8.99 .15090E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 354.46          | 0.00 | -9.00 | 49.2 | 0.681E+00 | 0.83 | 310.84 | -8.17 | - |
| 8.99 .15319E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 357.52          | 0.00 | -9.00 | 49.4 | 0.678E+00 | 0.82 | 314.35 | -8.17 | - |
| 8.99 .15550E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 360.57          | 0.00 | -9.00 | 49.6 | 0.675E+00 | 0.82 | 317.86 | -8.17 | - |
| 8.99 .15781E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 363.63          | 0.00 | -9.00 | 49.9 | 0.672E+00 | 0.82 | 321.37 | -8.17 | - |
| 8.99 .16014E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 366.69          | 0.00 | -9.00 | 50.1 | 0.669E+00 | 0.82 | 324.88 | -8.18 | - |
| 8.99 .16247E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 369.75          | 0.00 | -9.00 | 50.3 | 0.666E+00 | 0.81 | 328.40 | -8.18 | - |
| 8.99 .16482E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |
| 372.81          | 0.00 | -9.00 | 50.5 | 0.663E+00 | 0.81 | 331.92 | -8.18 | - |
| 8.99 .16717E+05 |      |       |      |           |      |        |       |   |



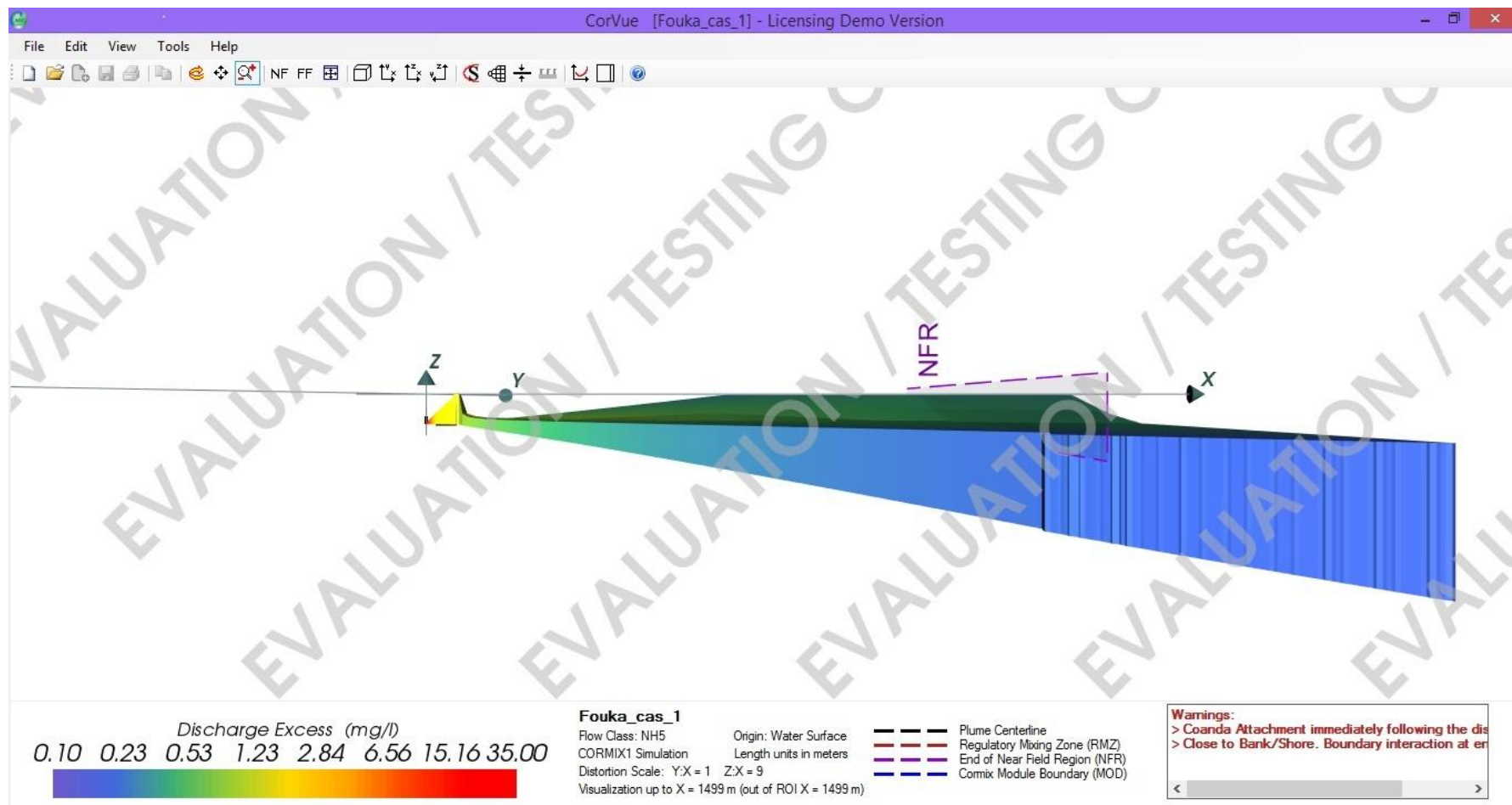




|      |            |        |       |      |           |      |        |       |   |
|------|------------|--------|-------|------|-----------|------|--------|-------|---|
| 9.12 | 710.43     | -6.00  | -9.12 | 67.4 | 0.497E+00 | 0.47 | 599.94 | -8.65 | - |
| 9.12 | .21883E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.12 | 721.33     | -6.21  | -9.12 | 67.8 | 0.494E+00 | 0.47 | 607.70 | -8.65 | - |
| 9.12 | .21990E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.13 | 732.41     | -6.42  | -9.13 | 68.3 | 0.490E+00 | 0.47 | 615.55 | -8.65 | - |
| 9.13 | .22100E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.13 | 743.31     | -6.63  | -9.13 | 68.8 | 0.487E+00 | 0.47 | 623.26 | -8.66 | - |
| 9.13 | .22209E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.14 | 754.22     | -6.83  | -9.14 | 69.3 | 0.484E+00 | 0.47 | 630.94 | -8.66 | - |
| 9.14 | .22318E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.14 | 765.12     | -7.04  | -9.14 | 69.8 | 0.480E+00 | 0.47 | 638.60 | -8.67 | - |
| 9.14 | .22428E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.14 | 776.20     | -7.25  | -9.14 | 70.2 | 0.477E+00 | 0.47 | 646.36 | -8.67 | - |
| 9.14 | .22541E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.15 | 787.10     | -7.46  | -9.15 | 70.7 | 0.474E+00 | 0.47 | 653.98 | -8.67 | - |
| 9.15 | .22652E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.15 | 798.01     | -7.67  | -9.15 | 71.2 | 0.471E+00 | 0.48 | 661.58 | -8.68 | - |
| 9.15 | .22763E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.16 | 809.08     | -7.87  | -9.16 | 71.6 | 0.468E+00 | 0.48 | 669.28 | -8.68 | - |
| 9.16 | .22877E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.16 | 819.99     | -8.08  | -9.16 | 72.1 | 0.465E+00 | 0.48 | 676.84 | -8.69 | - |
| 9.16 | .22990E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.17 | 830.89     | -8.29  | -9.17 | 72.6 | 0.462E+00 | 0.48 | 684.37 | -8.69 | - |
| 9.17 | .23104E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.17 | 841.80     | -8.49  | -9.17 | 73.0 | 0.459E+00 | 0.48 | 691.89 | -8.69 | - |
| 9.17 | .23218E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.17 | 852.87     | -8.70  | -9.17 | 73.5 | 0.456E+00 | 0.48 | 699.51 | -8.70 | - |
| 9.17 | .23334E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.18 | 863.78     | -8.90  | -9.18 | 73.9 | 0.453E+00 | 0.48 | 706.99 | -8.70 | - |
| 9.18 | .23449E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.18 | 874.68     | -9.11  | -9.18 | 74.4 | 0.450E+00 | 0.48 | 714.46 | -8.71 | - |
| 9.18 | .23565E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.19 | 885.76     | -9.32  | -9.19 | 74.8 | 0.448E+00 | 0.48 | 722.02 | -8.71 | - |
| 9.19 | .23683E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.19 | 896.66     | -9.52  | -9.19 | 75.3 | 0.445E+00 | 0.48 | 729.45 | -8.71 | - |
| 9.19 | .23800E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.19 | 907.57     | -9.72  | -9.19 | 75.7 | 0.442E+00 | 0.48 | 736.87 | -8.72 | - |
| 9.19 | .23917E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.20 | 918.64     | -9.93  | -9.20 | 76.2 | 0.440E+00 | 0.48 | 744.38 | -8.72 | - |
| 9.20 | .24037E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.20 | 929.55     | -10.13 | -9.20 | 76.6 | 0.437E+00 | 0.48 | 751.76 | -8.73 | - |
| 9.20 | .24156E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.21 | 940.45     | -10.34 | -9.21 | 77.1 | 0.435E+00 | 0.48 | 759.12 | -8.73 | - |
| 9.21 | .24275E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.21 | 951.36     | -10.54 | -9.21 | 77.5 | 0.432E+00 | 0.48 | 766.47 | -8.73 | - |
| 9.21 | .24394E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.21 | 962.43     | -10.75 | -9.21 | 78.0 | 0.430E+00 | 0.48 | 773.92 | -8.74 | - |
| 9.21 | .24516E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.22 | 973.34     | -10.95 | -9.22 | 78.4 | 0.427E+00 | 0.48 | 781.24 | -8.74 | - |
| 9.22 | .24637E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.22 | 984.24     | -11.15 | -9.22 | 78.8 | 0.425E+00 | 0.48 | 788.54 | -8.74 | - |
| 9.22 | .24758E+05 |        |       |      | </        |      |        |       |   |

|      |            |        |       |      |           |      |        |       |   |
|------|------------|--------|-------|------|-----------|------|--------|-------|---|
| 9.24 | 1017.13    | -11.76 | -9.24 | 80.1 | 0.418E+00 | 0.48 | 810.47 | -8.76 | - |
| 9.24 | .25126E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.24 | 1028.20    | -11.96 | -9.24 | 80.6 | 0.416E+00 | 0.48 | 817.83 | -8.76 | - |
| 9.24 | .25251E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.24 | 1039.11    | -12.16 | -9.24 | 81.0 | 0.414E+00 | 0.48 | 825.06 | -8.76 | - |
| 9.24 | .25375E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.25 | 1050.01    | -12.36 | -9.25 | 81.4 | 0.411E+00 | 0.48 | 832.28 | -8.77 | - |
| 9.25 | .25499E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.25 | 1060.92    | -12.56 | -9.25 | 81.8 | 0.409E+00 | 0.48 | 839.48 | -8.77 | - |
| 9.25 | .25624E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.26 | 1071.99    | -12.77 | -9.26 | 82.3 | 0.407E+00 | 0.48 | 846.79 | -8.77 | - |
| 9.26 | .25751E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.26 | 1082.90    | -12.97 | -9.26 | 82.7 | 0.405E+00 | 0.48 | 853.96 | -8.78 | - |
| 9.26 | .25877E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.26 | 1093.81    | -13.17 | -9.26 | 83.1 | 0.403E+00 | 0.48 | 861.13 | -8.78 | - |
| 9.26 | .26003E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.27 | 1104.88    | -13.37 | -9.27 | 83.5 | 0.401E+00 | 0.48 | 868.39 | -8.79 | - |
| 9.27 | .26132E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.27 | 1115.79    | -13.57 | -9.27 | 83.9 | 0.399E+00 | 0.48 | 875.53 | -8.79 | - |
| 9.27 | .26259E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.28 | 1126.69    | -13.77 | -9.28 | 84.4 | 0.397E+00 | 0.48 | 882.66 | -8.79 | - |
| 9.28 | .26386E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.28 | 1137.77    | -13.97 | -9.28 | 84.8 | 0.395E+00 | 0.48 | 889.88 | -8.80 | - |
| 9.28 | .26517E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.28 | 1148.67    | -14.17 | -9.28 | 85.2 | 0.393E+00 | 0.48 | 896.99 | -8.80 | - |
| 9.28 | .26645E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.29 | 1159.58    | -14.37 | -9.29 | 85.6 | 0.391E+00 | 0.48 | 904.08 | -8.80 | - |
| 9.29 | .26774E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.29 | 1170.48    | -14.56 | -9.29 | 86.0 | 0.390E+00 | 0.48 | 911.15 | -8.81 | - |
| 9.29 | .26904E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.30 | 1181.56    | -14.76 | -9.30 | 86.4 | 0.388E+00 | 0.48 | 918.33 | -8.81 | - |
| 9.30 | .27036E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.30 | 1192.46    | -14.96 | -9.30 | 86.8 | 0.386E+00 | 0.48 | 925.38 | -8.82 | - |
| 9.30 | .27166E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.30 | 1203.37    | -15.16 | -9.30 | 87.2 | 0.384E+00 | 0.48 | 932.43 | -8.82 | - |
| 9.30 | .27297E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.31 | 1214.44    | -15.36 | -9.31 | 87.6 | 0.382E+00 | 0.48 | 939.57 | -8.82 | - |
| 9.31 | .27431E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.31 | 1225.35    | -15.56 | -9.31 | 88.0 | 0.381E+00 | 0.48 | 946.59 | -8.83 | - |
| 9.31 | .27563E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.31 | 1236.25    | -15.75 | -9.31 | 88.4 | 0.379E+00 | 0.48 | 953.60 | -8.83 | - |
| 9.31 | .27695E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.32 | 1247.33    | -15.95 | -9.32 | 88.8 | 0.377E+00 | 0.49 | 960.71 | -8.83 | - |
| 9.32 | .27830E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.32 | 1258.23    | -16.15 | -9.32 | 89.2 | 0.375E+00 | 0.49 | 967.69 | -8.84 | - |
| 9.32 | .27963E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.33 | 1269.14    | -16.35 | -9.33 | 89.6 | 0.374E+00 | 0.49 | 974.67 | -8.84 | - |
| 9.33 | .28097E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.33 | 1280.04    | -16.54 | -9.33 | 90.0 | 0.372E+00 | 0.49 | 981.64 | -8.84 | - |
| 9.33 | .28231E+05 |        |       |      |           |      |        |       |   |
| 9.33 | 1291.12    | -16.74 | -9.33 | 90.4 | 0.370E+00 | 0.49 | 988.70 | -8.85 |   |





**Figure 13 :** Simulation numérique sur CORMIX de la dispersion du panache de saumure de la station de Fouka 1

***Publication scientifique***



# Assessment of coastal water characteristics near brine discharge sites by applying multivariate statistical techniques and GIS, case study from Boulsmail Bay, Algeria

Amina Amel Adem<sup>1</sup> · Fouzia Houma Bachari<sup>1</sup> · Boualem Hamdi<sup>2</sup> · Yasmine Belkacem<sup>1,3</sup> · Nour El Islam Bachari<sup>4</sup>

Received: 21 June 2023 / Accepted: 24 August 2023

© The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature Switzerland AG 2023

## Abstract

This study was carried out to assess the environmental conditions of coastal water near the brine discharge site of the Myah Tipaza desalination plant. About 50 surface seawater samples were collected from the area of the disposal site and analyzed during the spring of 2016, the autumn of 2016, the summer of 2017, and the winter of 2018. The results of the physicochemical analysis revealed a strong variation in space and time for some parameters measured (salinity, conductivity, chlorides, dissolved oxygen, suspended particulate matter, and current). The inverse distance weighting method (IDW) illustrated the highest values for salinity (39.94 psu), electrical conductivity (57.51 mS/cm), suspended particulate matter (14.62 mg/L), total dissolved solids (40,002 mg/L), and chloride (31,510 mg/L) in the immediate area around the brine outfall during the autumn and summer seasons. The correlation analysis shows that the relationships between the physicochemical parameters are different between the four surveys. The Hierarchical cluster analysis grouped the stations into four main clusters on the basis of their distance from the brine discharge point. Based on the obtained data, the seawater quality of the selected coastal area is sensitive and could be influenced by the brine outfall of this large-scale desalination plant.

**Keywords** Desalination plant · Brine discharge · Multivariate statistics · Seawater quality · GIS · Algeria

## Introduction

Algeria, like many other Middle Eastern and North African countries, is and will be confronted with crucial problems related to drought and water shortages (Sadi and Kehal 2003; Drouiche et al. 2012; Haied et al. 2023). This region

is one of the 33 countries most affected by water stress in the world (Maddocks and Reig 2015; Kahlerras et al. 2018; Belhassan 2022) due to its limited natural water resources, irregular rainfall, population growth, pollution, and steady rise in agriculture and industry (Djoukbala et al. 2019; Petrakis et al. 2020; Libanda 2023). In addition to these factors, climate change will contribute to additional pressure on water resources (Elamine et al. 2022; Tarekegn et al. 2022), prompting the use of non-conventional resources such as reusing wastewater, harvesting rainwater, demineralizing brackish water, and desalinating seawater (Salami et al. 2016; Hussain et al. 2019; Morote et al. 2019; Farsi and Rosen 2022).

In Algeria, to face water scarcity and address the issues of water access, the government launched in 2002 an extensive program that involved building desalination plants along the 1600 km of Algerian coastline (Bessenasse et al. 2010; Drouiche et al. 2022) to achieve a target production of one billion cubic meters of water per year by 2030 (Hamiche et al. 2020a).

According to Algerian Energy Company reports, 11 large-scale seawater desalination plants are currently operational

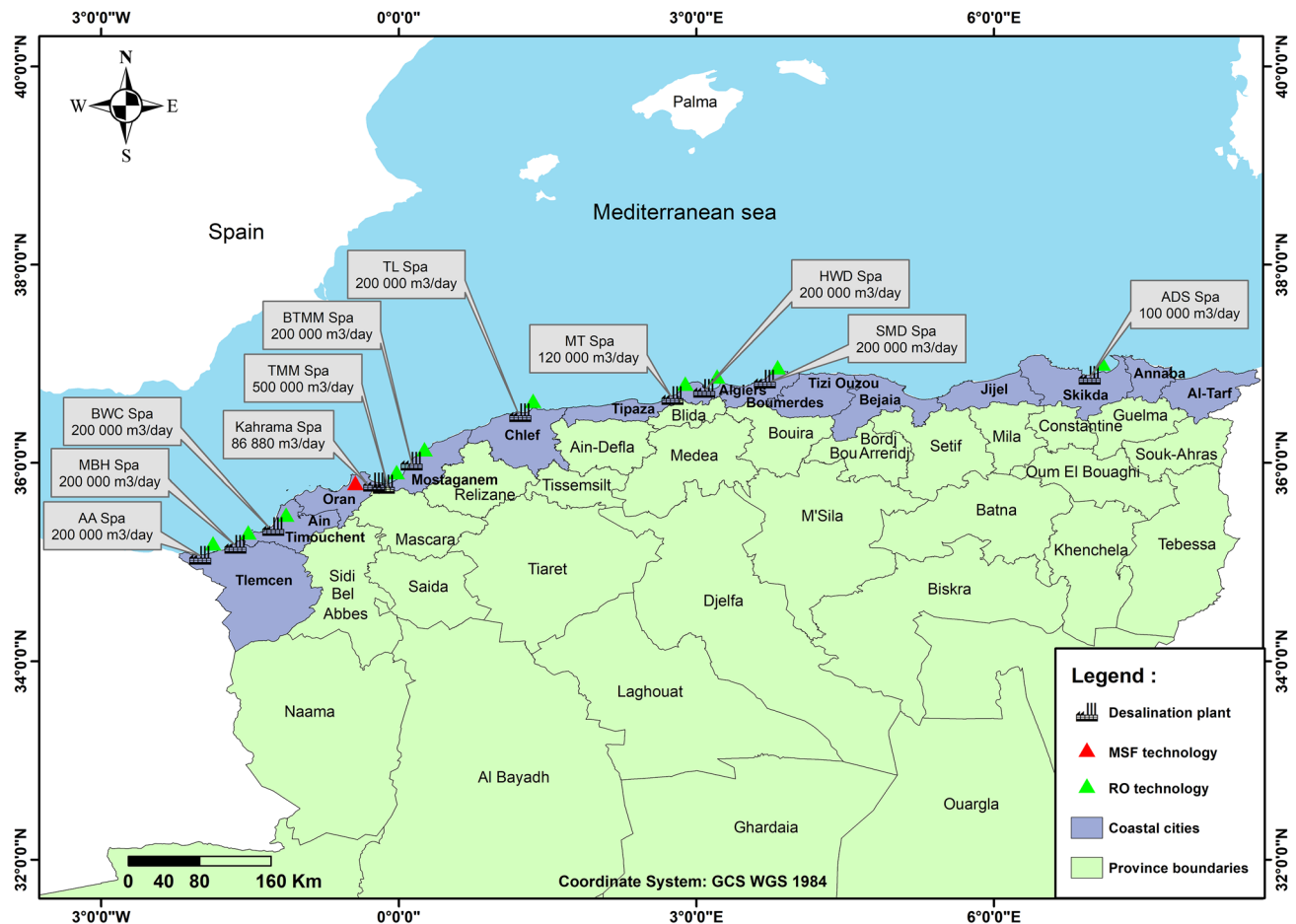
✉ Amina Amel Adem  
adem.amina.amel@gmail.com

<sup>1</sup> ECOSYSMarl: Laboratory of marine and Coastal Ecosystems, National Higher School of Marine Sciences and Coastal Management (ENSSMAL), B.P 19 University Campus of Dely Ibrahim, 16320 Algiers, Algeria

<sup>2</sup> National Higher School of Marine Sciences and Coastal Management (ENSSMAL), B.P 19 University Campus of Dely Ibrahim, 16320 Algiers, Algeria

<sup>3</sup> National Center for Research and Development of Fisheries and Aquaculture (CNRDPA), 11 Street Colonel Amirouche, Tipaza, Bou-Ismaïl, Algeria

<sup>4</sup> Faculty of Biological Sciences, University of Science and Technology of Houari Boumedien (USTHB), B.P 32 El Alia, Bab Ezzouar, 16111 Algiers, Algeria



**Fig. 1** Distribution of operational large-scale desalination plants and production capacity ( $\text{m}^3/\text{day}$ ) along the Mediterranean Algerian coastline

in nine coastal cities, with production capacities ranging from 70,000 to 500,000  $\text{m}^3/\text{day}$  (Fig. 1).

The majority of these facilities are based on the process of reverse osmosis (Fodhil et al. 2019). In 2021, the total production was estimated at 561 million  $\text{m}^3/\text{year}$ , which is about 17% of the national water consumption (Oulmane 2022), besides the seven small-scale units that can produce up to 12,500  $\text{m}^3/\text{day}$  (Naimi-Ait-Aoudia and Berezowska-Azzag 2014). Desalination is expected to contribute 1000  $\text{m}^3/\text{day}$  by 2030, with an accumulated production of five billion  $\text{m}^3$  by the end of 2020, representing at least 50% of national water consumption by 2030 (Hamiche et al. 2015). Thus, desalination technology has become a strategic alternative, almost indispensable for providing drinking water and avoid freshwater crisis in Algeria (Hamiche et al. 2020b; Zolghadr-Asli et al. 2023).

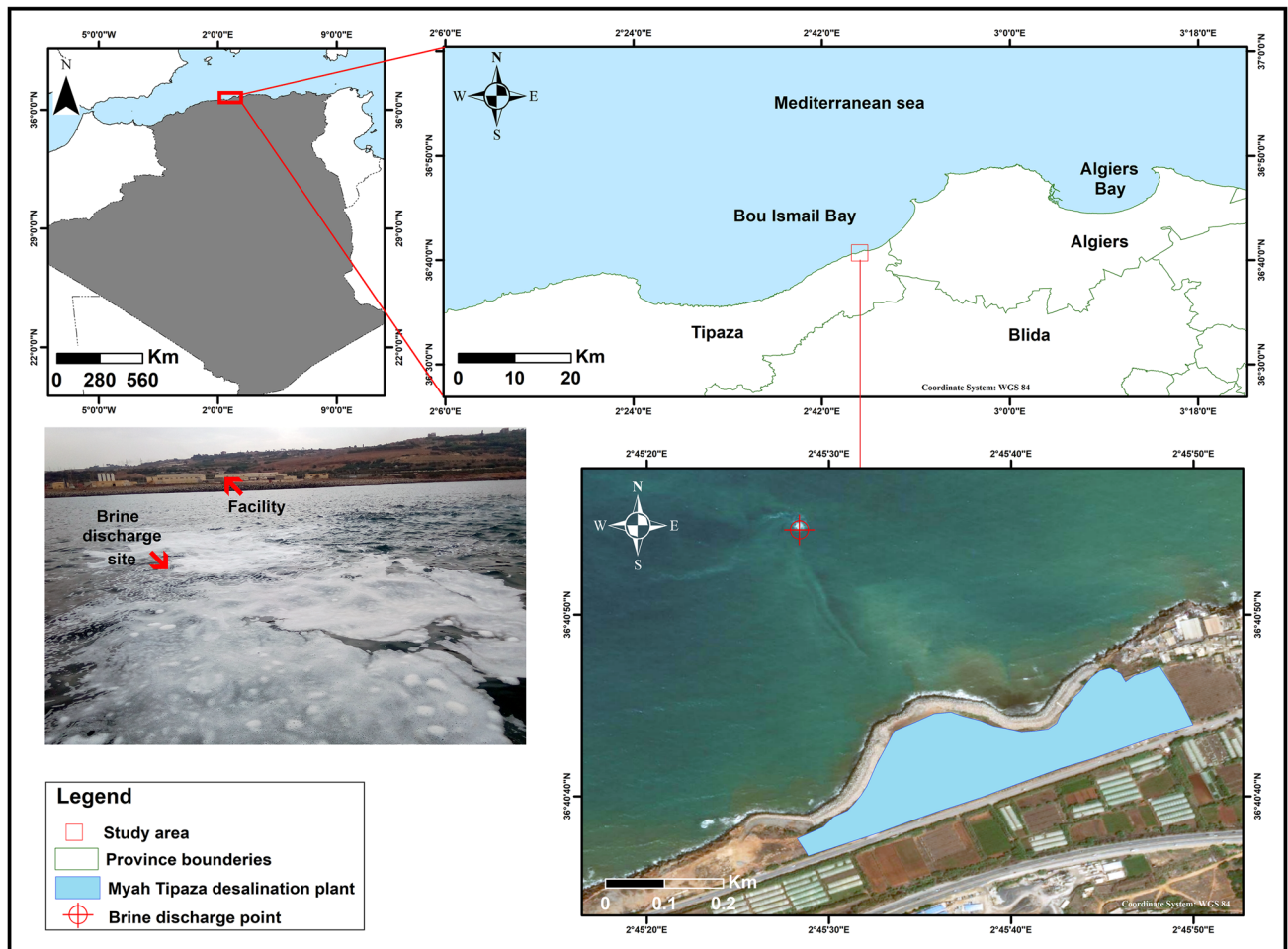
Despite its benefits, the desalination process has some serious disadvantages. It could lead to negative environmental effects, including land-use changes, energy consumption, acoustic and atmospheric contamination, and marine

pollution (Baalousha 2016; Alshahri 2017; Aziz and Hana-fiah 2021; Yang and Wang 2023).

Impacts on the receiving marine ecosystem result mainly from brine discharge, whose composition, concentration, and rate depend on the desalination process used (Mohamed et al. 2005; Alameddine and El-Fadel 2007; Fernández-Torquemada and Luis Sánchez-Lizaso 2007). In the reverse osmosis desalination process, hypersaline effluents contain highly concentrated salts approximately 1.5–2 times higher than natural seawater (Cambridge et al. 2017; Sahu 2021).

The by-products may include organic and inorganic compounds, toxic antifoulants, antiscalants, lime, and biocides (Roberts et al. 2010; Kress et al. 2020), such as chlorine and sulfuric acid used pre- and post-chemical treatment (Al-Mutaz 1991). Heavy metals such as nickel, copper, molybdenum, iron, and zinc generated by corrosion can also be found in brine water (Almubarak 2020). These unavoidable substances are frequently discharged into the sea without treatment through outfall channels, open pipes, or diffuser systems (Loya-Fernández et al. 2012; Petersen et al. 2019).





**Fig. 2** Geographic map showing the locations of Myah Tipaza desalination plant and brine discharge site

**Table 1** Technical details of the Myah Tipaza desalination plant (Taibi 2016; Filali et al. 2018; Tigrine et al. 2018)

|                                           |                                                                                         |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Builders                                  | SNC-Lavalin Internacional Espana S.A.U—Acciona Agua, S.A.U., Union Temporal de Empresas |
| Operators                                 | MYAH TIPAZA SPA                                                                         |
| Main sponsors                             | Algerian Energy Company—SNC-Lavalin International (Canada)—Acciona Agua (Spain)         |
| Investment cost                           | \$185 Million                                                                           |
| Date of construction                      | May 2007                                                                                |
| Start of operation                        | July 2011                                                                               |
| Designed capacity                         | 120,000 m <sup>3</sup> /day                                                             |
| Process                                   | Seawater reverse osmosis                                                                |
| Recovery                                  | 45%                                                                                     |
| Components                                | 6 modules with a daily production of 20,000 m <sup>3</sup> /unit                        |
| Discharge method (distance m and depth m) | Outfall with diffuser (450, 7)                                                          |
| Discharge velocity                        | 1 m/s                                                                                   |

**Table 2** Physical and chemical properties of brine effluents produced by Myah Tipaza desalination plant (Taibi 2016; Temmar 2016; Amitouche et al. 2017; Rezim and Tachetaoui 2020)

| Parameter                                    | Unit    | Raw water<br>Mean | Brine<br>Minimum/maximum | Standards<br>(OJAR<br>2006) |
|----------------------------------------------|---------|-------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Temperature (T)                              | °C      | 19.7              | 17.10/21.90              | < 30.0                      |
| Salinity (Sal)                               | psu     | 38.8              | 36.50/55.10              | –                           |
| Electric conductivity (EC)                   | (mS/cm) | 52.2              | 53.20/94.90              | –                           |
| pH                                           |         | 8.1               | 6.90/8.29                | 5.5 – 8.5                   |
| Dissolved oxygen (DO)                        | mg/L    | –                 | 9.00                     | –                           |
| TDS                                          | mg/L    | 38,593.0          | 55,440.00/70,540.00      | –                           |
| Calcium (Ca <sup>2+</sup> )                  | mg/L    | 503.7             | 310.00/915.30            | –                           |
| Magnesium (Mg <sup>2+</sup> )                | mg/L    | 1,574.2           | 930.00/2,860.70          | –                           |
| Sodium (Na <sup>+</sup> )                    | mg/L    | 11,543.5          | 63.00/20,936.20          | –                           |
| Potassium (K)                                | mg/L    | 461.6             | 836.70/890.00            | –                           |
| Carbonate (CO <sub>3</sub> )                 | mg/L    | 4.8               | 0.00/0.40                | –                           |
| Bicarbonate (HCO <sub>3</sub> <sup>−</sup> ) | mg/L    | 150.5             | 145.00/231.30            | –                           |
| Nitrate (NO <sub>3</sub> <sup>−</sup> )      | mg/L    | 0.1               | 0.20/10.00               | –                           |
| Sulphate (SO <sub>4</sub> )                  | mg/L    | 2,811.7           | 5,155.30/5,820.00        | –                           |
| Silica (SiO <sub>2</sub> )                   | mg/L    | 1.0               | 0.00/1.80                | –                           |
| Iron (Fe)                                    | mg/L    | 1.3               | 0.02/2.40                | 3.0                         |
| Chloride (Cl <sup>−</sup> )                  | mg/L    | 21,527.0          | 20,750.00/39,055.00      | –                           |
| SPM                                          | mg/L    | 5.8               | 4.60/21.40               | 35.0                        |
| Turbidity                                    | NTU     | –                 | 0.10/0.39                | –                           |
| Alkalinity (CaCO <sub>3</sub> )              | mg/L    | 134.0             | 145.00/1,000.00          | –                           |

– Not fixed

Numerous scientists draw attention to the environmental impact of desalination (Rosner et al. 2023), and today it is widely acknowledged that reverse osmosis concentrate discharge that tends to remain on the bottom could potentially damage the local marine ecosystem and impair seawater quality by affecting some abiotic factors, such as salinity, temperature, pH, and turbidity (Belatoui et al. 2017; Misimer and Maliva 2018).

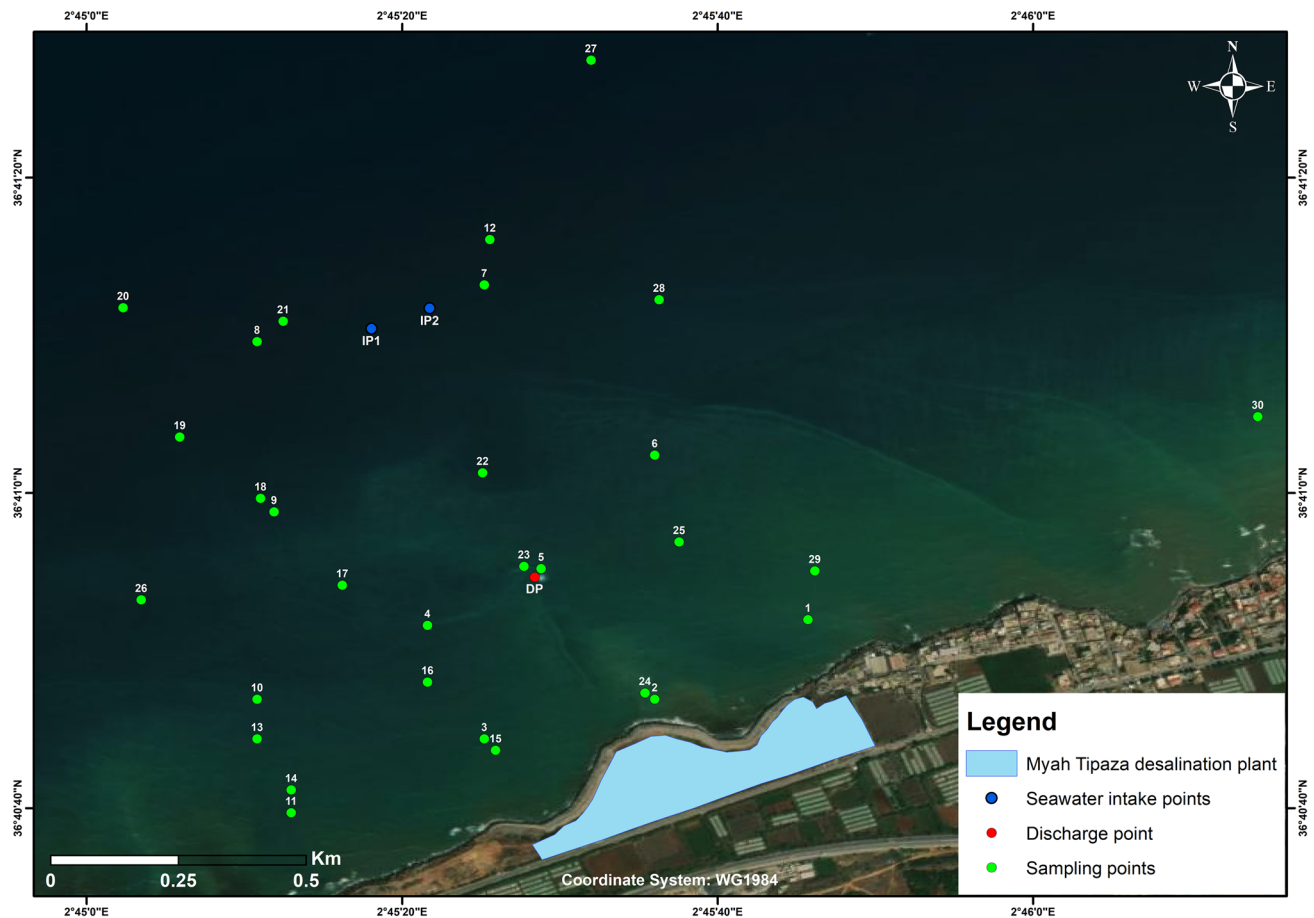
The degree of degradation caused by these hypersaline effluents will depend, among other factors, on the bathymetry and hydrological properties of the receiving water, rejected brine characteristics, and above all, disposal system configuration (Einav and Lokiec 2003; Fernández-Torquemada and Luis Sánchez-Lizaso 2007; Alameddine and El-Fadel 2007).

To prevent the environmental footprints of desalination discharges, brine dispersion modeling is often required (Elsaie et al. 2022). The assessment of the mixing process can be performed using numerical simulation software like MIKE21 (Jin et al. 2023), CORMIX (Palomar 2011), and Delft3d (Filali and Bessenasse 2018; Aljohani et al. 2022). Numerical models are useful to study the adverse impacts

of brine discharge and optimize the design of outfall systems, but this requires accurate inputs, including effluent properties and ambient conditions (Filali and Bessenasse 2018), due to the complexity of the various factors (e.g., bathymetry, wave energy, orbital velocity) that affect the brine behaviour and its dilution in the ocean water (Voutchkov 2011; Loya-Fernández et al. 2012; Petersen et al. 2019; Aljohani et al. 2022).

Several authors have investigated the environmental impacts of desalination facilities along the Algerian coast, but studies remain limited (Benaissa et al. 2017). For example, Filali and Bessenasse (2018) simulated the dispersion of brine from the Myah Tipaza desalination plant using the CORMIX and Delft-3D models. However, this study requires the calibration of models by integrating data about environmental conditions and monitoring the quality of coastal water in the surrounding area of the discharge point to test the effectiveness of the outfall system.

In the current study, the properties of seawater near the Myah Tipaza desalination facility were investigated through a combination of physicochemical analysis, multivariate statistical methods, and geostatistical techniques. So, to provide



**Fig. 3** Aerial view of the Myah Tipaza desalination plant site and location of sampling points

the necessary calibration data and identify the area that may be affected by brine discharge, we have used a deterministic spatial interpolation model. It's based on the inverse distance weighting interpolation method (IDW) and implemented in the GIS packages (Maleika 2020).

## Materials and methods

### Study area description

The investigated area is located in the vicinity of the Myah Tipaza seawater reverse osmosis plant, situated on the Mediterranean coast in Bou Ismail Bay. This large-scale desalination facility is 35 km west of Algiers City in Tipaza

province at the following GPS coordinates: 36° 40' 41.57" north latitude and 2° 45' 36.72" west longitude (Fig. 2). The desalination plant has been operating since July 2011 and produces 120,000 m<sup>3</sup>/day of fresh drinking water with a conversion rate of 45%. It covers the drinking water needs of the western region of Algiers and the eastern Tipaza Province (Tigrine et al. 2018).

The raw water is conveyed to the plant through two pipelines manufactured from high-density polyethylene material measuring 1600 mm in diameter and 900 m in length. These two seawater intakes are located at depths of 8 m and 10 m. Additional details about this desalination unit are given in Table 1.

According to Taibi (2016) and Filali and Bessenasse (2018), the Myah Tipaza desalination plant generates

**Table 3** Characteristics of sampling points in the study area during the four sampling times (1: May 2016, 2: September 2016, 3: August 2017, 4: December 2018)

| Station code | GPS coordinates; WGS 84 |             | Distance from outfall (m) | Sampling time |
|--------------|-------------------------|-------------|---------------------------|---------------|
|              | Latitude (N)            | Longitude E |                           |               |
| 1            | 36.68110                | 2.76270     | 435                       | 1, 2, 3       |
| 2            | 36.67970                | 2.76000     | 300                       | 1, 2, 3       |
| 3            | 36.67900                | 2.75700     | 322                       | 1, 2, 3       |
| 4            | 36.68100                | 2.75600     | 193                       | 1, 2, 3       |
| 5            | 36.68200                | 2.75800     | 22                        | 1, 2, 3       |
| 6            | 36.68400                | 2.76000     | 306                       | 1, 2, 3       |
| 7            | 36.68700                | 2.75700     | 581                       | 1, 2, 3       |
| 8            | 36.68600                | 2.75300     | 638                       | 1, 2, 3       |
| 9            | 36.68300                | 2.75330     | 432                       | 3             |
| 10           | 36.67970                | 2.75300     | 497                       | 3             |
| 11           | 36.67770                | 2.75360     | 596                       | 3             |
| 12           | 36.68780                | 2.75710     | 668                       | 4             |
| 13           | 36.67900                | 2.75300     | 537                       | 4             |
| 14           | 36.67810                | 2.75360     | 563                       | 4             |
| 15           | 36.67880                | 2.75720     | 340                       | 4             |
| 16           | 36.68000                | 2.75600     | 263                       | 4             |
| 17           | 36.68171                | 2.75450     | 304                       | 4             |
| 18           | 36.68324                | 2.75306     | 461                       | 4             |
| 19           | 36.68432                | 2.75164     | 625                       | 4             |
| 20           | 36.68660                | 2.75064     | 838                       | 4             |
| 21           | 36.68636                | 2.75346     | 642                       | 4             |
| 22           | 36.68369                | 2.75697     | 224                       | 4             |
| 23           | 36.68204                | 2.75770     | 31                        | 4             |
| 24           | 36.67981                | 2.75983     | 280                       | 4             |
| 25           | 36.68247                | 2.76043     | 237                       | 4             |
| 26           | 36.68145                | 2.75096     | 621                       | 4             |
| 27           | 36.69096                | 2.75888     | 1018                      | 4             |
| 28           | 36.68674                | 2.76008     | 580                       | 4             |
| 29           | 36.68196                | 2.76282     | 439                       | 4             |
| 30           | 36.68468                | 2.77062     | 1,180                     | 4             |
| RS1          | 36.70100                | 2.80200     | 4,477                     | 1             |
| RS2          | 36.71700                | 2.74100     | 4,185                     | 2             |
| RS3          | 36.72460                | 2.75591     | 4,749                     | 3             |
| RS4          | 36.76069                | 2.81344     | 10,057                    | 4             |

146,667 m<sup>3</sup>/day of concentrate, which is channelled through a pipeline with a diffuser installed at a depth of 7 m (450-m length and a 1,400-mm diameter).

The effluent composition of the Myah Tipaza facility is shown in Table 2. Wastewater produced by this desalination plant is characterized by elevated levels of total dissolved solids (TDS), bicarbonates, nitrate, sulphates, iron, chloride (Cl<sup>-</sup>), and suspended particulate matter (SPM) compared to the raw water. The values of temperature (T), pH, iron, and SPM are below the standards (Table 2) related to industrial

liquid discharges established in the *Official Journal of the Algerian Republic* (OJAR 2006).

### Sampling collecting and analysis

The major objective of this paper is to investigate the environmental conditions of the study area. To achieve this, wind speed records were derived from the Bouharoun synoptic weather station, which is located at 36° 37' 33.1360" N and 02° 39' 24.259" E to the west of the study area and covers the period from January 2005 to December 2018.

In this research, four sampling campaigns were performed to characterize the physicochemical quality of the coastal water at the brine discharge site of the Myah Tipaza desalination plant. Fifty surface seawater samples were collected from the influence zone (Fig. 3) in 5-L Niskin bottles at a depth of 1 m in spring (May 2016), autumn (September 2016), summer (August 2017), and winter (December 2018). During the surveys, the stations (Table 3) were positioned using a GRMIN 72 H GPS, and three replicates of 1.5 L were collected at each sampling point.

The water temperature, salinity, electrical conductivity (EC), dissolved oxygen (DO), and pH were measured in situ with a multi-parameter sonde (Hanna HI 9829) that was previously calibrated. The samples were stored in polyethylene bottles and stored in an Icebox at 4 °C before analysis in the laboratory.

The TDS, Cl, and SPM measurements were carried out, where possible, according to the protocol described by Rodier et al. (2016), the Afnor (2002) standards NF T90-029, and Aminot and Chaussepied (1983).

During the winter, near-surface current velocity was also measured directly using a Valeport (model 108) electromagnetic current meter. In order to obtain more accurate information on hydrodynamic conditions, the current data were derived from the operational Mercator global ocean analysis and forecast system at 1/12 degree, which provides 10 days of 3-D global ocean forecasts that are updated daily and are available through the Copernicus marine environment monitoring service website (<https://data.marine.copernicus.eu/products>), spanning the period from January 2016 to December 2018. The wave climate dataset was retrieved from a database developed by Amarouche et al. (2019). It consists of a 10-year (2008–2018) wave hindcast over the West Mediterranean Sea generated with the Simulating Wave Nearshore (SWAN) model version 41.20 forced by the Climate Forecast System Reanalysis (CSFR) winds, previously calibrated and validated (Amarouche et al. 2020).

## Statistical and geospatial analysis approaches

In this study, the results of eight physicochemical parameters, including T, Sal, EC, pH, DO, SPM, TDS, and Cl, were examined using multivariate statistical analysis. To simplify the data structure and establish relationships between physicochemical parameters (Mukherjee et al. 2018), Pearson's correlations, principal component analysis (PCA), and hierarchical cluster analysis (HCA) are commonly used in the natural sciences and water chemistry (Helstrup et al. 2007; Shammi et al. 2017). Data were also processed by hierarchical cluster analysis (HCA) using Ward's method in order to identify groupings in sampling stations (Almasoud et al. 2015; Mukherjee et al. 2018). All statistical analysis was computed using the software R, version 4.2.1 (RCoreTeam 2018).

The inverse distance weighting interpolation (IDW) technique was also used. Based on the concept of distance weighting, this method is used to estimate unknown data (Maleika 2020).

The IDW was performed using ArcGIS 10.4 software for mapping the spatial distributions of different measured variables of surface seawater and assessing the spatial influence of brine in the vicinity of the Myah Tipaza desalination plant.

## Results

### Wind and hydrodynamic conditions

Wind data obtained from the Algerian Meteorological Service is given in Fig. 4. The wind rose indicates that winds are predominantly westerly (7.7% in sector 270) and north–north-easterly (6.2% in sector 30), with a yearly average speed of 2.2 m/s.

Over the study period, surface current had an average speed of 0.1 m/s in spring with a northeast direction (Fig. 5a) and flowed from the east and northeast with an intensity of 0.01–0.20 m/s in autumn (Fig. 5b). During summer, surface currents flow eastward with speeds reaching more than 0.20 m/s (Fig. 5c).

The current velocity measured during the winter season is shown in Fig. 6. Near-surface currents move towards the west and southwest with average velocity of 0.11 m/s.

### Physicochemical characteristics of seawater and spatial distribution of parameters

The results of the physicochemical parameter measurements for coastal water samples collected from the thirty stations

during spring, autumn, summer and winter are given in Table 4 (Fig. 7).

During the four sampling times, the sea surface temperature ranged from 17.19 to 27.66 °C with an average of  $21.92 \pm 4.22$  °C (Table 4). The minimum was recorded in winter (December 2018), and the maximum was recorded in summer (August 2017). The spatial distributions of surface temperature during spring 2016, autumn 2016, summer 2017 and winter 2018 as presented in Fig. 8a–d, respectively, were fairly homogeneous.

The average salinity of sea surface waters was  $37.09 \pm 0.74$  psu; the lowest value of 36.49 psu was recorded in winter, while peaks were observed during autumn and summer (Table 4). The highest values of 39.69 and 39.94 psu were observed at stations 4 and 5 (Fig. 9b and Fig. 9c).

EC values ranged from 46.80 mS/cm and 57.51 mS/cm (Table 4) as minimum and maximum records for winter and summer, respectively. The conductivity showed high temporal and spatial variability, with an average of  $51.60 \pm 3.77$  mS/cm. The maximum recorded in summer at station 5 (Fig. 10c).

The spatial distribution of pH (Fig. 11) showed weak variation; the values of pH in the investigated site ranged from 7.98 to 8.61, with an average of  $8.19 \pm 0.12$  (Table 4). In summer, the lowest surface pH measured was recorded at station 5, while the highest was observed at station 8.

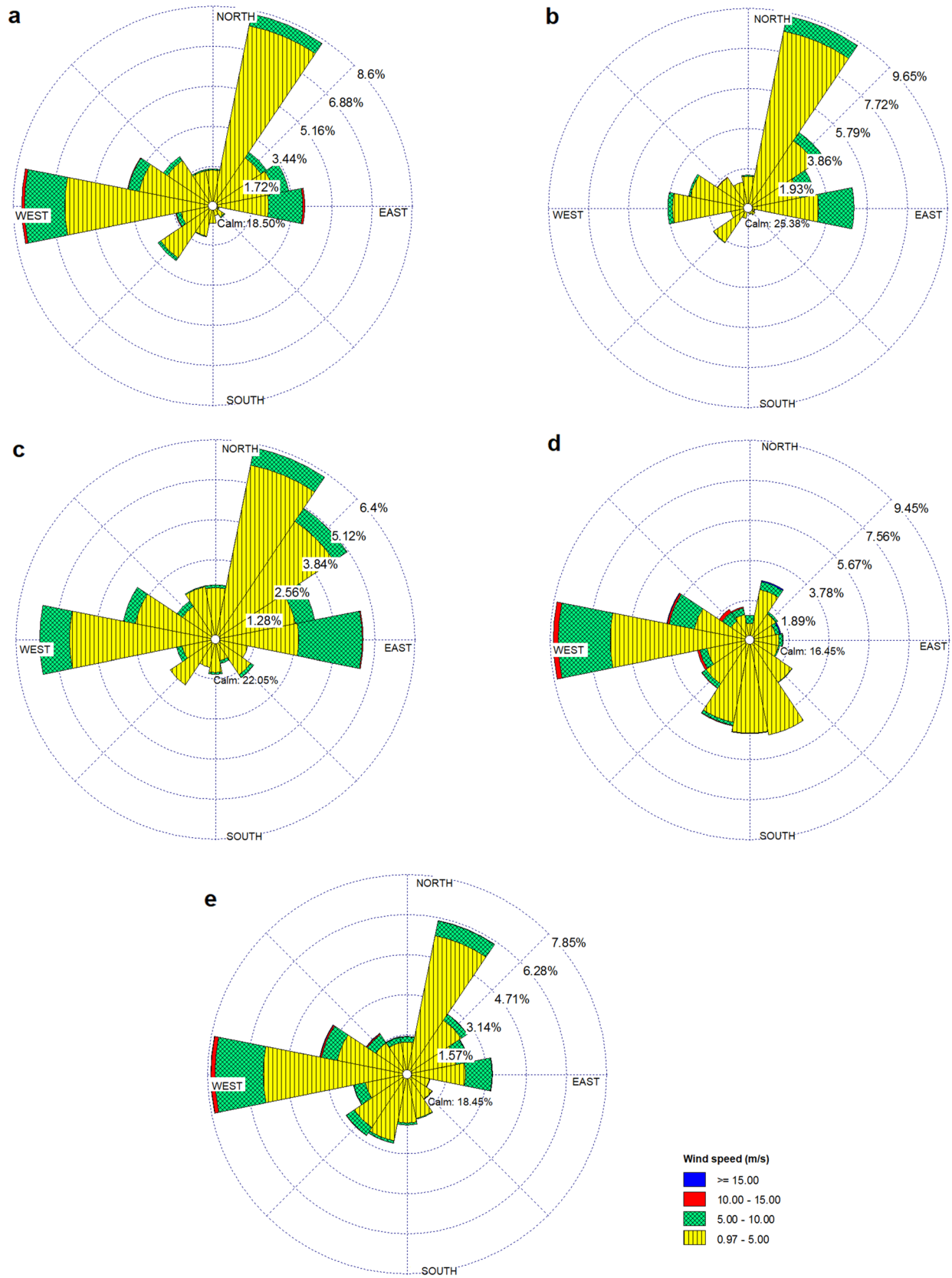
The DO distribution (Fig. 12) varied considerably, and the concentrations fluctuated between 1.23 mg/L at station 2 and 29.20 mg/L at station 3 (Table 4). During the summer, the relative standard deviation (RSD, %) indicated that the highest diversity occurred in the distribution of DO (RSD = 114.904).

The average concentration of SPM measured during the study period was  $1.02 \pm 1.50$  mg/L. The lowest value (0.1 mg/L) was observed during the winter season (Table 4) at station 20, while a high concentration (16.10 mg/L) was recorded in the summer (Table 4) at station 2. Elevated SPM concentrations were also recorded at stations 3, 4 and 5 (Fig. 13a, c).

Seawater samples were subjected to TDS and Cl analysis exclusively during autumn 2016 and the summer 2017. The average concentration of TDS in the surface seawater samples was around 37,703.28 mg/L; the lowest value (36,190 mg/L) was recorded in autumn at station 1 (Fig. 14a), whereas the highest values of 39,850 mg/L and 40,002 mg/L were observed during summer at stations 4 and 5 (Fig. 14b), respectively.

Regarding chloride, the values (Table 4) fluctuated between 20,920 mg/L at station 7 during autumn 2016 (Fig. 15a) and 31,510 mg/L at station 5 during summer 2017 (Fig. 15b).





**Fig. 4** Annual and monthly wind rose diagrams at Bou Haroun weather station over the period 2005 to 2018. (a) May, (b) August, (c) September, (d) December, and (e) annual (Source: Meteorological Service of Algeria 2019). Significant wave height and direction data have been computed by the SWAN model using a regular computational grid with a high spatial resolution of  $0.033^\circ \times 0.033^\circ$  ( $\sim 3$  km). The wave characteristics of the point at latitude  $36.700^\circ$  N and longitude  $2.7333^\circ$  E for a period of ten years from 2008 to 2018 as represented in the annual rose wave diagram (Fig. 7)

## Statistical analysis

The correlation analysis between the different physicochemical parameters measured in the vicinity of brine discharge from the Myah Tipaza desalination plant during the four seasons are presented in Tables 5, 6, 7 and 8.

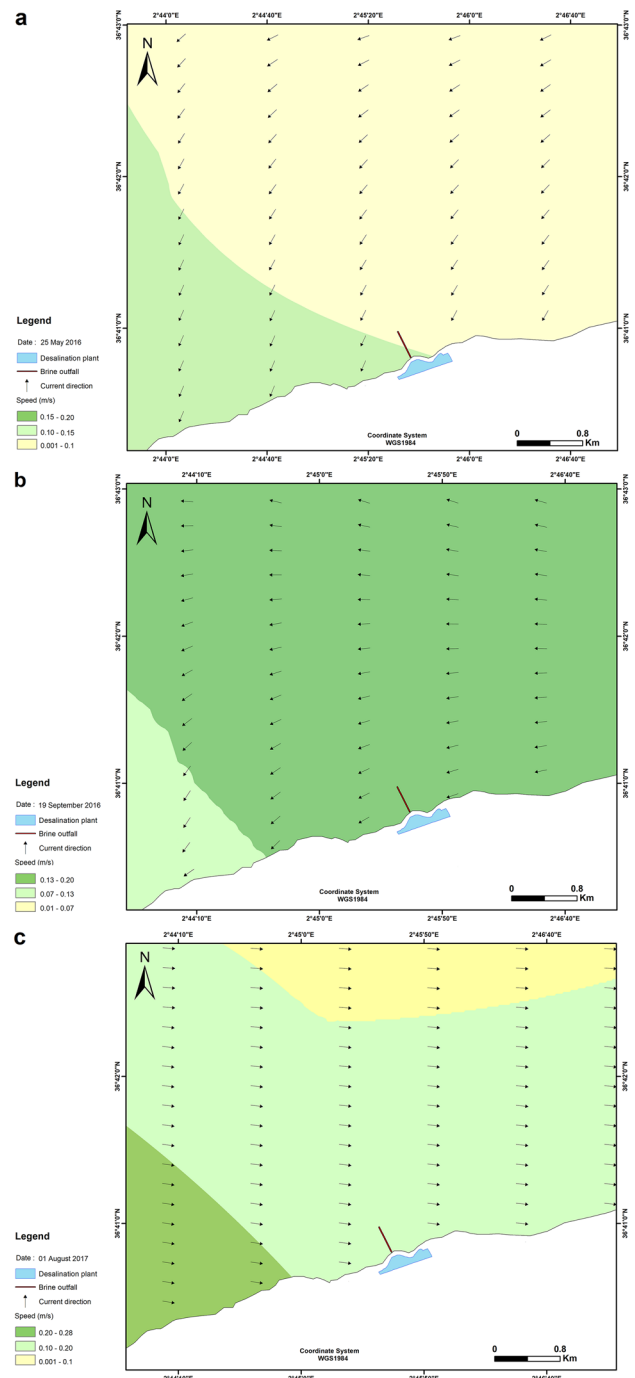
For spring, the results are shown in Fig. 16a. The principal component PC1, which explains 45.67% of the total variance of 99.54%, is positively correlated with all variables except DO and temperature. PC2 explains 23.37% of the total variance and is positively correlated with salinity, pH, DO and SPM and negatively correlated with temperature and EC. On the other hand, a negative correlation was observed between temperature and the variables assessed, except for DO. Salinity and DO are positively correlated with the concentrations of SPM ( $r=0.50$  and  $0.40$ ); conversely, EC is negatively correlated with DO (Table 5).

For autumn, the biplots of the first factor with a variance of 51.46% and the second factor with a variance 25.06% of the PCA are shown in Fig. 16b. According to Pearson's correlation matrix (Table 6), temperature showed significant positive correlation with EC ( $r=0.94$ ) and DO ( $r=0.68$ ). Subsequently, salinity and EC are positively correlated with DO ( $r=0.69$  and  $0.72$ ), TDS ( $r=0.83$  and  $0.55$ ) and Cl ( $r=0.58$  and  $0.54$ ), while pH is negatively correlated with salinity ( $r=0.83$ ) and TDS ( $r=0.51$ ). Other significant correlations were observed between TDS and DO ( $r=0.70$ ), Cl and pH ( $r=0.52$ ) and TDS and Cl ( $r=0.59$ ).

In summer, the results of the correlation analysis (Fig. 16c and Table 7) indicate that temperature is positively correlated with SPM ( $r=0.52$ ), and salinity is positively correlated with all parameters except pH.

The significant positive correlations are recorded between temperature, salinity, TDS, Cl, SPM and EC with correlation factors 0.51, 0.75, 0.65, 0.70 and 0.57, respectively.

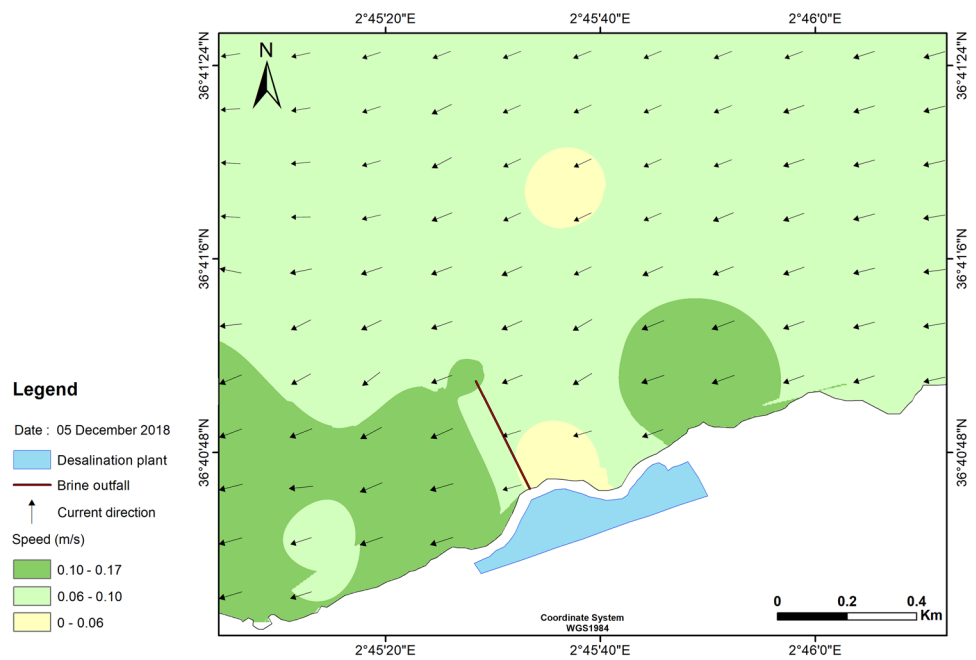
In addition, Cl demonstrates a strong positive correlation with TDS ( $r=0.92$ ) and a moderate correlation with SPM ( $r=0.57$ ). Conversely, pH showed significant negative correlations with salinity ( $r=-0.69$ ) and TDS ( $r=-0.71$ ) and Cl ( $r=-0.75$ ).



**Fig. 5** Surface current intensity and direction around the study area. Data were obtained from the Copernicus Marine Services Information, 2018

Regarding the winter season, PC1 and PC2 represent, respectively, 29.63% and 23.11% of the total variance. As shown in Fig. 16d, the first factor (PC1) is positively

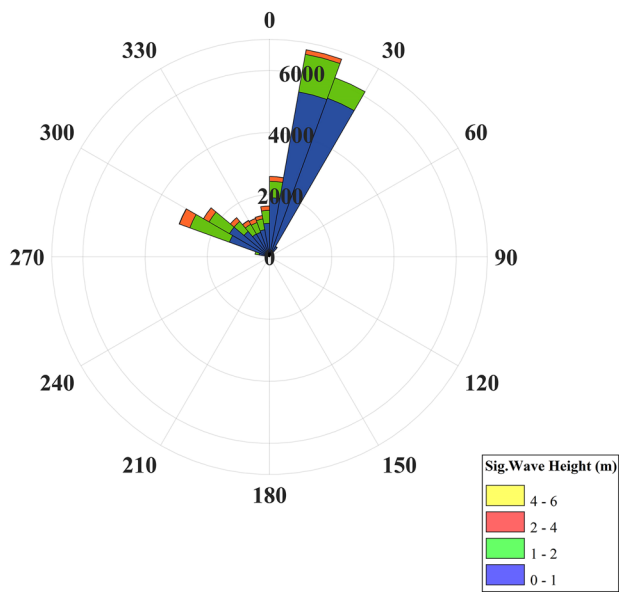
**Fig. 6** Surface current intensity and direction recorded during winter season around the Myah Tipaza desalination plant



**Table 4** Statistical variation (minimum, maximum, mean, standard deviation and relative standard deviation) among various physicochemical parameters of the coastal waters of the study area

| Season      | Parameters                      | Minimum   | Maximum   | Mean $\pm$ SD              | RSD (%) | Reference station |
|-------------|---------------------------------|-----------|-----------|----------------------------|---------|-------------------|
| Spring 2016 | Temperature ( $^{\circ}$ C)     | 19.30     | 20.10     | 19.710 $\pm$ 0.340         | 1.725   | 18.80             |
|             | Salinity (psu)                  | 36.84     | 37.71     | 37.350 $\pm$ 0.334         | 0.894   | 37.50             |
|             | Electrical conductivity (mS/cm) | 50.26     | 50.71     | 50.400 $\pm$ 0.148         | 0.294   | 51.00             |
|             | pH                              | 8.16      | 8.32      | 8.230 $\pm$ 0.052          | 0.631   | 8.20              |
|             | DO (mg/L)                       | 2.79      | 3.37      | 3.070 $\pm$ 0.238          | 7.774   | 2.02              |
|             | SPM (mg/L)                      | 0.60      | 12.60     | 3.620 $\pm$ 4.171          | 115.068 | 1.20              |
| Autumn 2016 | Temperature ( $^{\circ}$ C)     | 25.00     | 25.90     | 25.180 $\pm$ 0.300         | 1.189   | 19.00             |
|             | Salinity (psu)                  | 36.53     | 38.90     | 37.150 $\pm$ 0.885         | 2.384   | 36.42             |
|             | Electrical conductivity (mS/cm) | 54.20     | 55.90     | 55.125 $\pm$ 0.634         | 1.150   | 50.31             |
|             | pH                              | 8.01      | 8.20      | 8.140 $\pm$ 0.063          | 0.779   | 8.11              |
|             | DO (mg/L)                       | 3.38      | 4.29      | 3.850 $\pm$ 0.344          | 8.933   | 3.00              |
|             | SPM (mg/L)                      | 1.02      | 6.30      | 2.700 $\pm$ 1.687          | 62.440  | 0.91              |
|             | TDS (mg/L)                      | 36,190.00 | 37,760.00 | 36,938.750 $\pm$ 574.460   | 1.555   | 36,350.00         |
| Summer 2017 | Cl <sup>-</sup> (mg/L)          | 20,920.00 | 27,700.00 | 23,270.000 $\pm$ 2,320.360 | 9.971   | 21,200.00         |
|             | Temperature ( $^{\circ}$ C)     | 27.43     | 27.66     | 27.570 $\pm$ 0.065         | 0.238   | 27.00             |
|             | Salinity (psu)                  | 36.75     | 39.94     | 37.570 $\pm$ 1.176         | 3.132   | 36.60             |
|             | Electrical conductivity (mS/cm) | 55.20     | 57.51     | 55.785 $\pm$ 0.675         | 1.211   | 54.00             |
|             | pH                              | 7.98      | 8.61      | 8.270 $\pm$ 0.238          | 2.881   | 8.20              |
|             | DO (mg/L)                       | 1.23      | 29.20     | 6.660 $\pm$ 7.663          | 114.904 | 1.00              |
|             | SPM (mg/L)                      | 4.31      | 16.10     | 11.010 $\pm$ 3.940         | 35.831  | 1.60              |
| Winter 2018 | TDS (mg/L)                      | 37,110.00 | 40,020.00 | 38,373.000 $\pm$ 953.510   | 2.484   | 37,800.00         |
|             | Cl <sup>-</sup> (mg/L)          | 21,200.00 | 31,510.00 | 24,231.180 $\pm$ 3,329.950 | 13.742  | 22,000.00         |
|             | Temperature ( $^{\circ}$ C)     | 17.19     | 18.24     | 17.670 $\pm$ 0.230         | 1.306   | 17.72             |
|             | Salinity (psu)                  | 36.49     | 37.02     | 36.710 $\pm$ 0.123         | 0.336   | 36.71             |
|             | Electrical conductivity (mS/cm) | 46.80     | 52.88     | 47.611 $\pm$ 1.293         | 2.716   | 47.60             |
|             | pH                              | 8.11      | 8.18      | 8.140 $\pm$ 0.017          | 0.210   | 8.14              |
|             | SPM (mg/L)                      | 0.10      | 6.15      | 1.030 $\pm$ 1.506          | 146.218 | 0.07              |



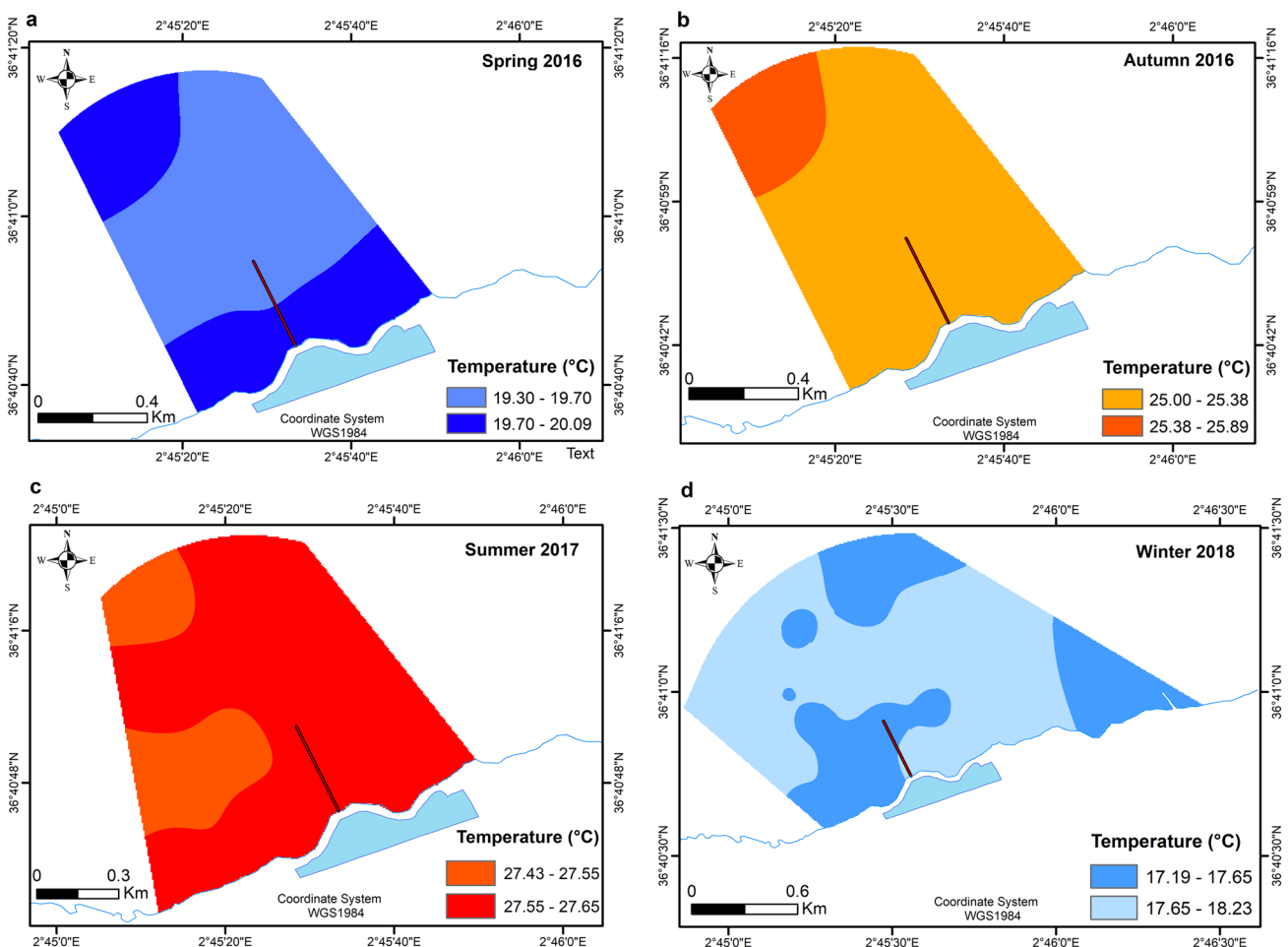


**Fig. 7** Annual rose diagram for significant wave height and wave direction near the study area, 2008–2018

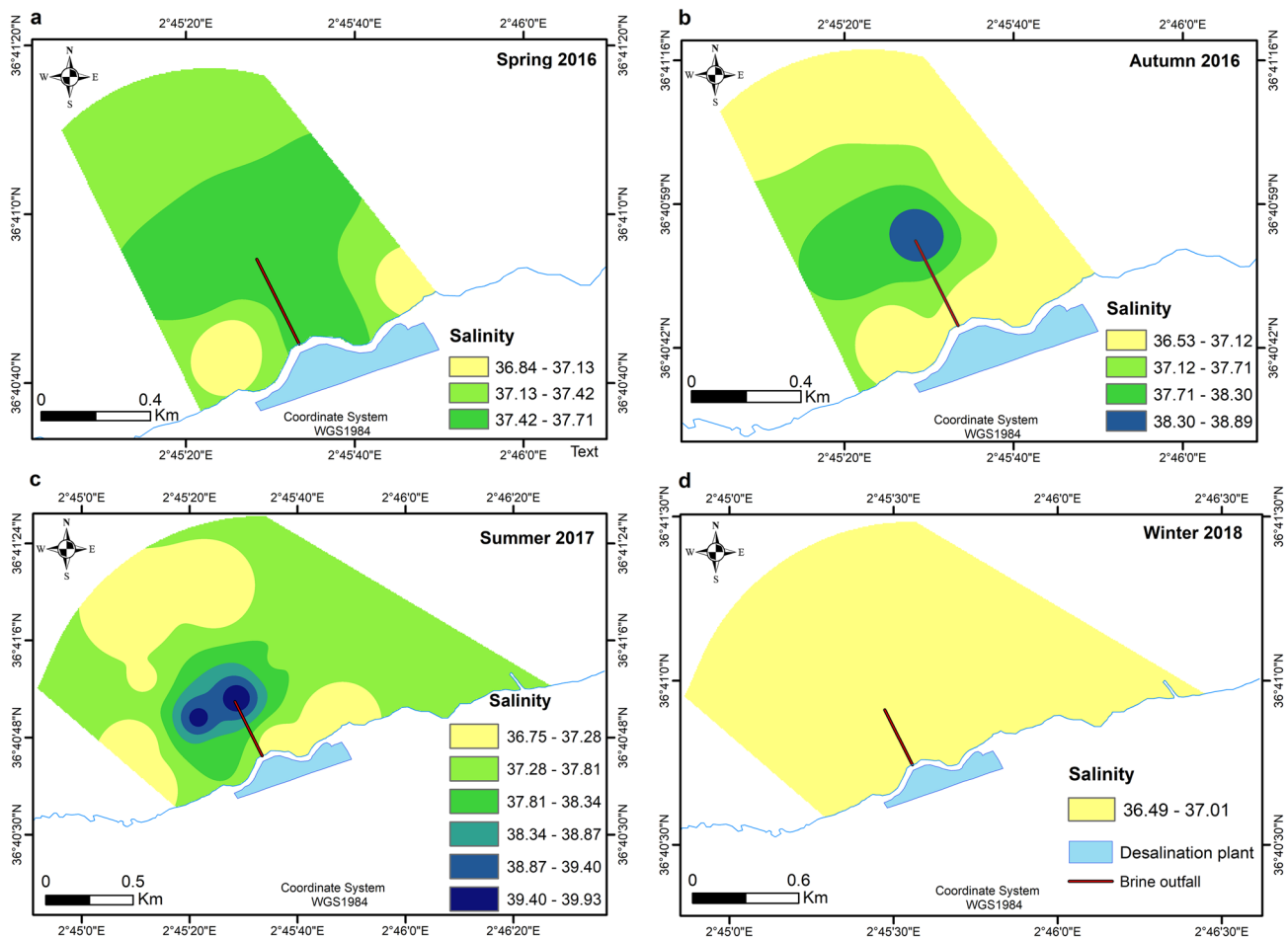
correlated with the variables studied except SPM, while the second factor (PC2) is negatively correlated with temperature and EC. There are no significant positive or negative relationships between the variables (Table 8).

Sampling locations were clustered using 5-dimensional spaces (temperature, salinity, EC, pH and SPM) in order to identify the physicochemical similarities. The results of the hierarchical cluster analysis represented by the dendrogram and illustrated in Fig. 17, revealed four groups: clusters 1, 2, 3 and 4, which include 21.74%, 52.17%, 4.34% and 19.56% of the total stations, respectively (Table 9).

Cluster 1 consists of 10 stations and is characterised by high temperatures ( $X = 25.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and EC ( $55.21\text{ }\mu\text{S/cm}$ ). Cluster 2 consists of 24 stations without a specific pattern that have the lowest values of temperature ( $18.22\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), salinity ( $36.85\text{ psu}$ ), EC ( $48.32\text{ }\mu\text{S/cm}$ ), pH ( $8.16$ ) and SPM ( $0.94\text{ mg/L}$ ). Cluster 3 contains only three stations located in the immediate area (30–200 m) around the brine outfall. This cluster is characterised by medium levels of salinity ( $37.34\text{ psu}$ ), pH ( $8.21$ ) and SPM ( $8.65\text{ mg/L}$ ).



**Fig. 8** Spatial distribution map of surface seawater temperature (in  $^{\circ}\text{C}$ ) throughout the study area during the surveys in spring 2016 (a), autumn 2016 (b), summer 2017 (c) and winter 2018 (d)



**Fig. 9** Spatial distribution map of surface seawater salinity (in psu) throughout the study area during the surveys in spring 2016 (a), autumn 2016 (b), summer 2017 (c) and winter 2018 (d)

Cluster 4 includes 9 stations and is characterised by the highest levels of temperature (27.57 °C), salinity (37.74 psu), EC (55.83  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), pH (8.24) and SPM (12.40 mg/L). The stations grouped into this last cluster are mainly related to the sampling points located in the immediate (30–200 m) and surrounding areas (250–900 m) around the brine outfall, as well as the stations next to the coast.

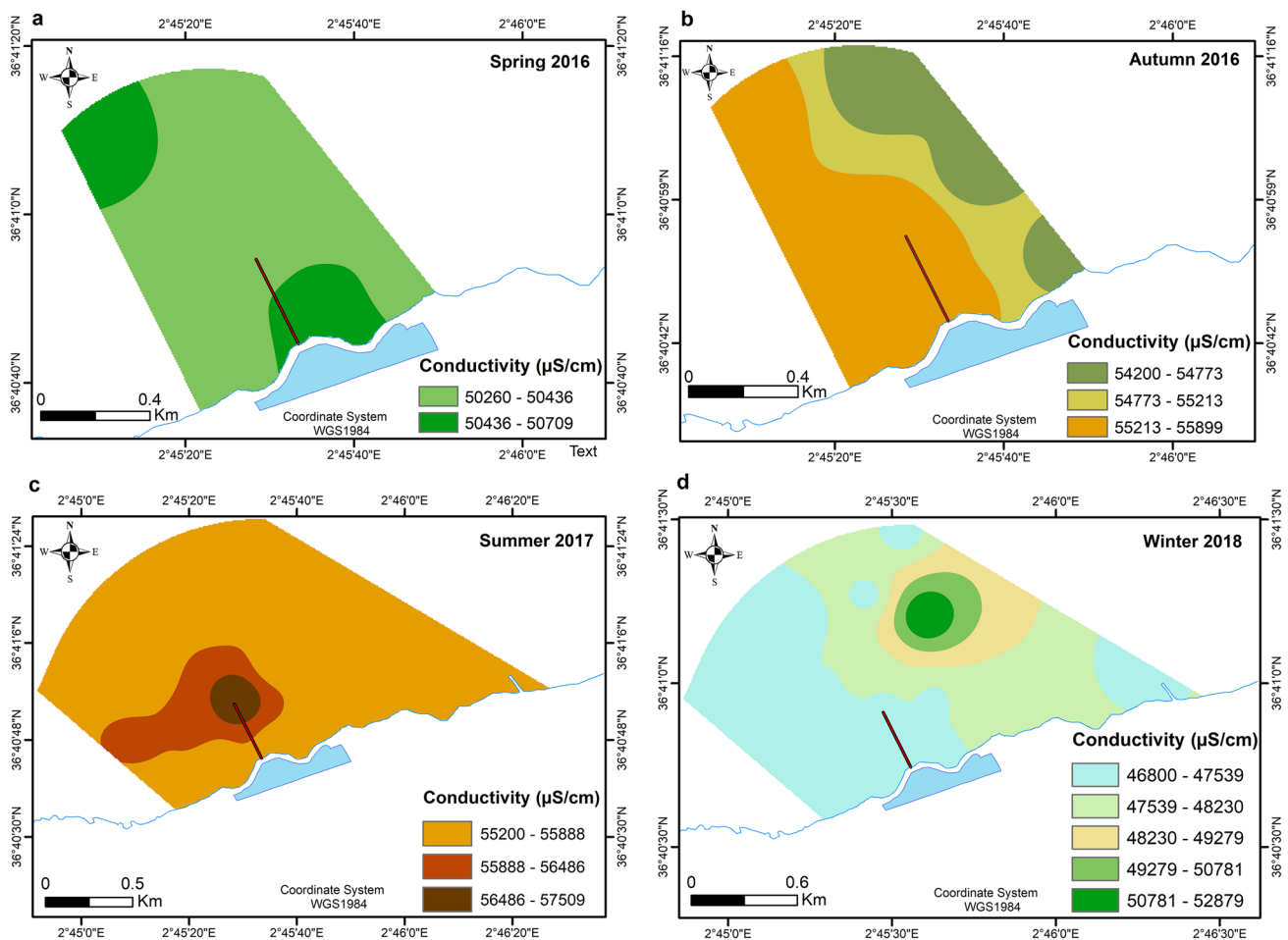
## Discussion

Understanding ambient conditions, such as wind, waves, and currents, and the physicochemical characteristics of the receiving marine ecosystem is essential to predicting the brine mixing process (Petersen et al. 2019) and the potential

environmental impacts of saline wastewater (Aljohani et al. 2022).

Based on data from the Summary of Synoptic Meteorological Observations, the Algerian coasts are subject to winds from the west during the winter season, and from the east and northeast in summer (Amokrane and Salmi 2021; Moradi et al. 2022).

The study area is greatly influenced by waves from the north-northeast (Fig. 7), which explains the hydrodynamic characteristics. Therefore, the surface current in Bou Ismail Bay is relatively weak, with an average speed of 0.5 m/s (Bakalem et al. 2020). During summer, surface currents flow eastward and are relatively stronger (Fig. 5c), and have a northeast direction (Fig. 5a) in spring. In autumn, currents



**Fig. 10** Spatial distribution map of surface seawater conductivity (in  $\mu\text{S/cm}$ ) throughout the study area during the surveys in spring 2016 (a), autumn 2016 (b), summer 2017 (c) and winter 2018 (d)

flowed from the east and northeast (Fig. 5b). Rather, currents move towards the west and southwest (Fig. 6).

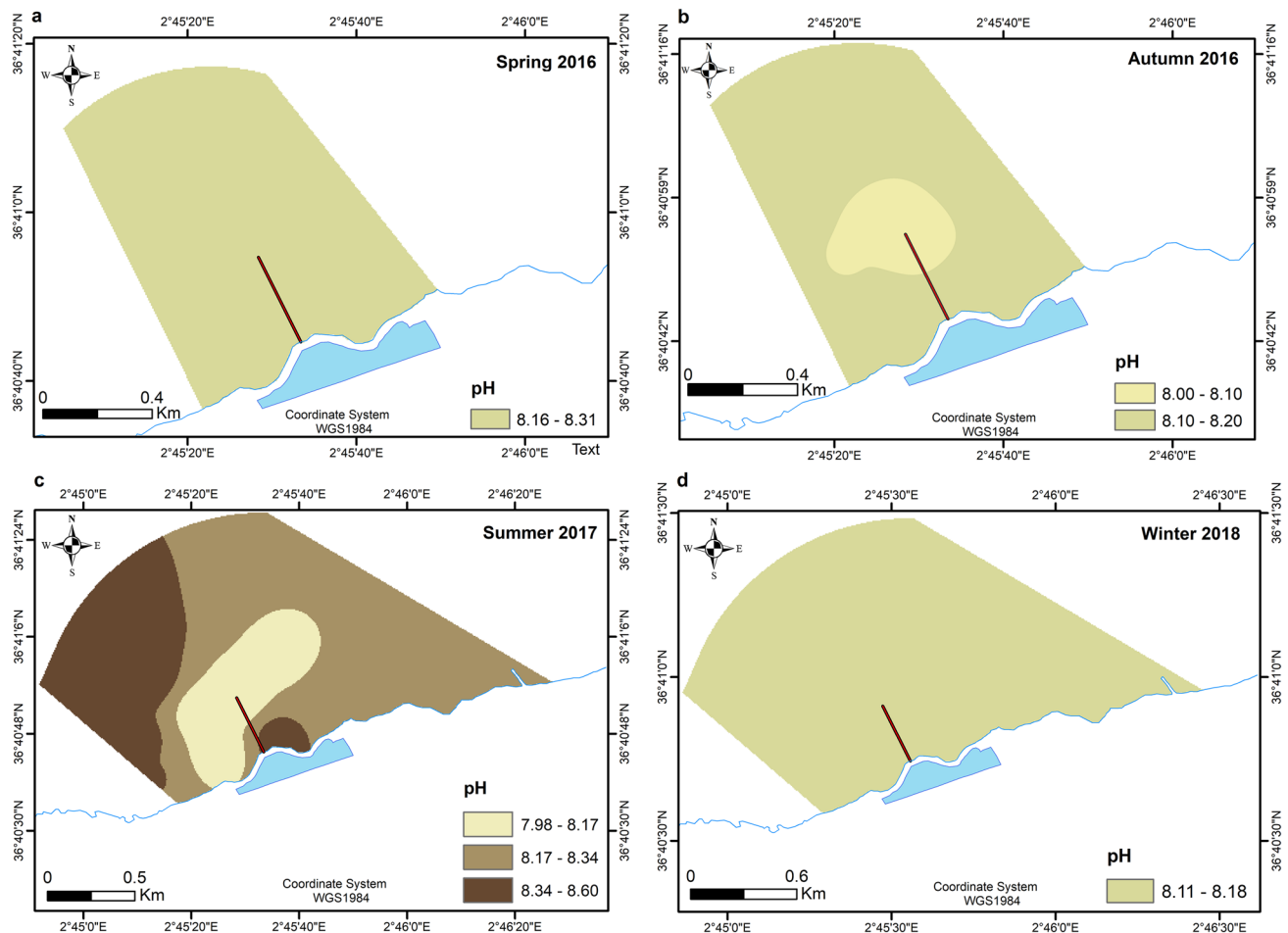
The results of the physicochemical analysis (Table 4) indicated that the seawater temperature in the study area varied seasonally. It's reflecting the sampling period and not influenced by the desalination brine discharge.

The salinity depends mainly on land-based sources of discharges (Díaz-Herrera et al. 2006) and could reflect aquatic environmental contamination levels (Afsharian et al. 2022). The highest values were observed in the area immediately around the brine discharge point (Fig. 9b, c). These records were higher than the salinity of the surface seawater in Bou Ismail Bay, which varied from 37 to 38 psu (Bakalem et al. 2020) and reached as high as 3 psu compared to the reference stations, probably due to their proximity to the brine

discharge area. The maximum EC values recorded at station 5 (Fig. 10c) corresponded to the highest salinity (Fig. 8c). In winter, the spatial distribution of EC (Fig. 10d) is well marked, which is possibly explained by the mixing process.

The spatial distribution of pH (Fig. 11) showed weak variation, with the highest value recorded at station 8 and slightly exceeded both the Algerian standard limit of 8.5 and the Mediterranean Sea average, which typically fluctuates between 7.9 and 8.3 (Marion et al. 2011; Guendouzi et al. 2021).

During the desalination process, antiscalants and alkaline chemicals are frequently used (Missimer and Maliva 2018; Roberts et al. 2010). The presence of such additives in the discharged brine may increase the pH of surrounding waters



**Fig. 11** Spatial distribution map of surface seawater pH throughout the study area during the surveys in spring 2016 (a), autumn 2016 (b), summer 2017 (c) and winter 2018 (d)

(Loizide 2003) and harm the marine ecosystem (Petersen et al. 2018).

The DO distribution (Fig. 12) varied considerably, the hypoxic condition was detected at station 2 ( $< 2.0$  mg/L), while seawater was saturated with DO at station 3, likely due to organic matter degradation and hydrodynamic processes, respectively (Al-Mutairi et al. 2014). The low levels in proximity to the brine discharge site may be attributed to the use of certain chemicals (sodium bisulfate) that consume oxygen during the desalination process (Fallatah et al. 2018).

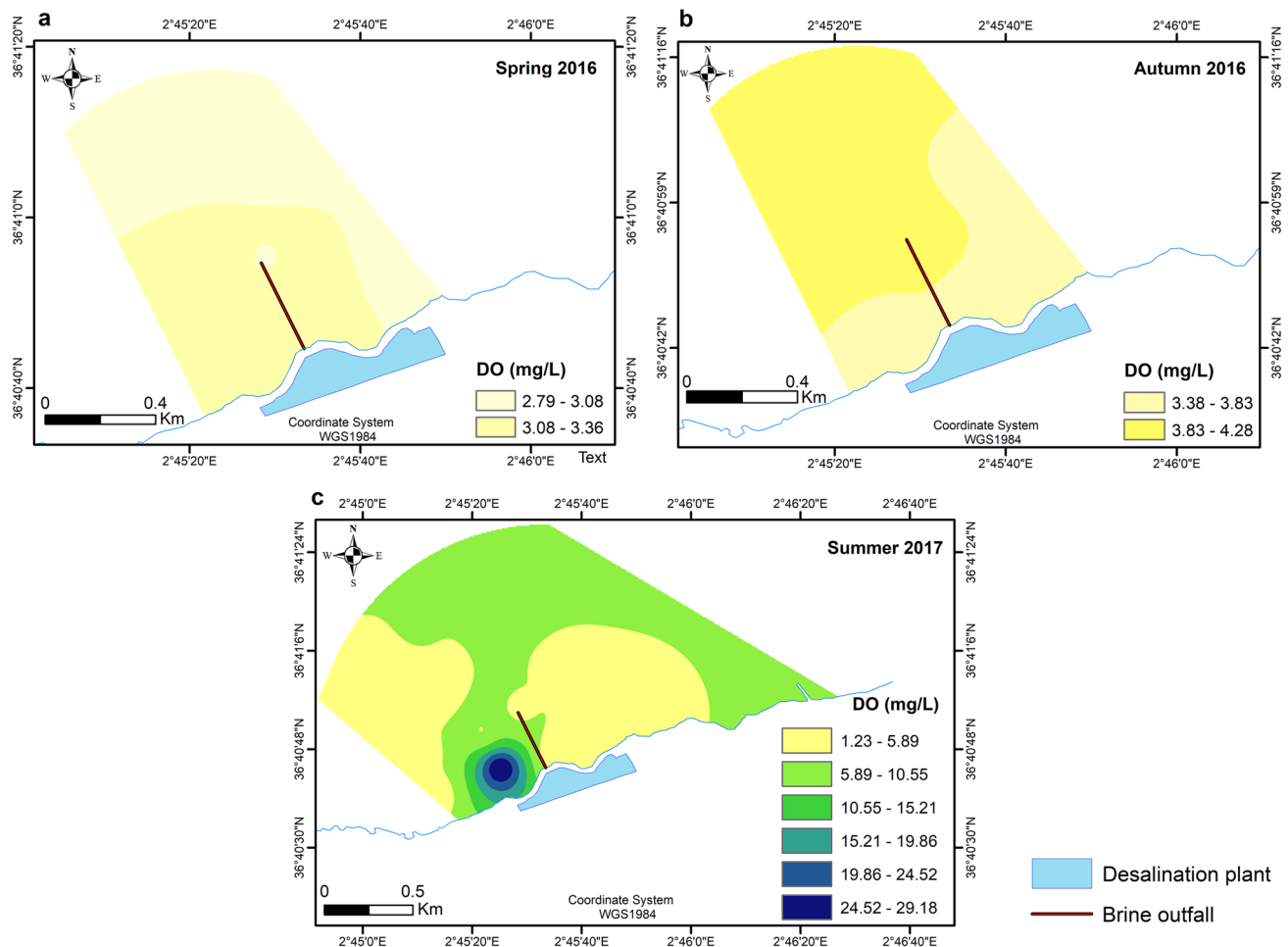
The distribution of SPM in the coastal ecosystem depends, among other things, on hydrodynamic processes and terrigenous inputs, i.e., anthropogenic activities (Bachari Houma 2009; Kravchishina et al. 2015). SPM varied considerably; and the elevated concentrations were also recorded

in the area immediately around the brine discharge point at stations 3, 4 and 5 (Fig. 13a, c), which may be due to the sediment resuspension induced by the stronger currents at this time (Fig. 5c).

The highest values of TDS and Cl concentrations were also observed near the brine discharge area.

The correlation analysis between the different physico-chemical parameters measured in the vicinity of brine discharge from the Myah Tipaza desalination plant during the four seasons revealed the strong correlations between some parameters, which could be attributed to the existence of the brine outfall in the surrounding area.

In summer, the results of the correlation analysis (Fig. 16c and Table 7) indicate that temperature is positively



**Fig. 12** Spatial distribution map of surface seawater DO (in mg/L) throughout the study area during the surveys in spring 2016 (a), autumn 2016 (b), and summer 2017 (c)

correlated with SPM, and salinity is positively correlated with all parameters except pH.

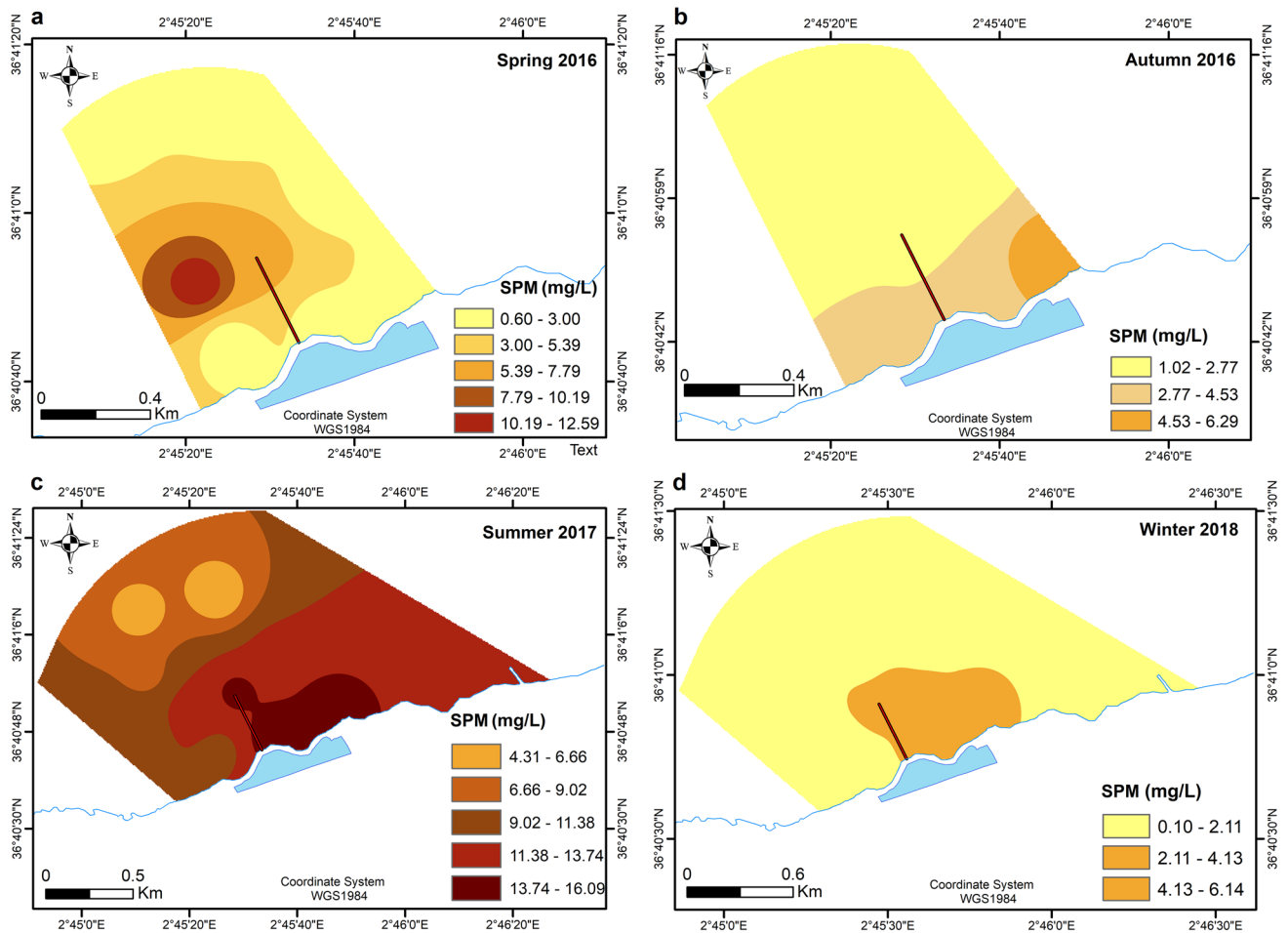
The significant positive correlations are recorded between temperature, salinity, TDS, Cl, SPM and EC, and Cl with TDS and SPM, probably meaning that these parameters have common origins.

No significant relationships were observed during the winter (Table 8), which suggests that the physicochemical parameters were independent during this sampling season.

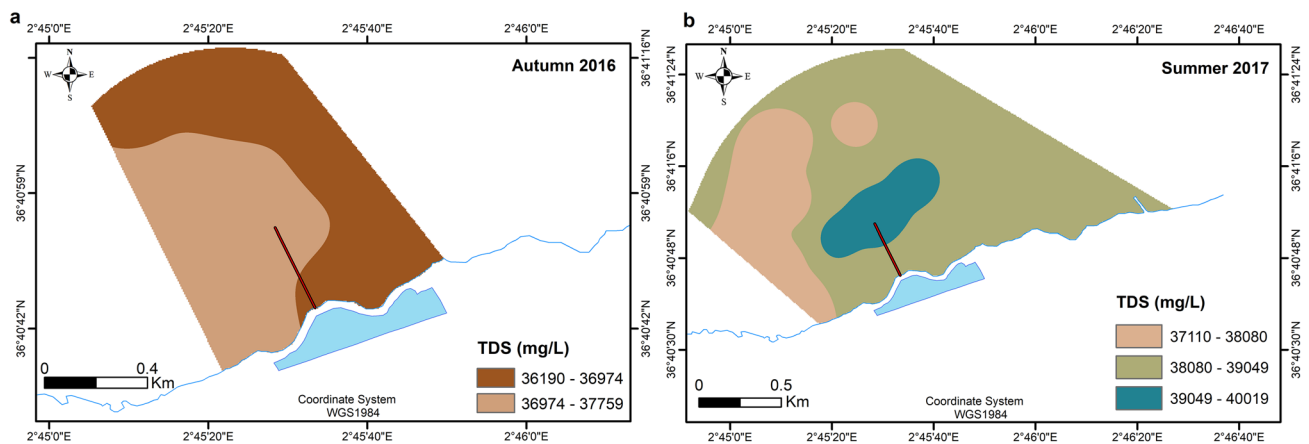
In summary, the relationship between the physicochemical parameters is different between the four surveys. Temperature and EC are significantly correlated in all seasons. In particular, salinity shows a significant correlation with pH,

TDS and Cl for the autumn and summer seasons, indicating that these parameters are influenced by the same factor. In this regard, the increasing salinity, pH and TDS levels are likely due to the presence of the brine outfall.

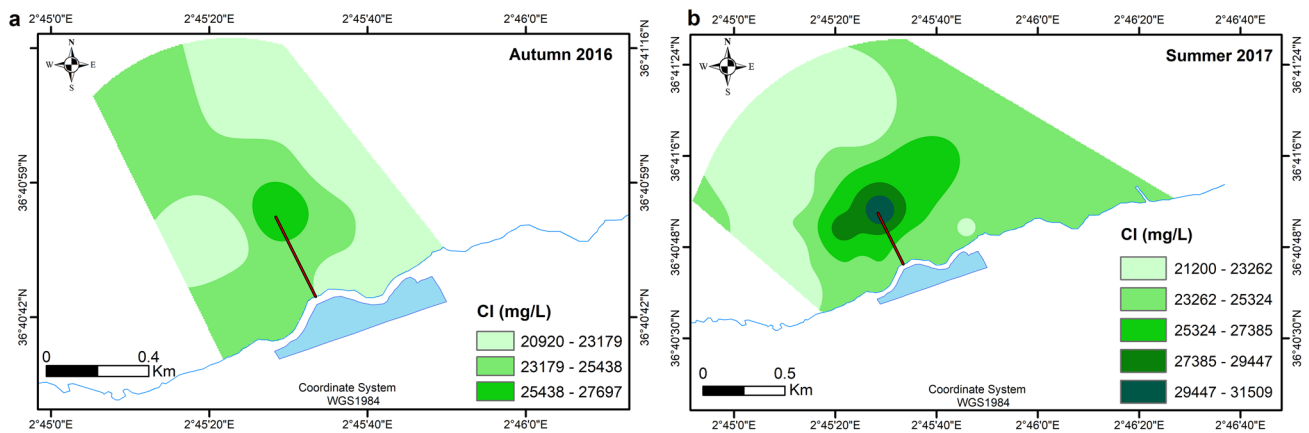
The results of the hierarchical cluster analysis grouped the stations into four main clusters on the basis of their distance from the brine discharge point, which suggests that the physicochemical parameters (temperature, salinity, EC, pH and SPM) are influenced by the effluent of the Myah Tipaza desalination plant.



**Fig. 13** Spatial distribution map of surface seawater SPM (in mg/L) throughout the study area during the surveys in spring 2016 (a), autumn 2016 (b), summer 2017 (c) and winter 2018 (d)



**Fig. 14** Spatial distribution map of surface seawater TDS (in mg/L) throughout the study area during the surveys in autumn 2016 (a) and summer 2017 (b)



**Fig. 15** Spatial distribution map of surface seawater Cl (in mg/L) throughout the study area during the surveys in autumn 2016 (a) and summer 2017 (b)

**Table 5** Pearson correlation matrix of physicochemical parameters during spring ( $\alpha = 0.05$  level)

|      | Temp                | Sal                | EC                  | pH     | DO    | SPM   |
|------|---------------------|--------------------|---------------------|--------|-------|-------|
| Temp | 1.000               |                    |                     |        |       |       |
| Sal  | −0.620 <sup>a</sup> | 1.000              |                     |        |       |       |
| EC   | −0.460              | 0.380              | 1.000               |        |       |       |
| pH   | −0.090              | 0.120              | −0.240              | 1.000  |       |       |
| DO   | 0.520 <sup>a</sup>  | 0.090              | −0.600 <sup>a</sup> | −0.200 | 1.000 |       |
| SPM  | −0.320              | 0.500 <sup>a</sup> | −0.120              | 0.050  | 0.400 | 1.000 |

<sup>a</sup>Correlation is significant

**Table 6** Pearson correlation matrix of physicochemical parameters during autumn ( $\alpha = 0.05$  level)

|      | Temp               | Sal                 | EC                 | pH                  | DO                 | TDS                | Cl    | SPM   |
|------|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------|-------|
| Temp | 1.000              |                     |                    |                     |                    |                    |       |       |
| Sal  | 0.250              | 1.000               |                    |                     |                    |                    |       |       |
| EC   | 0.940 <sup>a</sup> | 0.470               | 1.000              |                     |                    |                    |       |       |
| pH   | 0.220              | −0.830 <sup>a</sup> | −0.030             | 1.000               |                    |                    |       |       |
| DO   | 0.680 <sup>a</sup> | 0.690 <sup>a</sup>  | 0.720 <sup>a</sup> | −0.290              | 1.000              |                    |       |       |
| TDS  | 0.320              | 0.830 <sup>a</sup>  | 0.550 <sup>a</sup> | −0.510 <sup>a</sup> | 0.700 <sup>a</sup> | 1.000              |       |       |
| Cl   | 0.330              | 0.580 <sup>a</sup>  | 0.540 <sup>a</sup> | 0.520 <sup>a</sup>  | 0.390              | 0.590 <sup>a</sup> | 1.000 |       |
| SPM  | 0.340              | −0.080              | 0.330              | 0.140               | −0.220             | −0.240             | 0.050 | 1.000 |

<sup>a</sup>Correlation is significant

**Table 7** Pearson correlation matrix of physicochemical parameters during summer ( $\alpha = 0.05$  level)

|      | Temp               | Sal                 | EC                  | pH                  | DO     | TDS                | Cl                 | SPM   |
|------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------|--------------------|--------------------|-------|
| Temp | 1.000              |                     |                     |                     |        |                    |                    |       |
| Sal  | 0.230              | 1.000               |                     |                     |        |                    |                    |       |
| EC   | 0.510 <sup>a</sup> | 0.750 <sup>a</sup>  | 1.000               |                     |        |                    |                    |       |
| pH   | 0.010              | −0.690 <sup>a</sup> | −0.280              | 1.000               |        |                    |                    |       |
| DO   | 0.230              | 0.180               | 0.040               | −0.420              | 1.000  |                    |                    |       |
| TDS  | 0.190              | 0.890 <sup>a</sup>  | 0.650 <sup>a</sup>  | −0.710 <sup>a</sup> | 0.070  | 1.000              |                    |       |
| Cl   | 0.220              | 0.940 <sup>a</sup>  | 0.700 <sup>a</sup>  | −0.750 <sup>a</sup> | 0.160  | 0.920 <sup>a</sup> | 1.000              |       |
| SPM  | 0.520 <sup>a</sup> | 0.450               | 0.5700 <sup>a</sup> | −0.200              | −0.010 | 0.490 <sup>a</sup> | 0.570 <sup>a</sup> | 1.000 |

<sup>a</sup>Correlation is significant



**Table 8** Pearson correlation matrix of physicochemical parameters during winter ( $\alpha=0.05$  level)

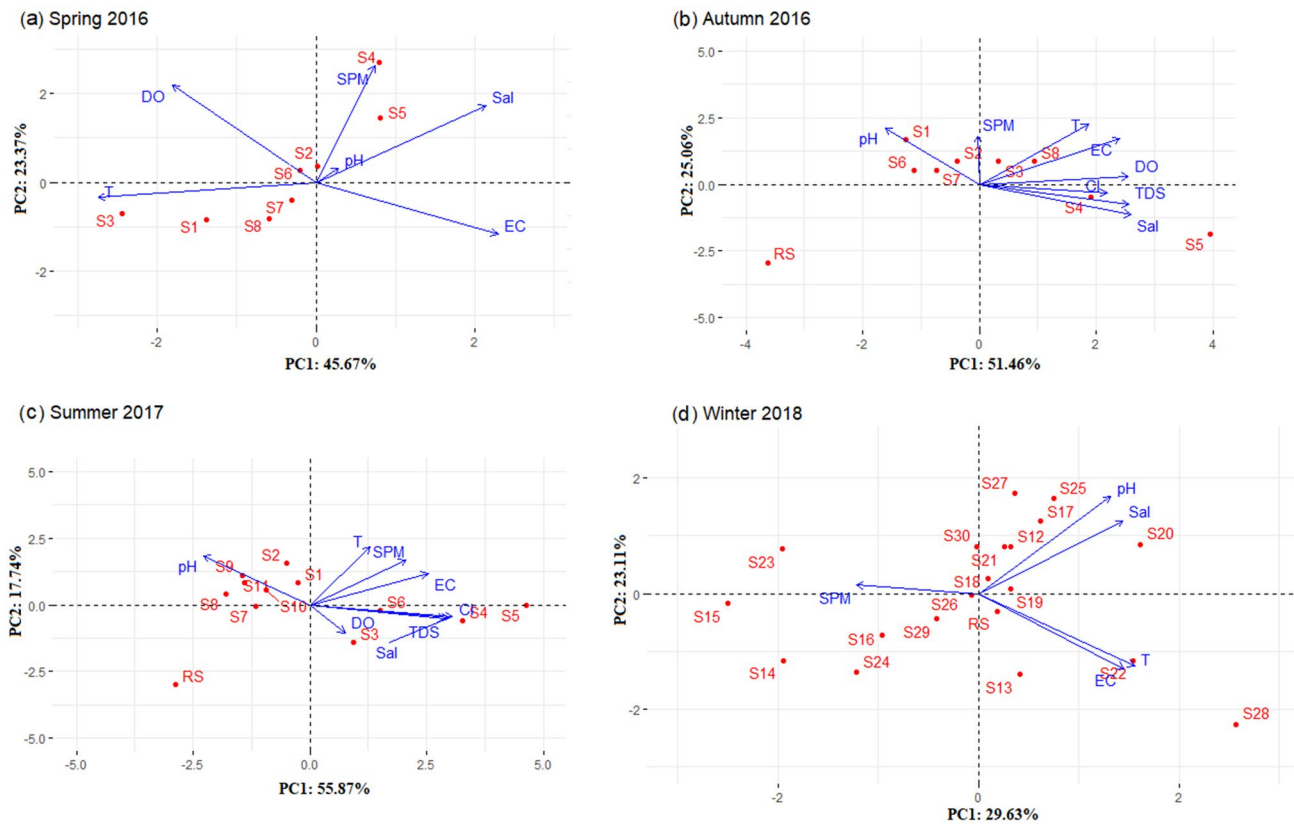
|      | Temp   | Sal    | EC     | pH     | SPM   |
|------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Temp | 1.000  |        |        |        |       |
| Sal  | 0.190  | 1.000  |        |        |       |
| EC   | 0.260  | 0.050  | 1.000  |        |       |
| pH   | -0.040 | 0.270  | 0.080  | 1.000  |       |
| SPM  | -0.100 | -0.020 | -0.120 | -0.150 | 1.000 |

<sup>a</sup>Correlation is significant

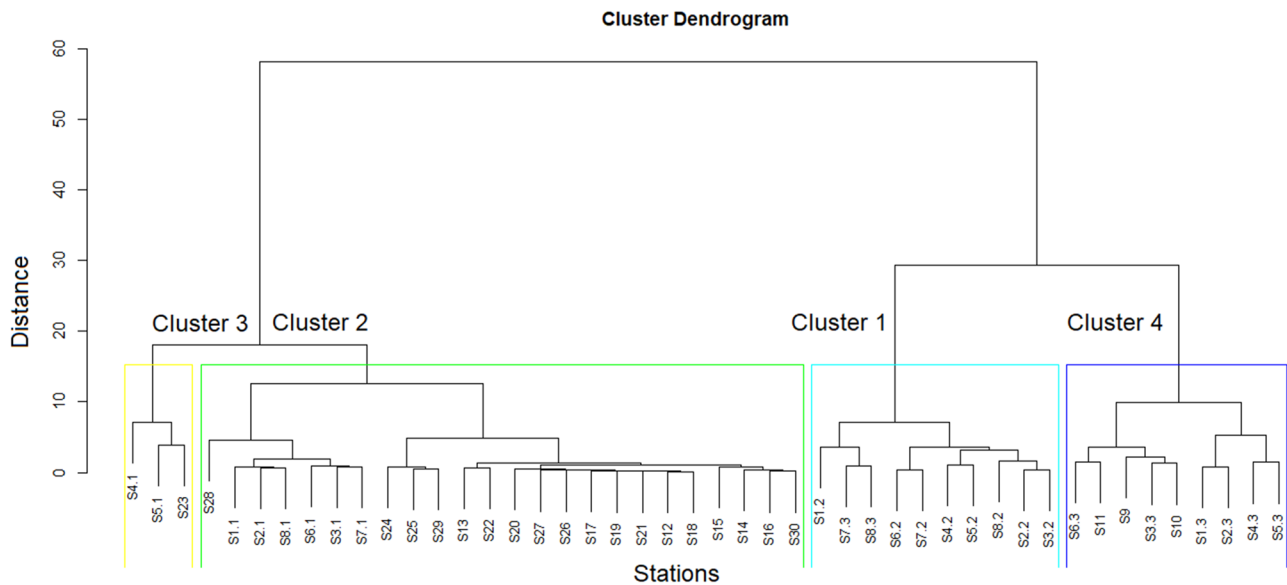
## Conclusion

The purpose of this paper was to determine the environmental conditions within an anthropized area of the Mediterranean Sea and provide baseline information that contributes to the study of the dispersion of super-saline effluent and identifies its potential long-term effects on the receiving marine ecosystem.

In this work, multivariate statistical methods and geo-spatial techniques, were used to investigate the surface

**Fig. 16** PCA of physicochemical parameters according to the plane PC1 × PC2 for spring (a), autumn (b), summer (c) and winter (d)





**Fig. 17** Dendrogram of hierarchical cluster analysis for sampling stations according to the surface seawater quality at the study area

seawater properties near the operational Myah Tipaza reverse osmosis desalination plant.

Through the results, stations located near the brine outfall (Table 3) exhibited the highest values for salinity, EC, pH, DO, SPM, TDS, and Cl. This may be due

**Table 9** Statistical parameters of the cluster analysis based on 8 physicochemical variables measured at the study area

|                                | Temp  | Sal   | EC    | pH   | SPM   |
|--------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|
| <b>Cluster 1 (10 stations)</b> |       |       |       |      |       |
| X                              | 25.67 | 37.08 | 55.21 | 8.20 | 3.11  |
| Min                            | 25.00 | 36.53 | 54.20 | 8.01 | 1.02  |
| Max                            | 27.66 | 38.90 | 55.90 | 8.61 | 6.30  |
| SD                             | 1.08  | 0.87  | 0.62  | 0.19 | 1.86  |
| <b>Cluster 2 (24 stations)</b> |       |       |       |      |       |
| X                              | 18.22 | 36.85 | 48.32 | 8.16 | 0.94  |
| Min                            | 17.19 | 36.49 | 46.80 | 8.11 | 0.10  |
| Max                            | 20.10 | 37.71 | 52.88 | 8.32 | 2.96  |
| SD                             | 0.81  | 0.30  | 1.68  | 0.05 | 0.89  |
| <b>Cluster 3 (3 stations)</b>  |       |       |       |      |       |
| X                              | 18.69 | 37.34 | 49.36 | 8.21 | 8.65  |
| Min                            | 17.47 | 36.68 | 47.29 | 8.15 | 6.15  |
| Max                            | 19.31 | 37.67 | 50.41 | 8.25 | 12.60 |
| SD                             | 1.06  | 0.57  | 1.80  | 0.05 | 3.46  |
| <b>Cluster 4 (9 stations)</b>  |       |       |       |      |       |
| X                              | 27.57 | 37.74 | 55.83 | 8.24 | 12.40 |
| Min                            | 27.43 | 36.77 | 55.20 | 7.98 | 8.20  |
| Max                            | 27.64 | 39.94 | 57.51 | 8.58 | 16.10 |
| SD                             | 0.06  | 1.24  | 0.74  | 0.24 | 2.71  |

*X* mean, *Min* minimum, *Max* maximum, *SD* standard deviation

to the discharge of brine. Moreover, salinity exhibited a significant increase (approximately 2 psu) close to the discharge point compared to reference stations and the salinity of Bou Ismail Bay, which was between 37 and 38 psu. According to the results, the selected coastal area is sensitive and could be influenced by the brine discharge from this desalination plant. The outcomes are essential to the calibration of the models used by Filali and Besse-nasse (2018). Moreover, spatial analysis methods based on inverse distance weighting (IDW) can be used to control the dispersion of brine.

Additional investigations will be necessary for modelling brine dispersion, monitoring the performance of outfall systems, and establishing standards related to the effluents of desalination plants in Algeria.

**Acknowledgements** The authors are grateful to the Meteorological Service of Algeria for providing the wind measurement data and to the Algerian Energy Company for sharing internal documentation.

**Data availability** All data that support the findings of this study are available from the corresponding author AA.ADEM on request via this email: adem.amina.amel@gmail.com.

## Declarations

**Conflict of interest** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

**Ethical approval** The authors confirm that this work have not been published elsewhere, nor is it currently under consideration for publication elsewhere.

## References

- Afnor (2002) Qualité de l'eau—Détermination des résidus secs à 105 °C et 180 °C., NF T90–029. Paris (France)
- Afsharian S, Khedri P, Valinassab T (2022) Spatial and temporal variation of physicochemical parameters in northern Persian Gulf. *Int J Environ Sci Technol* 19:1121–1130. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03187-4>
- Alameddine I, El-Fadel M (2007) Brine discharge from desalination plants: a modeling approach to an optimized outfall design. *Desalination* 214:241–260. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.103>
- Aljohani NS, Kavil YN, Shanas PR et al (2022) Environmental impacts of thermal and brine dispersion using hydrodynamic modelling for yanbu desalination plant, on the eastern coast of the red sea. *Sustain*. <https://doi.org/10.3390/su14084389>
- Almasoud FI, Usman AR, Al-Farraj AS (2015) Heavy metals in the soils of the Arabian Gulf coast affected by industrial activities: analysis and assessment using enrichment factor and multivariate analysis. *Arab J Geosci* 8:1691–1703. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1298-x>
- Almubarak HA (2020) Environmental impact assessment of inland purification and desalination plants: case study of Al Asyah plant, Qassim region Central Saudi Arabia. *Arab J Geosci* 13:2. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5222-2>
- Al-Mutairi N, Abahussain A, El-Battay A (2014) Spatial and temporal characterizations of water quality in Kuwait Bay. *Mar Pollut Bull* 83:127–131. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.04.009>
- Al-Mutaz IS (1991) Environmental impact of seawater desalination plants. *Environ Monit Assess* 16:75–84. <https://doi.org/10.1007/BF00399594>
- Alshahri F (2017) Heavy metal contamination in sand and sediments near to disposal site of reject brine from desalination plant, Arabian Gulf: assessment of environmental pollution. *Environ Sci Pollut Res* 24:1821–1831. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7961-x>
- Amarouche K, Akpınar A, Bachari NEI et al (2019) Evaluation of a high-resolution wave hindcast model SWAN for the West Mediterranean basin. *Appl Ocean Res* 84:225–241. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.01.014>
- Amarouche K, Akpınar A, Çakmak RE et al (2020) Assessment of storm events along the Algiers coast and their potential impacts. *Ocean Eng* 210:107432. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107432>
- Aminot A, Chaussepied M (1983) Manuel des Analyses Chimiques en Milieu Marin. 1<sup>er</sup> ed. Brest Cedex, Cent Natl pour l'Exploitation des Océans
- Amitouche M, Lefkir A, Remini B, et al (2017) Rejets Chimiques Des Stations De Dessalement En. *Larhyss J* 199–211
- Amokrane M, Salmi A (2021) Surface spreading of the brine discharge from the seawater reverse osmosis plants: Hamma Water Desalination plant in Algeria. 222:81–91. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27103>
- Aziz NIHA, Hanafiah MM (2021) Application of life cycle assessment for desalination: progress, challenges and future directions. *Environ Pollut* 268:2. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115948>
- Baalousha HM (2016) The potential of using beach wells for reverse osmosis desalination in Qatar. *Model Earth Syst Environ* 2:1–12
- Bachari Houma F (2009) Modélisation et cartographie de la pollution marine et de la bathymétrie à partir de l'imagerie satellitaire. Doctoral dissertation, Paris Est)
- Bakalem A, Hassam N, Oulmi Y et al (2020) Diversity and geographical distribution of soft-bottom macrobenthos in the bay of Bou Ismail (Algeria, Mediterranean Sea). *Reg Stud Mar Sci* 33:100938. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100938>
- Belatoui A, Bouabessalam H, Hacene OR et al (2017) Environmental effects of brine discharge from two desalination plants in Algeria (South Western Mediterranean). *Desalin Water Treat* 76:311–318. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20812>
- Belhassan K (2022) Water scarcity management in the maghreb region. In: Associate Eyvaz et al (ed) *Drought-Impacts and Management*. IntechOpen, London, p Ch. 1
- Benaissa M, Rouane-Hacene O, Boutiba Z et al (2017) Ecotoxicological impact assessment of the brine discharges from a desalination plant in the marine waters of the Algerian west coast, using a multibiomarker approach in a limpet, *Patella rustica*. *Environ Sci Pollut Res* 24:24521–24532. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0081-4>
- Bessenasse M, Kettab A, Moulla AS (2010) Seawater desalination: study of three coastal stations in Algiers region. *Desalination* 250:423–427. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.09.069>
- Cambridge ML, Zavala-Perez A, Cawthray GR et al (2017) Effects of high salinity from desalination brine on growth, photosynthesis, water relations and osmolyte concentrations of seagrass *Posidonia australis*. *Mar Pollut Bull* 115:252–260. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.11.066>
- Díaz-Herrera N, Esteban O, Navarrete MC et al (2006) In situ salinity measurements in seawater with a fibre-optic probe. *Meas Sci Technol* 17:2227–2232. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/8/024>
- Djoukbala O, Hasbaia M, Benselama O, Mazour M (2019) Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (NW of Algeria). *Model Earth Syst Environ* 5:725–743
- Drouiche N, Ghaffour N, Naceur MW et al (2012) Towards sustainable water management in Algeria. *Desalin Water Treat* 50:272–284. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.719477>
- Drouiche N, Villarreal OR, Ouali S et al (2022) Role of desalination technologies and water reuse in Water-Energy-Food nexus: an opportunity for Algeria. *Desalin Water Treat* 261:83–93
- Einav R, Lokiec F (2003) Environmental aspects of a desalination plant in Ashkelon. *Desalination* 156:79–85. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00328-X](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00328-X)
- Elamine ZBM, Moudjeber D-E, Djennad M et al (2022) Coupling a brackish water greenhouse desalination system with membrane distillation for Southern Algeria. *Desalin WATER Treat* 255:229–235
- Elsaie Y, Soussa H, Gado M, Balah A (2022) Water desalination in Egypt; literature review and assessment. *Ain Shams Eng J* 14:101998. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101998>
- Fallatah MM, Kavil YN, Ibrahim ASA et al (2018) Hydrographic parameters and distribution of dissolved Cu, Ni, Zn and nutrients near Jeddah desalination plant. *Open Chem* 16:245–257. <https://doi.org/10.1515/chem-2018-0029>
- Farsi A, Rosen MA (2022) Assessment of a geothermal combined system with an organic Rankine cycle and multi-effect distillation desalination. *Earth Syst Environ* 6:15–27
- Fernández-Torquemada Y, Luis Sánchez-Lizaso J (2007) Monitoring of brine discharges from seawater desalination plants in the Mediterranean
- Filali BM, Bessenasse M (2018) Brine outfall discharges modelling and design: case of a desalination plant in Algeria. In: *Recent advances in environmental science from the euro-mediterranean and surrounding regions: Proceedings of Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-1)*, Tunisia 2017. Springer, pp 719–721
- Fodhil F, Bessenasse M, Cherrari I (2019) Feasibility study of grid-connected photovoltaic system for seawater desalination station in Algeria. *Desalin Water Treat* 165:35–44. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24350>

- Guendouzi Y, Boulahdid M, RouaneHacene O et al (2021) Contamination level and ecological risk assessment of particulate trace metals in Southwestern Mediterranean Sea. *Reg Stud Mar Sci* 46:101876. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101876>
- Haied N, Fougou A, Khadri S et al (2023) Spatial and temporal assessment of drought hazard, vulnerability and risk in three different climatic zones in Algeria using two commonly used meteorological indices. *Sustain* 15:12–14. <https://doi.org/10.3390/su15107803>
- Hamiche AM, Stambouli AB, Flazi S (2015) A review on the water and energy sectors in Algeria: current forecasts, scenario and sustainability issues. *Renew Sustain Energy Rev* 41:261–276. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.024>
- Hamiche AM, Stambouli AB, Flazi S, Tayeb A (2020b) Desalination in algeria: photovoltaic power plant for tmm (tahlyat myah magtaa) of oran as a case study. *Handb Environ Chem* 98:285–315. [https://doi.org/10.1007/978-2020\\_538](https://doi.org/10.1007/978-2020_538)
- Hamiche AM, Stambouli AB, Flazi S (2020a) Desalination in Algeria : photovoltaic power plant for TMM ( Tahlyat Myah Magtaa ) of Oran as a case study. <https://doi.org/10.1007/978>
- Helstrup T, Jørgensen NO, Banoeng-Yakubo B (2007) Investigation of hydrochemical characteristics of groundwater from the Cretaceous–Eocene limestone aquifer in southern Ghana and southern Togo using hierarchical cluster analysis. *Hydrogeol J* 15:977–989. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0165-1>
- Hussain MI, Muscolo A, Farooq M, Ahmad W (2019) Sustainable use and management of non-conventional water resources for rehabilitation of marginal lands in arid and semiarid environments. *Agric Water Manag* 221:462–476. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.04.014>
- Jin Y, Du J, Gu D et al (2023) Numerical simulation for optimization of the water intake-outlet arrangements for seawater desalination plants based on MIKE21: a case study of Laoshan Bay. *Qingdao Water* 15:2402. <https://doi.org/10.3390/w15132402>
- Kahlerras M, Meddi M, Benabdelmalek M et al (2018) Modeling water supply and demand for effective water management allocation in Mazafran basin (north of Algeria). *Arab J Geosci* 11:547. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3869-8>
- Kravchishina MD, Lein AY, Sukhanova IN et al (2015) Genesis and spatial distribution of suspended particulate matter concentrations in the Kara Sea during maximum reduction of the Arctic ice sheet. *Oceanology* 55:623–643. <https://doi.org/10.1134/S000143701503008X>
- Kress N, Gertner Y, Shoham-Frider E (2020) Seawater quality at the brine discharge site from two mega size seawater reverse osmosis desalination plants in Israel (Eastern Mediterranean). *Water Res* 171:115402. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115402>
- Libanda B (2023) Performance assessment of CORDEX regional climate models in wind speed simulations over Zambia. *Model Earth Syst Environ* 9:253–262. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01504-5>
- Loizide L (2003) Evaluation des activités de dessalement de l'eau de mer dans la région méditerranéenne et impacts sur l'environnement
- Loya-Fernández Á, Ferrero-Vicente LM, Marco-Méndez C et al (2012) Comparing four mixing zone models with brine discharge measurements from a reverse osmosis desalination plant in Spain. *Desalination* 286:217–224. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.11.026>
- Maddocks RSY, Reig P (2015) Ranking the World's Most Water-Stressed Countries in 2040. In: *World Resour. Inst.* <http://www.wri.org/blog/2015/08/ranking-world's-most-water-stressed-countries-2040>
- Maleika W (2020) Inverse distance weighting method optimization in the process of digital terrain model creation based on data collected from a multibeam echosounder. *Appl Geomatics* 12:397–407. <https://doi.org/10.1007/s12518-020-00307-6>
- Marion GM, Millero FJ, Camões MF et al (2011) PH of seawater. *Mar Chem* 126:89–96. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2011.04.002>
- Missimer TM, Maliva RG (2018) Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. *Desalination* 434:198–215. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.012>
- Mohamed AMO, Maraqa M, Al Handhaly J (2005) Impact of land disposal of reject brine from desalination plants on soil and groundwater. *Desalination* 182:411–433. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.02.035>
- Moradi M, Chertouk N, Ilinca A (2022) Modelling of a wave energy converter impact on coastal erosion, a case study for palm Beach-Azur. *Algeria. Sustain* 14:2. <https://doi.org/10.3390/su142416595>
- Morote ÁF, Olcina J, Hernández M (2019) The use of non-conventional water resources as a means of adaptation to drought and climate change in semi-arid regions: South-eastern Spain. *Water (switzerland)* 11:2. <https://doi.org/10.3390/w11010093>
- Mukherjee SP, Sinha BK, Chattopadhyay AK (2018) Statistical methods in social science research. *Stat Methods Soc Sci Res.* <https://doi.org/10.1007/978-981-13-2146-7>
- Naimi-Ait-Aoudia M, Berezowska-Azzag E (2014) Algiers carrying capacity with respect to per capita domestic water use. *Sustain Cities Soc* 13:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.03.006>
- OJAR OJ of the AR (2006) O. Section 1, article 3
- Oulmane A (2022) Assessment of surface water management institutions : a case of public irrigation schemes in northern Algeria. 24:229–241. <https://doi.org/10.2166/wp.2022.025>
- Palomar PJI (2011) Impacts of brine discharge on the marine environment. Modelling as a predictive tool. *Desal Trends Technol.* <https://doi.org/10.5772/14880>
- Petersen KL, Paytan A, Rahav E et al (2018) Impact of brine and antiscalants on reef-building corals in the Gulf of Aqaba—potential effects from desalination plants. *Water Res* 144:183–191. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.009>
- Petersen KL, Heck N, Reguero BG et al (2019) Biological and physical effects of brine discharge from the Carlsbad Desalination plant and implications for future desalination plant constructions. *Water (switzerland)* 11:2. <https://doi.org/10.3390/w11020208>
- Petrakis G, Tripolitsiotis A, Koutroulis E et al (2020) Geo-informatics for optimal design of desalination plants using renewable energy sources: the DES 2 iRES platform paradigm. *Arab J Geosci* 13:1–11. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06026-x/Published>
- Rezim F, Tachetaoui K (2020) Mémoire de Master en Hydraulique. Université Saad Dahlab - Blida 1
- Roberts DA, Johnston EL, Knott NA (2010) Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: a critical review of published studies. *Water Res* 44:5117–5128. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.04.036>
- Rodier J, Legube B, Merlet N (2016) L'analyse de l'eau-10e éd. Dunod
- Rosner A, Grossmark Y, Gertner Y et al (2023) Genotoxicity signatures near brine outflows from desalination plants in the levant. *Water* 15:1079. <https://doi.org/10.3390/w15061079>
- Sadi A, Kehal S (2003) Retrospectives and potential use of saline water desalination in Algeria. *Desalination* 152:51–56. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01047-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01047-0)
- Sahu P (2021) A comprehensive review of saline effluent disposal and treatment: conventional practices, emerging technologies, and

- future potential. *J Water Reuse Desalin* 11:33–65. <https://doi.org/10.2166/wrd.2020.065>
- Salami ES, Ehetshami M, Karimi-Jashni A et al (2016) A mathematical method and artificial neural network modeling to simulate osmosis membrane's performance. *Model Earth Syst Environ* 2:1–11
- Shammi M, Rahman MM, Islam MA et al (2017) Spatio-temporal assessment and trend analysis of surface water salinity in the coastal region of Bangladesh. *Environ Sci Pollut Res* 24:14273–14290. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8976-7>
- Taibi S (2016) Les facteurs influençant le vieillissement des membranes d'osmose inverse. Étude d'un cas. Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique-Arbaoui Abdellah
- Tarekegn N, Abate B, Muluneh A, Dile Y (2022) Modeling the impact of climate change on the hydrology of Andasa watershed. *Model Earth Syst Environ* 8:103–119. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01063-7>
- Temmar S (2016) Etude de la performance de la station de dessalement de l'eau de mer de Fouka et son impact sur l'environnement marin. Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral (ENSSMAL)
- Tigrine Z, Aburideh H, Abbas M, et al (2018) Membrane desalination technology in algeria: reverse osmosis for coastal areas BT—exergy for a better environment and improved sustainability 2: applications. In: Aloui F, Dincer I (eds). Springer International Publishing, Cham, pp 197–218
- Voutchkov N (2011) Overview of seawater concentrate disposal alternatives. *Desalination* 273:205–219. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.10.018>
- Yang L, Wang L (2023) Emergy analysis of seawater desalination system in coastal areas: a case study in Qingdao of China. *Environ Dev Sustain* 2:1–13
- Zolghadr-Asli B, McIntyre N, Djordjević S et al (2023) A closer look at the history of the desalination industry: the evolution of the practice of desalination through the course of time. *Water Supply* 23:2517–2526. <https://doi.org/10.2166/ws.2023.135>

**Publisher's Note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Springer Nature or its licensor (e.g. a society or other partner) holds exclusive rights to this article under a publishing agreement with the author(s) or other rightsholder(s); author self-archiving of the accepted manuscript version of this article is solely governed by the terms of such publishing agreement and applicable law.