

Republique Algerienne Democratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Kasdi Merbah Ouargla
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil et Hydraulique

Année : 2023 / 2024



N° d'enregistrement :

/.../...../...../...../

THESE

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat 3^{ème} Cycle

Filière: Hydraulique

Spécialité: Hydraulique urbaine

**Etat de déminéralisation des eaux souterraines au Sahara septentrional (Algérie)
et possibilité de réutilisation des eaux de rejet des ces stations**

Présenté et soutenue publiquement

Par :

AMMARI Abdessattar

Devant le jury composé de:

Mr BAOUIA Kais	M C A	Univ Ouargla	Président
Mr KATEB samir	Professeur	Univ Ouargla	Directeur et Rapporteur
Mr BEN MANIN Abdelkader	M C A	Univ Ouargla	Examineur
Mr ZEGAIT Rachid	M C A	Univ Ouargla	Examineur
Mr GHOMRI Ali	Professeur	Univ El oued	Examineur
Mr KHECHANA Salim	Professeur	Univ El oued	Examineur

أجرينا دراسة عن المياه الجوفية في طبقتين الطبقة البيئية القارية (CI) و المركب النهائي (CT) في منطقة الصحراء الشمالية (الجزائر)، حيث تم استخدام تقنيات مختلفة لتقييم جودة المياه الجوفية للشرب و الري. تشمل هذه التقنيات مؤشرات جودة المياه (IQE) و مؤشر جودة المياه للسقي (IQEI)، والتحليل الإحصائي متعدد المتغيرات، ونظم المعلومات الجغرافية (GIS). تم إجراء تحليل فيزيائي كيميائي على عينات المياه الجوفية التي تم جمعها لتحديد تكوينها. أظهرت النتائج أن ترتيب وفرة الأيونات كان $K^+ > Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > NO_3^- > HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$. تقييم جودة المياه الجوفية للري بناءً على مؤشرات مثل مؤشر جودة مياه الري (IQEI)، ومعدل امتزاز الصوديوم (SAR)، ونسبة الصوديوم (%Na)، ونسبة الصوديوم القابلة للذوبان (SSP)، مؤشر كلي (KI)، مؤشر النفاذية (PI)، محتوى كربونات الصوديوم المتبقية (RSC) ومخاطر المغنيسيوم (MH). وتبين التحليلات الجغرافية المكانية أن المياه الجوفية في كل من طبقتي CT و CI ذات نوعية جيدة للري. أظهرت النتائج أن المياه الجوفية معدنية للغاية وغير صالحة للشرب حسب المعايير الجزائرية و معايير منظمة الصحة العالمية، و أن مياه طبقة المتداخل القاري CI أقل ملوحة من طبقة CT. بهدف تحلية المياه الجوفية بواسطة تقنية التناضح العكسي لإنتاج المياه العذبة، أجريت عدة تجارب عن مياه الخام و المعالجة و الصرف، حيث أثبتت النتائج كفاءة محطة تحلية المياه المالحة و كفاءة تقنية التناضح العكسي في الحصول على مياه صالحة للشرب حسب المعايير و حسب مؤشر جودة المياه (IQE= 80.68؛ 69.11 و 40.64 مياه الشرب الجيدة والممتازة). بعد تحلية الماء يتم صرف ماء شديد الملوحة، وله آثار سلبية على البيئة المستقبلية بسبب ارتفاع نسبة الملح. حيث قمنا بدراسة إمكانية إعادة استغلال ماء الصرف للسقي. تمت دراسة جودة مياه الصرف باستخدام مؤشر جودة المياه (IQEI) ومقارنته بمعايير منظمة التغذية و الزراعة (FAO) و معايير جزائرية و معايير منظمة الصحة العالمية للشرب. لم تكن مياه الصرف مناسبة للري أو الاستخدام البشري. تتم عملية تخفيف ماء الصرف عن طريق إضافة المياه الجوفية عن طريق تحديد قيمة TDS (إجمالي الأملاح الذائبة) وفقاً لمعايير الري، ثم حساب كمية المياه الجوفية التي يجب إضافتها باستخدام قانون التركيز للحصول على خليط الماء. انخفض TDS من 4922، 3810 و 2867 ملغ/لتر إلى 2587، 2200 و 1900 ملغم/لتر في محطة الوادي، تقرت و ورقلة على التوالي. تشير مؤشرات جودة المياه للسقي أن ماء بعد الخلط مناسب للسقي. وفي الممارسة العملية، أجريت تجارب مختلفة للتخفيف من تصريف المياه بمعدلات مختلفة بواسطة المياه الجوفية للحد من ملوحتها. العينات المخففة الموجودة بين مياه الصرف 0: 100%، وما بين 100: 0% من مياه جوفية، في 10% زيادات. بعد تخفيف الماء، تم تحليل العناصر الفيزيائية و كيميائية لعينات المياه المخففة في مختبر الجامعة، لحساب مؤشرات جودة مياه للسقي. أظهرت النتائج أن مياه الصرف المخففة مناسبة للري، حيث لوحظت أفضل معدلات التخفيف عند 1:9 و 2:8 و 3:7.

الكلمات المفتاحية: تحلية المياه الجوفية، مياه الشرب، التصريف، الري، الصحراء الشمالية.

Résumé

Nous avons mené une étude sur les eaux souterraines dans le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT) dans la région du Sahara septentrional (Algérie), où différentes techniques ont été utilisées pour évaluer la qualité des eaux souterraines pour la consommation et l'irrigation. Ces techniques comprennent les indicateurs de qualité de l'eau (IQE), l'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IQEI), l'analyse statistique multivariable et le SIG. Une analyse physico-chimique a été effectuée sur des échantillons d'eaux souterraines prélevés pour déterminer leur composition. Les résultats ont montré que l'ordre d'abondance des ions était $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ et $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$. L'évaluation de la qualité des eaux souterraines pour l'irrigation est basée sur des indicateurs tels que l'IQEI, le taux d'adsorption du sodium (SAR), le pourcentage de sodium (Na%), le rapport sodium soluble (SSP), l'indice de Kelly (KI), l'indice de perméabilité (PI), la teneur résiduelle en carbonate de sodium (RSC) et le risque de magnésium (MH). Les analyses géospatiales montrent que les eaux souterraines des couches CT et CI sont de bonne qualité pour l'irrigation. Les résultats ont montré que les eaux souterraines sont extrêmement minéralisées et imbuables selon les normes algériennes et celles de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). De plus, l'eau de la couche CI est moins saline que celle de la couche CT. Dans le but de dessaler les eaux souterraines par osmose inverse pour la production d'eau douce, plusieurs expériences ont été menées sur l'eau brute, l'eau traitée et l'eau de rejet. Les résultats ont démontré l'efficacité de la station de déminéralisation et de la technique d'osmose inverse pour obtenir de l'eau potable selon les normes et l'indice de qualité de l'eau (IQE = 80,68; 69,11 et 40,64 pour une eau potable bonne et excellente). Après la déminéralisation, l'eau hautement saline est drainée et a des effets négatifs sur le milieu récepteur en raison du pourcentage élevé de sel. Nous avons étudié la possibilité de réutiliser l'eau de rejet pour l'irrigation. La qualité des eaux de rejet a été étudiée à l'aide de l'IQEI et comparée aux normes de consommation de la FAO, de l'Algérie et de l'OMS. Les eaux de rejet ne convenaient pas à l'irrigation ou à l'utilisation humaine. La dilution de l'eau de rejet se fait en ajoutant de l'eau souterraine, en déterminant la valeur des TDS (total des sels dissous) selon des critères d'irrigation, puis en calculant la quantité d'eau souterraine à ajouter en utilisant la loi des concentrations pour obtenir le mélange d'eau. Les TDS ont diminué de 4922, 3810 et 2867 mg/L à 2587, 2200 et 1900 mg/L aux stations de El-Oued, Touggourt et Ouargla respectivement. Les indicateurs de qualité de l'eau pour l'irrigation montrent que l'eau après le mélange convient à l'irrigation. En pratique, diverses expériences ont été menées pour atténuer le rejet d'eau à différents taux par les eaux souterraines afin de réduire leur salinité. Des échantillons dilués ont été préparés avec des proportions allant de 0:100% à 100:0% d'eaux souterraines, par augmentations de 10%. Après dilution de l'eau, les éléments physiques et chimiques des échantillons d'eau diluée ont été analysés dans le laboratoire de l'université pour calculer les indicateurs de qualité de l'eau pour l'irrigation. Les résultats ont montré que les eaux de rejet

diluées conviennent à l'irrigation, car les meilleurs taux d'atténuation ont été observés à 9:1, 8:2 et 7:3.

Mots clés: Déminéralisation des eaux souterraines, Eau potable, Irrigation, Rejet, Sahara septentrional.

Abstract

We conducted a groundwater study in the Continental Intercalaire (CI) and the Complexe Terminal (CT) in the northern Sahara region (Algeria), where different techniques were used to assess groundwater quality for drinking and irrigation. These techniques include water quality indicators (WQI), irrigation water quality index (IWQI), multivariate statistical analysis and GIS. Physico-chemical analysis was carried out on groundwater samples taken to determine their composition. The results showed that the order of ion abundance was $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ and $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$. Assessment of groundwater quality for irrigation is based on indicators such as WQI, sodium adsorption rate (SAR), sodium percentage (Na%), soluble sodium ratio (SSP), Kelly index (KI), permeability index (PI), residual sodium carbonate content (RSC) and magnesium hazard (MH). Geospatial analyses show that groundwater in the CT and CI layers is of good quality for irrigation. The results showed that the groundwater is extremely mineralized and undrinkable by Algerian and World Health Organization (WHO) standards. What's more, the water in the CI layer is less saline than that in the CT layer. With the aim of desalinating groundwater by reverse osmosis for freshwater production, several experiments were carried out on raw water, treated water and discharge water. The results demonstrated the effectiveness of the demineralization plant and the reverse osmosis technique in obtaining drinking water in compliance with standards and the water quality index (WQI = 80.68; 69.11 and 40.64 for good and excellent drinking water). After demineralization, the highly saline water is drained and has negative effects on the receiving environment due to the high percentage of salt. We studied the possibility of reusing the discharge water for irrigation. The quality of the discharge water was studied using the IQEI and compared with the consumption standards of the FAO, Algeria and the WHO. The discharge water was not suitable for irrigation or human use. Discharge water is diluted by adding groundwater, determining the TDS (total dissolved salts) value according to irrigation criteria, then calculating the quantity of groundwater to be added using the law of concentrations to obtain the water mixture. TDS decreased from 4922, 3810 and 2867 mg/L to 2587, 2200 and 1900 mg/L at the El-Oued, Touggourt and Ouargla stations respectively. Water quality indicators for irrigation show that the water after blending is suitable for irrigation. In practice, various experiments were carried out to mitigate the release of water at different rates from groundwater to reduce its salinity. Diluted samples were prepared with proportions ranging from 0:100% to 100:0% groundwater, in 10% increments, i.e. 0:10, 1:9, 2:8, 3:7, 4:6, 5:5, 6:4, 7:3, 8:2 and 9:1. After water dilution, the physical and chemical elements of the diluted water samples were analyzed in the university laboratory to calculate water quality indicators for irrigation. The results showed that diluted discharge water is suitable for irrigation, as the best attenuation rates were observed at 9:1, 8:2 and 7:3.

Keywords: Groundwater demineralization, Drinking water, Discharge, Irrigation, Northern Sahara.

Dédicaces

Merci Dieu, dont la grâce, la justice est faite, grâce à laquelle la bienveillance et les bénédictions descendent et avec son compromis. Les buts et les fins sont atteints et les prières et les livraisons de Dieu à l'envoyé de miséricorde aux deux mondes Prophète et Imam Al-Huda Seydna Mohammed, Allah et ses compagnons sont toutes.

Je donne cette œuvre à mes parents qui ont été épargnés par Dieu, et à tous ceux qui m'ont aidé et se sont tenus à mes côtés, et à mes frères et sœurs.

En plus d'un cadeau spécial au fils de Mohammed Saif Islam, je demande à Dieu de me le rendre bientôt.

Mon meilleur ami qui s'est tenu avec moi tout au long de sa carrière de Ph.D. et m'a aidé dans chaque petit et grand.

AMMARI Abdessattar

Remerciements

Merci à Dieu qui m'a donné la force de compléter ce travail de recherche. Je tiens également à remercier le professeur Kateb Samir, qui a supervisé la formulation de ma thèse de ses conseils et orientations. Je remercie les professeurs en discussion d'avoir accepté de revoir ce travail et je remercie également tous ceux qui m'ont accompagné et aidé.

J'offre également ce travail à ceux qui m'ont étudié de l'élémentaire à aujourd'hui, et je remercie les professeurs de l'université d'El-Oued, le département d'Hydraulique, en particulier Ghomri Ali, Khachana Salim, Miloudi Abdel Moneim.

AMMARI Abdessattar



TABLE DES MATIÈRES

Résumé

Dédicaces

Remerciements

TABLE DES MATIÈRES

Liste des tableaux

Liste des figures

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I: Synthèse bibliographique

I.1. Introduction 4

I.2. Eau 4

I.2.1. Eau dans la nature 4

I.3. Différentes états de l'eau 5

I.3.1. État solide 5

I.3.2. État liquide..... 5

I.3.3. État de vapeur 5

I.4. Les sources d'eau 6

I.4.1. Les eaux superficielles 6

I.4.2. Eaux souterraines 6

I.5. Dessalement des eaux 7

I.5.1. Historique le dessalement dans le monde et en Algérie..... 7

I.5.1.1. Le dessalement dans le monde..... 7

I.5.1.2. Le dessalement en Algérie 8

I.6. Les procédés de dessalement des eaux 8

I.6.1. Les procédés de distillation: 10

I.6.1.1. Distillation à multiple effet 10

I.6.1.2. distillation par compression de vapeur..... 10

I.6.1.3. Distillation par détentes successives (multi-stage flash):..... 11

I.6.1.4. Distillation solaire..... 11

I.6.1.5. Le dessalement par congélation 12

I.6.2.1. Osmose inverse 12

I.6.2.1.1. Principe de l'osmose inverse 13

I.6.2.2. électrodialyses..... 13

I.6.2.2.1. Principe électrodialyses 14

I.6.2.3. Nanofiltration..... 14

I.6.3. procédé chimique 15

I.6.3.1. Echange ions 15

I.7. Indice de qualité de l'eau (IQE) 15

I.8. Indice de qualité de l'eau d'irrigation (IQEI)..... 16

I.9. Études antérieures sur la déminéralisation des eaux 17

I.10. Études antérieures sur la réutilisation des eaux de rejet..... 18

I.11. Conclusion 19

Chapitre II: Présentation de la zone d'étude

II.1. Introduction 20

II.2. Sahara septentrional.....	20
II.3. Les simulations exploratoires	21
II.4. Les eaux souterraines au Sahara septentrional	21
II.4.1. Qualité chimique des eaux.....	22
II.4.1.1. Salinité de l'eau dans l'aquifère du complexe terminal	22
II.4.1.1.1. Nappes des sables mio-pliocènes.....	22
II.4.1.1.2. Nappe des calcaires	23
II.4.1.2. Salinité de l'eau de l'aquifère continental Intercalaire	23
II.5. Les stations de déminéralisation dans le Sahara septentrional (Algérie)	23
II.6. Présentation des stations d'étude	24
II. 6.1. La station de déminéralisation de la commune d'El-oued.....	25
II.6.2. Les stations de déminéralisation dans wilaya Touggourt	25
II.6.3. La station de déminéralisation El Hdeb.....	25
II.7. Fonctionnement de les stations.....	26
II.8. Les composant des stations.....	27
II.8.1. Les forages	27
II.8.2. Une tour de refroidissement	27
II.8.3. Réservoir de stockage d'eau brute	27
II.8.4. Pompe d'alimentation des filtres à sable.....	28
II.8.5. Filtre à sable	28
II.8.6. Bassin d'eau prétraitée (filtrée)	28
II.8.7. Sonde de lecture	29
II.8.8. Pompe d'alimentation du filtre à cartouche	29
II.8.9. Filtre à cartouche	29
II.8.10. Pompe d'alimentation les osmoseurs.....	29
II.8.11. Unité d'osmose inverse	29
II.8.12. Station de lavage et de rinçage	30
II.8.13. Bassin de stockage des eaux traitées	30
II.8.14. Pompe d'alimentation du château d'eau	31
II.8.15. Pompe doseuse de chlore.....	31
II.8.16. Bassin de rejet	31
II.8.17. Système anti-retour d'eau	31
II.8.18. Laboratoire d'analyse	31
II.9. Les procédés de traitement des eaux salées.....	31
II.9.1. Le prétraitement.....	31
II.9.1.1. Alimentation en eau brute de la station.....	31
II.9.1.2. Le refroidissement d'eau	32
II.9.1.3. Filtration	32
II.9.1.3.1. Le filtre à sable	32
II.9.1.3.2. L'opération de filtration.....	33
II.9.1.3.3. Principe de fonctionnement de ces filtres	33
II.9.1.4. La microfiltration.....	34
II.9.1.4.1. Le filtre à cartouche	34
II.9.1.4.2. Système de pompage pour l'alimentation des filtres à cartouche	34
II.9.1.4.3. Le principe de fonctionnement des filtres de station.....	34
II.9.1.5. Préparation chimique de l'eau avant l'osmose inverse	34
II.9.1.5.1. Dosage du Bisulfite de Sodium.....	34

II.9.2. Le traitement	35
II.9.2.1. Définition du principe de l'osmose inverse.....	35
II.9.2.2. Equipement de pompage pour alimenter les membranes.....	35
II.9.2.3. Système membranaire d'osmose inverse	35
II.9.2.4. Le nettoyage des membranes	35
II.9.2.4.1. Le colmatage	36
II.9.2.4.2. Le colmatage a comme conséquences.....	36
II.9.3. Post traitement.....	36
II.9.3.1. Eau osmosée.....	36
II.9.3.2. Le Principe de mélange	37
II.9.3.3. Equipement de pompage d'eau traitée	37
II.9.3.3.1. Ajustement du pH.....	37
II.9.3.3.2. Chloration.....	37
II.10. Le rejet de la saumure des stations de déminéralisation	37
II.10.1. Quantité des eaux de rejet.....	38
II.10.2. Le milieu récepteur du rejet.....	38
II.10.2.1. Le milieu récepteur du rejet de la station de déminéralisation d'El-oued	38
II.10.2.1.1. Situation du milieu récepteur d'El-oued	38
II.10.2.2. Le milieu récepteur du rejet de la station de déminéralisation de Touggourt.....	39
II.10.2.3. Le milieu récepteur du rejet de la station de déminéralisation d'Ouargla	40
II.10.2.3.1. Situation du milieu récepteur d'Ouargla	40
II.10.3. Indicateurs de supervision de l'impact environnemental de rejet des	40
II.10.3.2. Salinité.....	41
II.10.3.3. Le pH.....	41
II.10.3.4. L'oxygène dissous.....	41
II.10.4. Impacts environnementaux de la déminéralisation des eaux	41
II.10.4.1. Impacts positifs.....	41
II.10.4.2. Impacts négatifs.....	41
II.10.5. Impacts environnementaux négatifs associés au processus de	42
II.10.6. Impacts du rejet sur le milieu récepteur.....	42
II.10.6.1. Impact du rejet sur l'agriculture	42
II.10.6.2. Impact de rejet dans les dunes de sable en milieu naturel	42
II.10.6.2.1. Impact de la remontée des eaux sur le sol	43
II.10.6.2.2. Salinisation de l'eau d'irrigation.....	43
II.10.6.2.3. Impact de la salinité sur la terre.....	44
II.10.6.3. Effet du rejet sur les animaux sauvages et au pâturage	44
II.10.6.4. Effets du rejet sur les humains.....	44
II.10.6.5. Effets des produits de corrosion	44
II.10.6.5.1. Les traces de métaux	44
II.10.6.5.2. Effet du concentré (saumure)	44
II.10.7. L'impact négatif potentiel du rejet de la station de déminéralisation sur le milieu récepteur	45
II.10.7.1. Facteurs des rejets.....	45
II.11. Conclusion.....	45
Chapitre III: Matériels et méthodes	
III.1. Introduction.....	47
III.2. Échantillonnage.....	47

III.3. Mesures in situ	48
III.3.1. pH.....	48
III.3.2. Température	49
III.3.3. Conductivité électrique	49
III.4. Mesures et analyses au laboratoire.....	49
III.4.1. Validité des résultats	49
III.5. Traitement des résultats.....	50
III.5.1. Le logiciel statistique « R ».....	50
III.5.2. L'analyse en composant principales (ACP)	51
III.6. Cartographie.....	51
III.6.1. Présentation d'ArcGIS	52
III.6.2. Méthodologie adopté pour l'interpolation.....	52
III.7. Méthodes d'évaluations de la qualité des eaux	52
III.7.1. Calcul de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE)	52
III.7.2. Indicateurs utilisés pour l'évaluation de l'aptitude de l'eau à l'irrigation	55
III.7.2.1. Indice de perméabilité (PI).....	55
III.7.2.2. L'indice de Kelly (KI).....	55
III.7.2.3. Pourcentage de sodium (Na%) ou pourcentage de solubilité du sodium (SSP%)	56
III.7.2.4. Sodium Absorption Ratio (SAR)	56
III.7.2.5. Le carbonate de sodium résiduel (CSR).....	57
III.7.2.6. Risque de magnésium (MH)	57
III.7.3. Indice de Qualité de l'Eau d'Irrigation (IQEI)	58
III.8. Conclusion	60
Chapitre IV: Évaluation de la qualité des eaux souterraines, des eaux brutes, traitées et rejet	
IV.1. Introduction.....	61
IV.2. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines	61
IV.3. Interprétation des résultats	63
IV.4. Faciès hydrogéochimiques.....	66
IV.5. Classification de la qualité des eaux souterraines par valeur IQE.....	67
IV.6. Classification de la qualité des eaux souterraines pour l'IQEI	68
IV.6.1. Rapport d'adsorption du sodium	68
IV.6.3. Carbonate de sodium résiduel	71
IV.6.4. Risques liés au magnésium	71
IV.6.5. Indice de Kelly.....	71
IV.6.6. Indice de perméabilité.....	71
IV.7. Distribution géospatiale de la qualité des eaux souterraines	72
IV.8. Analyse bi variée (corrélation des paramètres).....	81
IV.9. Composantes principales et analyse en grappes.....	82
IV.9.1. Analyse en composantes principales.....	82
IV.9.2. L'analyse par grappes	84
IV.10. Évaluation de la qualité des eaux brutes des stations de déminéralisation.....	84
IV.10.1. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux brutes.....	84
IV.10.2. Interprétation des résultats.....	85
IV.10.2.1. La conductivité électrique	85
IV.10.2.2. Potentiel hydrogène (pH)	86
IV.10.2.3. Dureté totale (TH).....	87
IV.10.2.4. Les sels dissous totaux (TDS)	87

IV.10.2.5. Cations/Anions	88
IV.10.2.6. Les nitrates (NO ₃ ⁻)	91
IV.10.3. Faciès chimiques des eaux	92
IV.11. Évaluation de la qualité des eaux traitées des stations de déminéralisation	93
IV.11.1. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux traitées	93
IV.11.2. Interprétation des résultats.....	93
IV.11.2.1. La conductivité électrique	93
IV.11.2.2. Potentiel hydrogène (pH)	94
IV.11.2.3. La dureté total (TH)	94
IV.11.2.4. Les sels dissous totaux (TDS)	95
IV.11.2.5. Cations/Anions	96
IV.11.2.6. Les nitrates (NO ₃ ⁻)	99
IV.11.3. Calcul de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) des eaux traitées.....	99
IV.12. Évaluation de la qualité des eaux rejet des stations de déminéralisation	100
IV.12.1. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de rejet.....	100
IV.12.2. Interprétation des résultats.....	100
IV.12.2.1. La conductivité électrique	101
IV.12.2.2. Potentiel hydrogène (pH)	101
IV.12.2.3. La dureté totale (TH)	102
IV.12.2.4. Les sels dissous totaux (TDS)	102
IV.12.2.5. Cations et Anions.....	103
IV.12.2.6. Les nitrates (NO ₃ ⁻)	105
IV.12.3. Qualité de l'eau de rejet	106
IV.13. Conclusion	107
Chapitre V: Etude de la possibilité de la réutilisation des eaux de rejet	
V.1. Introduction.....	111
V.2. Réutilisation des eaux de rejet	111
V.3. Domaines de réutilisation des eaux de rejet	112
V.3.1. Réutilisation des eaux de rejet dans l'industrie	112
V.3.2. Réutilisation des eaux de rejet en agriculture.....	112
V.3.3. L'aquaculture	112
V.3.4. Recharge des nappes	112
V.4. Domaine de réutilisation des eaux de rejet dans cette étude	112
V.4.1. Avantages de la réutilisation des eaux de rejet pour l'irrigation.....	112
V.5. Enjeux de la réutilisation des eaux de rejet en agriculture	112
V.5.1. Enjeux environnementaux.....	113
V.5.2. Enjeux économiques	113
V.5.3. Enjeux sociaux	114
V.6. Etude de la possibilité de la réutilisation des eaux de rejet de la station de déminéralisation dans région au Sahara septentrional.....	114
V.6.1. La méthode numérique	114
V.6.1.1. La station de déminéralisation dans la zone d'Ouargla.....	115
V.6.1.2. La station de déminéralisation dans la zone de Touggourt	116
V.6.1.3. La station de déminéralisation dans la zone d'El-Oued	116
V.6.1.4. Résultats de mesure et d'analyse des paramètres physico-chimiques des eaux.....	116
V.6.1.5. Interprétation des résultats	117
V.6.1.5.1. La salinité	118

V.6.1.5.2. pH.....	118
V.6.1.5.3. Conductivité électrique	119
V.6.1.5.4. Solides dissous totaux (TDS).....	120
V.6.1.5.5. La dureté totale (TH).....	121
V.6.1.5.6. Calcium (Ca^{2+})	121
V.6.1.5.7. Magnésium (Mg^{2+}).....	122
V.6.1.5.8. Sodium (Na^+).....	123
V.6.1.5.9. Potassium (K^+)	124
V.6.1.5.10. Sulfate (SO_4^{2-})	124
V.6.1.5.11. Bicarbonates (HCO_3^-).....	125
V.6.1.5.12. Chlorures (Cl^-):.....	126
V.6.1.5.13. Nitrate (NO_3^-):.....	127
V.6.1.6. Calcul des indicateurs d'évaluation de la qualité de l'eau pour l'irrigation.....	128
V.6.1.7. L'évaluation de qualité de l'eau pour d'irrigation par indicateurs d'irrigation	129
V.6.1.8. Exploitation du mélange d'eau pour l'irrigation agricole	133
V.6.2. La méthode de dilution de la saumure (La partie expérimentale)	133
V.6.2.1. Le principe d'expérience	133
V.6.2.3. Interprétation des résultats	138
V.6.2.3.1. pH	138
V.6.2.3.2. Conductivité électrique	138
V.6.2.3.3. Solides dissous totaux (TDS).....	138
V.6.2.3.4. Calcium (Ca^{2+})	139
V.6.2.3.5. Magnésium (Mg^{2+}).....	139
V.6.2.3.6. Sodium (Na^+)	139
V.6.2.3.7. Potassium (K^+)	139
V.6.2.3.8. Chlorures (Cl^-)	139
V.6.2.3.9. Sulfate (SO_4^{2-}).....	140
V.6.2.3.10. Bicarbonates (HCO_3^-)	140
V.6.2.4. Résultats du calcul des indicateurs de qualité de l'eau pour différents taux de	140
V.6.2.5. Interprétation des résultats des analyses et calcul des indicateurs	142
V.6.2.6. Comparaison entre résultats expérimentaux et résultats théoriques.....	143
V.7. Conclusion	145
CONCLUSION GENERALE.....	147
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	

Liste des tableaux

Tableau II.1. Les stations de déminéralisation dans le Sahara septentrional (Algérie).....	24
Tableau III.1. Les poids attribués et les poids relatifs des paramètres physico-chimiques.	53
Tableau III.2. Classification de la qualité de l'eau par valeur IQE.	54
Tableau III.3. Valeurs pour les mesures de qualité (q_i).	58
Tableau III.4. Poids relatif (P_i) de chaque paramètre dans l'IQEI.	59
Tableau IV.1. Normes de potabilisation des eaux.	62
Tableau IV.2. Les normes des eaux d'irrigation.	62
Tableau IV.3. Description statistique des propriétés physico- chimiques des échantillons.	63
Tableau IV.4. Classification de l'IQE, pourcentage d'eau souterraine et type d'eau.	68
Tableau IV.5. Classification de l'eau d'irrigation sur la base du SAR et de la CE.	69
Table IV.6. Classification des échantillons d'eau souterraine selon différents paramètres.	72
Table IV.7. Matrice des Composantes Principales.	83
Tableau IV.8. Les valeurs des analyses physico-chimiques de l'eau brute.	85
Tableau IV.9. Résultats de l'analyse physico-chimique de l'eau traitée.	93
Tableau IV.10. Classification de la qualité de l'eau basée sur la valeur IQE des échantillons étudiés.	100
Tableau IV.11. Les valeurs des analyses physico-chimiques de rejet.	100
Tableau V.1. Résultats de la mesure et de l'analyse de l'eau.	117
Tableau V.5. Les valeurs calculées des indicateurs.	129
Tableau V.6. Classification des échantillons d'eau étudiés selon différents paramètres pour la station d'El-Oued.	129
Tableau V.7. Classification des échantillons d'eau étudiés selon différents paramètres pour la station de Touggourt.	130
Tableau V.8. Classification des échantillons d'eau étudiés selon différents paramètres pour la station d'Ouargla.	130
Tableau V.9. Résultats des analyses du mélange d'eau pour différents taux de dilution pour la station d'El-oued.	136
Tableau V.10. Résultats des analyses du mélange d'eau pour différents taux de dilution pour la station de Touggourt.	137
Tableau V.11. Résultats des analyses du mélange d'eau pour différents taux de dilution pour la station d'Ouargla.	137
Tableau V.12. Résultats du calcul des indicateurs de qualité de l'eau pour différents taux de dilution cas de la station El-Oued.	140
Tableau V.13. Résultats du calcul des indicateurs de qualité de l'eau pour différents taux de dilution cas de la station de Touggourt.	141
Tableau V.14. Résultats du calcul des indicateurs de qualité de l'eau pour différents taux de dilution cas de la station Ouargla.	141
Tableau V.15. Classification des échantillons l'eau pour différents taux de dilution cas de la station El-Oued.	143
Tableau V.16. Classification des échantillons l'eau pour différents taux de dilution cas de la station Touggourt.	144
Tableau V.17. Classification des échantillons l'eau pour différents taux de dilution cas de la station Ouargla.	144

Liste des figures

Figure I.1. Différents procédés de dessalement	9
Figure I.2. Schéma d'une installation de dessalement	9
Figure I.3. Distillation par multiples effets.	10
Figure I.4. Distillation par compression de vapeur.	11
Figure I.5. Distillation par détente successives.....	11
Figure I.6. Distillation solaire.	12
Figure I.7. Principe de l'osmose et de l'osmose inverse	13
Figure I.8. Principe d'électrodialyse.	14
Figure II.1. Carte des eaux souterraines (CI et CT)	22
Figure II.2. Carte de la zone d'étude.	25
Figure II.3. Schémas de fonctionnement de la station.....	26
Figure II.4. Une tour de refroidissement.	27
Figure II.5. Réservoir de stockage des eaux brutes.	27
Figure II.6. Pompe d'alimentation des filtres à sable.....	28
Figure II.7. Unités Filtre à sable.....	28
Figure II.8. Les filtres à cartouche.	29
Figure II.9. Unité d'osmose inverse.	30
Figure II.10. Emplacement du point de déchargement "Chott HALLOUFA".	39
Figure II.11. Canal d'Oued Righ et son exutoire naturel Chott Merouane	39
Figure II.12. Situation du milieu récepteur vers Sebkhaf Safioune	40
Figure III.1. La zone d'étudiée d'El-oued et des lieux d'échantillonnage.	48
Figure III.1. Diagramme de Piper pour les échantillons d'eau souterraine en région El-oued entre 2021 et 2022.....	66
Figure III.2. Classification des échantillons d'eau étudiés selon le diagramme de Chadha.	67
Figure IV.3. Aptitude des eaux souterraines à l'irrigation selon la classification de l'USSL.	70
Figure IV.4. Tracé du pourcentage de sodium (%Na) en fonction de la CE.	71
Figure IV.5. Distribution spatiale de l'IQE à la région d'El-oued.	73
Figure IV.6. Des paramètres physicochimiques dans la zone d'étude.	77
Figure IV.7. Distribution des caractéristiques de l'eau d'irrigation à la région d'El-oued.....	81
Figure IV.9. (a) Projection des variables sur le plan principal 1-2, (b) Classification en groupes.	84
Figure IV.10. Les valeurs de la conductivité électrique de l'eau brute avec NA et OMS.	86
Figure IV.11. Variation de Potentiel hydrogène des eaux brutes.	86
Figure IV.12. Variation de la dureté totale des eaux brutes.....	87
Figure IV.13. Variation des sels dissous totaux des eaux brutes.....	88
Figure IV.14. Les valeurs de calcium des eaux brutes.	89
Figure IV.15. Les valeurs de magnésium des eaux brutes.	89
Figure IV.16. Les valeurs de sodium des eaux brutes.	89
Figure IV.17. Les valeurs de potassium des eaux brutes.	90
Figure IV.18. Les valeurs de chlorure des eaux brutes.	90
Figure IV.19. Les valeurs de sulfate des eaux brutes.	90
Figure IV.20. Les valeurs de bicarbonates des eaux brutes.	91
Figure IV.21. Variation de nitrates des eaux brutes.	91

Figure IV.22. Diagramme de Piper montrant les faciès hydrogéochimiques de l'eau brute.	92
Figure IV.23. Variation de la CE de l'eau traitée.	94
Figure IV.24. Les valeurs du pH de l'eau traitée.	94
Figure IV.25. Variation de la TH de l'eau traitée.	95
Figure IV.26. Variation des sels dissous totaux de l'eau traitée.	95
Figure IV.27. Variation du calcium dans l'eau traitée.	96
Figure IV.28. Variation du magnésium dans l'eau traitée.	97
Figure IV.29. Variation du sodium dans l'eau traitée.	97
Figure IV.30. Variation du potassium dans l'eau traitée.	97
Figure IV.31. Les valeurs de chlorure dans l'eau traitée.	98
Figure IV.32. Les valeurs de sulfate dans l'eau traitée.	98
Figure IV.33. Les valeurs de bicarbonate dans l'eau traitée.	98
Figure IV.34. Variation du nitrate dans l'eau traitée.	99
Figure IV.35. Variabilité de la conductivité électrique des eaux de rejet.	101
Figure IV.36. Variabilité du potentiel hydrogène des eaux de rejet.	101
Figure IV.37. Variabilité de la dureté totale des eaux de rejet.	102
Figure IV.38. Variabilité des sels dissous totaux dans les eaux de rejet.	102
Figure IV.39. Variabilité de calcium des eaux de rejet.	103
Figure IV.40. Variabilité du magnésium des eaux de rejet.	103
Figure IV.41. Variabilité du sodium des eaux de rejet.	104
Figure IV.42. Variabilité du potassium des eaux de rejet.	104
Figure IV.43. Variabilité du chlorure des eaux de rejet.	104
Figure IV.44. Variabilité de sulfate des eaux de rejet.	105
Figure IV.45. Variabilité du bicarbonates dans les eaux de rejet.	105
Figure IV.46. variabilité des nitrates des eaux de rejet.	106
Figure V.1. Organigramme méthodologique.	115
Figure V.2. Variation des valeurs de la salinité des eaux.	118
Figure V.3. Variation des valeurs de pH des eaux.	119
Figure V.4. Variation des valeurs de conductivité électrique des eaux.	120
Figure V.5. Variation des valeurs TDS dans l'eau.	120
Figure V.6. Variation des valeurs de la dureté totale (TH) des eaux.	121
Figure V.7. Variation des valeurs de Calcium (Ca^{2+}) des eaux.	122
Figure V.8. Variation des valeurs de Magnésium (Mg^{2+}) des eaux.	123
Figure V.9. Variation des valeurs de Sodium (Na^+) des eaux.	123
Figure V.10. Variation des valeurs de Potassium (K^+) des eaux.	124
Figure V.11. Variation des valeurs de Sulfate (SO_4^{2-}) des eaux.	125
Figure V.12. Variation des valeurs de Bicarbonates (HCO_3^-) des eaux.	126
Figure V.13. Variation des valeurs de Cl^- des eaux.	127
Figure V.14. Variation des valeurs des nitrates des eaux.	127
Figure V.15. Diagram de wilcox pour les trois types de l'eau.	131
Figure V.16. Diagram USSL pour la classification de l'eau pour l'irrigation.	132
Figure V.17. Expérience de la dilution de l'eau de rejet en utilisant les eaux souterraines.	136

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les eaux souterraines sont une source essentielle d'eau propre dans le monde entier. L'eau souterraine est la seule source d'eau dans les zones arides et semi-arides et est exploitée pour la consommation humaine, l'irrigation agricole et le domaine industriel. La gestion des eaux souterraines est cruciale pour résoudre divers problèmes qualitatifs et quantitatifs afin de comprendre le comportement des eaux souterraines, spatial et temporel (**Gleeson et al., 2015**).

En outre, une méconnaissance de la nature de la ressource due au changement climatique, une croissance démographique rapide, une mauvaise gestion et des approches mal coordonnées et intégrées sont des contributeurs majeurs à la dégradation continue de cette ressource naturelle (**Ravikumar et al., 2011**). Dans la zone Sahara septentrional de l'Algérie, les aquifères peu profonds étaient la principale source d'eau potable. Toutefois, en raison de la croissance exponentielle de la demande d'eau due à l'urbanisation, à l'accroissement de la population et au besoin de développement économique, la qualité minérale des eaux souterraines profondes au niveau de l'aquifère terminal continental a connu une diminution perpétuelle au cours des dernières années (**Kadri & Chaouche, 2018**). De nombreux auteurs ont évalué la qualité des eaux souterraines du complexe terminal et intercalaire continental pour divers usages, plus particulièrement la boisson. **Bouselsal & Saibi, (2022)** montrent que la qualité de l'eau n'est pas conforme aux normes d'eau potable. Aussi, **Bouselsal et al., (2014)** ont démontré que les aquifères de surface d'El-Oued sont de très mauvaise qualité pour la consommation, fortement minéralisée et très dure, dépassant les directives de l'OMS. **Warda et al., (2014)** ont constaté que les eaux souterraines de la nappe albienne d'Oued Righ présentent un risque de salinité très élevé et une alcalinité faible. **Barkat et al., (2021)** constatent que les valeurs de l'indice de qualité de l'eau du complexe terminal souterrain à la zone d'El-Oued indiquent qu'il est impropre à la consommation. Les conclusions des recherches précédentes indiquent que les eaux souterraines sont trop minérales pour être consommées et dépassent les directives de l'OMS et du NA. La salinité des eaux souterraines est un problème majeur dans l'approvisionnement en eau pour diverses utilisations. L'une des solutions les plus importantes est l'utilisation de ressources en eau non conventionnelle telles que la déminéralisation de l'eau salée. Par conséquent, le processus de déminéralisation des eaux souterraines est donc la solution idéale pour fournir des eaux potables et divers usages. La construction des stations de déminéralisation d'eau salée est un projet urgent et actuellement très important, compte tenu de l'importance critique du programme de dessalement. Le Sahara septentrional algérien a bénéficié d'un vaste programme de construction des stations de déminéralisation des eaux souterraines. Les stations d'eau du Sahara septentrional sont alimentées en eau brute à partir de forages réalisés dans la nappe complexe terminale ou continentale

intercalaire. Les stations de déminéralisation traitent les eaux souterraines à l'aide de plusieurs techniques, telles que l'osmose inverse, couramment utilisée dans le Sahara septentrional algérien. Après traitement de l'eau brute à l'aide de la technologie d'osmose inverse, l'eau traitée contient 75 % d'eau brute et les eaux de rejet contiennent 25 % d'eau brute. Le sous-produit de la déminéralisation de l'eau brute est connu sous le nom de saumure. La saumure est une eau de rejet très concentrée qui a un impact néfaste sur l'environnement en raison de sa salinité élevée (**Hoopner&Widdelberg, 1996**). Une exposition prolongée à long terme à une telle eau salée, même en quantités infimes, peut avoir des effets néfastes inimaginables sur nos écosystèmes. Les caractéristiques de la station de dessalement et de son rejet de saumure détermineront l'ampleur de cette influence (**Latteman&Höpner, 2003**). Pour les stations de déminéralisation dans les zones du Sahara septentrional, la saumure est déversée dans l'environnement. Les conséquences de ce phénomène sont nocives pour les humains et l'environnement. Comme la région d'étude est une zone agricole et que la solution saline a des impacts négatifs sur le milieu naturel, la possibilité de réutiliser l'eau de rejet dans l'irrigation sera étudiée. L'information sur la qualité de l'eau d'irrigation est essentielle pour comprendre les différences de la qualité des produits et les ajustements de la gestion de l'eau (**Ramakrishnaiah et al.,2009**). Les solides dissous totaux, les cations majeures et les anions majeurs sont généralement utilisés pour définir la qualité de l'eau d'irrigation (**Etteieb et al., 2017**). La salinité, la perméabilité réduite et la toxicité accrue de certains ions sont les problèmes associés à la mauvaise qualité de l'eau (**Singh et al., 2018**).

Bouselsal & Saibi., (2022); Barkat et al., (2021) ont évalué la qualité de l'eau d'irrigation et leur influence sur les sols et les plantes à l'aide de plusieurs techniques telles que les indices hydrochimiques (SAR, Na %, KI, PI, RSC et MH). **Hem, (1985)** a proposé que l'utilisation d'une analyse chimique combinée de tous les ions conduit à des résultats plus précis et meilleurs que l'usage d'un seul paramètre. L'IQEI est calculé par plusieurs indicateurs et exprime la qualité de l'eau en nombre numérique, ce qui en fait une approche privilégiée (**Saedi et al., 2010**).

Dans cette thèse, nous visons à mener une étude sur la déminéralisation des eaux souterraines extraites de l'aquifère albien dans une zone du Sahara septentrional (Algérie) et la possibilité de la réutilisation des eaux de rejet des stations de déminéralisation pour l'irrigation. Cette étude est considérée comme récente en raison du manque d'études dans littérature et vise à évaluer la qualité des eaux souterraines, des eaux dessalées et son respect des normes relatives.

Nous étudierons la qualité des eaux souterraines afin de déterminer s'il convient à la consommation humaine, ainsi que leur déminéralisation de ces eaux dans les stations de déminéralisation. La technique de l'osmose inverse a également été utilisée pour déminéraliser les eaux souterraines. Pour ce faire, on utilise l'indice de la qualité de l'eau et l'étendue de leur conformité aux normes de

l'eau potable. Détermination de la quantité et de la qualité des rejets des stations de déminéralisation sur le milieu de réception par les analyses physiques et chimiques.

Cette étude, examine la possibilité de réutiliser les rejets des stations de déminéralisation dans le domaine de l'agriculture, et ce, après dilution des eaux de rejets. Cette solution vise à éliminer l'impact négatif des eaux de rejet sur l'environnement et à réduire l'utilisation des eaux souterraines dans l'irrigation.

Cette recherche est divisée en cinq chapitres, comme suit :

- Chapitre I: présente la synthèse bibliographique déjà réalisée dans cette thèse.
- Chapitre II: présente des généralisations sur la zone d'étude (le Sahara septentrional) et les propriétés de l'eau souterraine et des généralisations sur les stations de déminéralisation dans le Sahara septentrional (Algérie).
- Chapitre III: nous avons étudié les matériels et méthodes.
- Chapitre IV: nous avons étudié la qualité des eaux souterraines, des eaux brutes, traitées et rejet aux stations de déminéralisation.
- Chapitre V: réservé à l'étude de la réutilisation des eaux de rejet des stations de déminéralisation pour l'irrigation. La dilution de la saumure a été réalisée en ajoutant de l'eau souterraine et en évaluant la qualité du mélange d'eau par des indicateurs de qualité de l'eau d'irrigation.

Enfin, la conclusion générale synthétise les résultats de ce travail.

CHAPITRE I

Synthèse bibliographique

I.1. Introduction

L'étude bibliographique synthétise les travaux scientifiques antérieurs et les méthodologies suivies par les auteurs dans le domaine de la qualité des eaux souterraines et déminéralisation des eaux souterraines. Dans ce chapitre est consacré à la présentation d'un aperçu sur l'eau et le dessalement (élimination des minéraux) et les techniques utilisées tel que l'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IQEI) et l'indice de qualité de l'eau (IQE).

I.2. Eau

L'eau est banale, insipide, inodore et incolore, mais elle est aussi unique, fantastique et exceptionnelle. Elle s'agit du principal composant de tous les êtres vivants, bien qu'il n'ait pratiquement aucune valeur nutritionnelle. Lorsqu'il gèle, prend de l'expansion et gonfle au lieu de diminuer. L'eau est un corps composé, les molécules d'eau consistent en deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène (H_2O). L'eau bout à $100^{\circ}C$ et se solidifie à $0^{\circ}C$ (Mercier J, 2000).

I.2.1. Eau dans la nature

La quantité d'eau sur la terre est estimée à $1400\ 000\ 000\ km^3$. L'eau couvre 72% des 509 millions de kilomètres carrés estimés de surface de la planète. Il est estimé que le volume de l'eau salée au niveau de la planète est d'environ 97,2%. Les océans et les mers intérieures contiennent cette eau salée, ainsi que certaines eaux souterraines. La part de l'eau douce dans l'eau mondiale est de 2,8 % (Ramade, 2002).

La glace polaire représente 2,15 % de cette minuscule proportion, tandis que les eaux souterraines représentent 0,63 % et les eaux de surface (rivières, lacs et ruisseaux) seulement 0,019. La vapeur de H_2O est formé à partir de laquelle se déroule le cycle de cette substance. Malgré, faible quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère, si elle se condensait, elle ne couvrirait qu'une hauteur moyenne de 3 cm à la surface de la terre. Les précipitations sont réparties par le mouvement des masses d'air remplies de vapeur d'eau. Les blocs d'air de refroidissement remplis de vapeur d'eau font tomber l'eau sur le sol sous forme de neige ou de grêle (Ramade, 2002).

Cependant, l'océan reçoit la majorité des précipitations. Seuls 22,8% atteignent la surface des continents, qui représentent environ 29% de la surface de la planète. L'eau est soumise à trois phénomènes divers à la surface des continents. Une forêt libère de 20 à 50 tonnes d'eau dans l'air par hectare et par jour, selon le type de sol et les conditions météorologiques locales. Un autre phénomène important est l'infiltration, car elle est à l'origine de la réhydratation des sols et de l'apport des eaux souterraines, de rivières souterraines et de résurgences. Enfin, les eaux de

ruissellement alimentent les rivières et complètent ainsi le cycle en renvoyant les rivières vers l'océan (Ramade, 2002).

I.3. Différents états de l'eau

De manière générale, l'eau peut se trouver dans trois différents états tels que liquide, solide et gazeux:

I.3.1. État solide

Une fraction des 2.8 % d'eau douce, c'est-à-dire un volume de 30 100 000 km³, est conservé en tant que glace ou neige, ce qui représente 2,15% de l'eau présente sur la planète. Les précipitations peuvent être de la neige ou de la pluie selon l'altitude et la température. La neige n'est qu'un stockage temporaire qui disparaîtra lorsque le temps se réchauffera (Strahler & Strahler 2006). Lorsque la température augmente, soit la neige se sublime, c'est-à-dire qu'elle retourne directement dans l'atmosphère par évaporation, soit elle fond lentement, permettant à l'eau de s'infiltrer dans le sol ou/et de se déverser dans les rivières.

Actuellement, les glaciers couvrent 10% de la surface de la terre, principalement aux pôles. Les plus grandes réserves d'eau douce du monde se trouvent dans les calottes glaciaires des pôles Sud et Nord. La neige alimente les glaciers en surface. Bien qu'ils ne soient pas statiques, ils s'écoulent lentement vers l'aval en raison de leur propre poids. La vitesse de mouvement des glaciers varie en fonction de leur type et peut atteindre 1 m/j ou m/an. La masse des glaciers est grande, et en cas de fonte, le niveau de la mer s'élèverait de plus de 200 mètres (Strahler & Strahler 2006).

I.3.2. État liquide

Il s'agit de la forme d'eau la plus commune sur terre. D'une part, il y a l'eau douce, qui ne représente que 2,8 % de la quantité totale d'eau sur terre. La glace polaire représente 2,15 % de cette minuscule proportion, tandis que les eaux souterraines représentent 0,63 % et les eaux de surface (lacs, rivières et ruisseaux) seulement 0,019 %. L'atmosphère constitue le dernier 0,001%. Cependant, il est extrêmement difficile pour les humains d'atteindre l'eau douce stockée dans les glaciers. Le reste, soit l'eau salée, représente 97,2% de l'eau de la planète Bleue qui est salée. Les océans et les mers intérieures contiennent cette eau salée ainsi que certaines eaux souterraines, et couvrent 71 % de la superficie du globe terrestre.

I.3.3. État de vapeur

L'évaporation de l'eau, ou le processus par lequel l'eau passe de l'état liquide à l'état de vapeur, est un phénomène important. Lorsque l'eau se transforme en vapeur, elle passe à l'état gazeux, dans lequel les molécules sont le plus désordonnées. Parce que ces molécules sont perturbées, les forces

d'attraction terrestre fonctionnent de manière moins importante. Ce processus se produit à partir de surfaces aquatiques, de terrains humides pour détruire l'évapotranspiration. Ce phénomène est créé par le biais de l'absorption d'eau par les racines de plante dans le sol et ensuite par l'émission de cette eau par les feuilles des végétaux. L'eau évaporé pénètre dans l'atmosphère en tant que vapeur invisible et y reste en moyenne huit jours. L'eau se condense alors en nuages, qui vont ensuite pleuvoir sur les océans et les continents. Même si le cycle de l'eau atmosphérique sous forme de vapeur est très court, il est néanmoins important de donner la vapeur d'eau qui est la source des 520 Kilomètres cubes de précipitations, sous forme de pluie liquide, solide ou granuleuse, contribue à remplir les réserves d'eau douce. La vapeur d'H₂O ne constitue qu'une infime partie de 0,001% de la quantité totale d'eau, ce qui en fait partie mineure de la masse globale de l'hydrosphère (**Waugh, 2009**).

I.4. Les sources d'eau

Les deux types de ressources naturelles vers lesquelles l'homme se tourne souvent pour satisfaire ses demandes et permettre l'utilisation de l'eau dans ses nombreuses activités agricoles et industrielles sont :

I.4.1. Les eaux superficielles

Ce sont toutes les eaux circulantes ou stockées sur des continents (lacs, rivières, étangs, barrages...). Leur origine est soit le ruissellement, soit des eaux souterraines très profondes. Ces eaux se rassemblent dans des ruisseaux caractérisés par une surface de contact eau-atmosphère qui est toujours en mouvement et une vitesse significative de la circulation. Ils peuvent être maintenus dans des réservoirs artificiels (barrages, retenues) ou naturels (étangs et lacs) (**Hospitalier & Poirier 2008**).

La plupart du temps, ces eaux sont propices à la prolifération de micro-organismes en raison des déchets qu'elles contiennent et de leur grande surface de contact avec l'environnement extérieur. Cette ressource est facile d'accès, mais elle est malheureusement fragile et vulnérable. La nature des terrains traversés par l'eau lors de son parcours dans les bassins versants détermine la composition chimique de l'eau de surface. Les nombreux composants du sol sont dissous par l'eau lors de son déplacement. L'eau se remplit de gaz dissous par échange au niveau de l'atmosphère de l'eau de surface (oxygène, azote, dioxyde de carbone).

I.4.2. Eaux souterraines

L'eau qui ne s'évapore pas et ne s'écoule pas vers la mer s'infiltré dans le sol par ruissellement et s'accumule sous la surface pour constituer les eaux souterraines.

Ces infiltrations varient selon la porosité du sol ainsi que sa composition géologique.

Les caractéristiques de la Terre, notamment sa structure, déterminent la quantité d'eau qui peut pénétrer et être retenue dans le sol. Cela permet la formation de couches appelées aquifères (**Danielopol 1997**). La principale source d'eau potable provient des eaux souterraines.

I.5. Dessalement des eaux

Le dessalement est le processus d'élimination du sel, en particulier du chlorure de sodium (NaCl), pour le rendre doux et utilisable soit pour l'approvisionnement en eau potable, soit pour l'irrigation. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour dessaler l'eau saumâtre ou l'eau de mer.

I.5.1. Historique le dessalement dans le monde et en Algérie

I.5.1.1. Le dessalement dans le monde

Eaux marines et saumâtres. Cette technique maintenant à une échelle industrielle tire ses origines de longues dates antérieures à JC.

- Depuis le 4^{ème} siècle avant JC, Aristote a suivi le principe de la distillation et a conseillé aux marins de produire de l'eau douce à partir de chaudières.
- Au 12^{ème} siècle, Adalard deBath dans questions naturelles: explique qu'après s'être évaporée sur un rocher au soleil, l'eau de mer devient sel; également, lorsque nous chauffons l'eau de mer et en raison de l'effet d'ébullition, nous la voyons également se transformer en sel. Un tel changement de forme est dû au fait que la mer est plus salée en été qu'en hiver, que les mers méridionales sont plus salées que les mers septentrionales.
- Les premiers processus industriels ont été développés dans les années 1960.
- 1978: la première usine de dessalement d'eau de mer par le procédé l'osmose inverse est mise en service à Djeddah en Arabie Saoudite.
- Jusqu'au 1^{er} janvier 2000, 13 600 stations de dessalement fonctionnaient dans plus de 120 pays avec une capacité installée globale d'environ 26 millions de mètres cubes par jour.
- Aujourd'hui, la quantité d'eau produite par dessalement a très fortement augmenté (10% par an): 52 millions de m³/jour, soit eau de mer 42 millions et eau saumâtre 10 millions de m³/jour.

Les stations de dessalement augmentent dans de nombreux pays (l'Australie, la Libye et la Grande Bretagne); surtout dans les pays en proie à subir des pénuries d'eau (Libye, Algérie et pays du Golfe) mais aussi dans les pays d'Europe méridionale (Italie, Espagne et Grèce) et aux États-Unis. Historiquement, les pays du Golfe ont été les premiers à adopter le dessalement et sont aujourd'hui les plus grands producteurs de dessalement au monde. Certains pays comme le Qatar sont à 95% tributaires de cette ressource. L'Espagne est de loin le plus grand producteur européen d'eau dessalée (**Danis, 2003**).

I.5.1.2. Le dessalement en Algérie

Le dessalement de l'eau de mer s'est amorcé en Algérie dans les années 1960. En 1964, une station de déminéralisation a été réalisée à Ouled Djellal (Biskra). Au cours de la même année, trois blocs de 8 m³/heure chacun ont été installés liquéfiés au complexe gazier d'Arzew (Oran). En 1969, une deuxième station a été installée avec une capacité de 4 560 m³/j. La méthode utilisée a été la distillation rapide en plusieurs phases. L'état algérien a construit 23 stations monobloc d'une capacité totale de 57 500 m³/jour, dans le cadre d'un programme d'urgence dans les wilayas de Tebaza, Oran, Tlemcen, Alger, Tizi-Ouzou, Skikda et Boumerdis. En outre, ils ont construit 14 grandes stations de dessalement d'une capacité totale de 1 940.000 m³/jour entre 2003 et 2005. La même entreprise a mis sur pied des stations supplémentaires en 2009, 2010 et 2011. Ces stations sont Skikda avec une capacité de 100.000 m³/jour, Beni Saf avec une capacité de 200.000 m³/jour, Souk Tlata et Honaine Tlemcen avec une capacité de 200.000 m³/jour chacun, et Mostaganem avec une capacité de 200.000 m³/jour, et Fuka Oued Sebt Tipaza avec une capacité de respectivement 120.000 m³/j et 100.000 m³/j, et le cap Djinet Boumerdès avec une capacité de 100.000 m³/j. D'autres stations sont situées dans les comtés de Chlef avec une capacité de 200.000 m³/j et El Tarf avec une capacité de 50 000 m³/j. La plus grande station est construite à Magtaa (Mostaganem) et sa capacité de production est de 500 000 m³/j. D'après les experts, la production d'eau dessalée en Algérie a augmenté de 500 000 m³/j en 2008 à 1,1 million m³/j en 2009 et de 2,26 millions m³/j en 2011 à 2.580,000 en 2020 à 3,8 millions m³/j en 2024 (**Moustiri 2011**).

I.6. Les procédés de dessalement des eaux

Les procédés de dessalement peuvent être classés en deux familles principales, comme montré dans la Figure I-1.

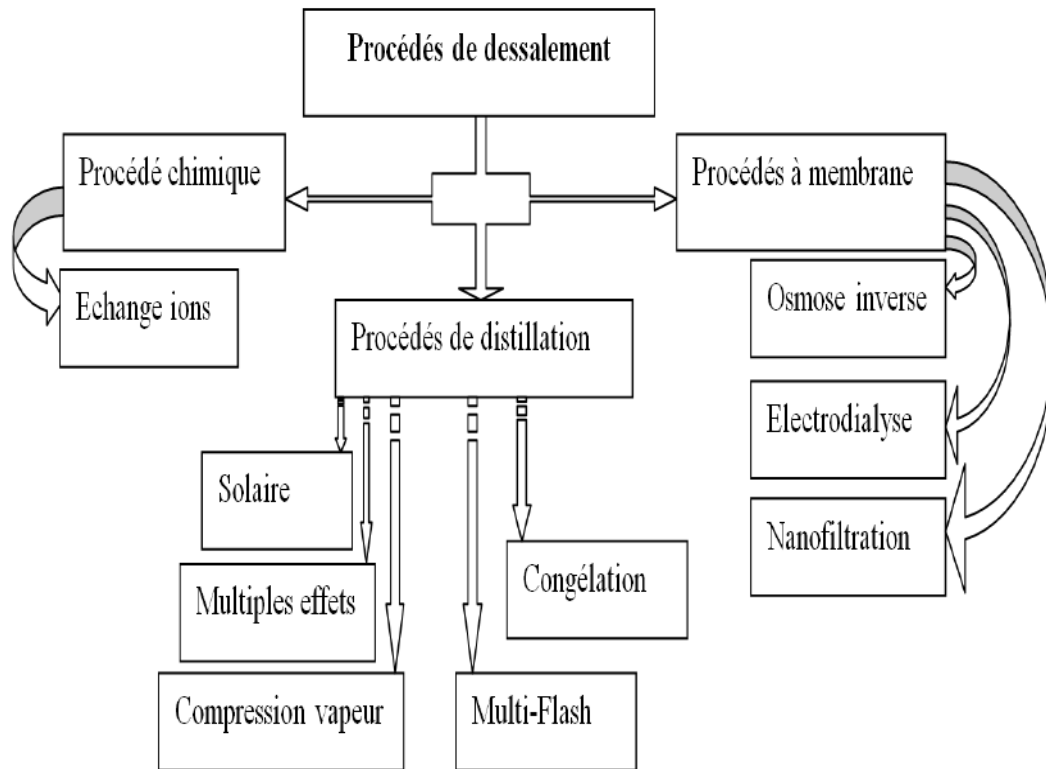


Figure I.1. Différents procédés de dessalement

La station de dessalement peut être divisée en quatre postes (Figure I-2):

- Une prise d'eau.
- Un post de prétraitement.
- L'installation de dessalement proprement dite.
- Post-traitement.

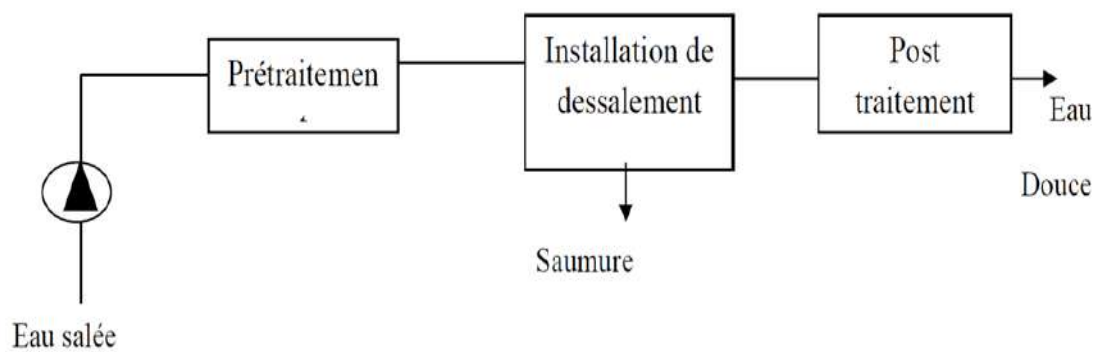


Figure I.2. Schéma d'une installation de dessalement

I.6.1. Les procédés de distillation:

I.6.1.1. Distillation à multiple effet

Dans ce processus, la chaleur à fournir à l'unité de distillation à effets multiples est celle nécessaire pour chauffer le maillage de l'eau de mer au premier effet et pour évaporer la production de cet effet seul.

Dans la première chambre d'évaporation produite de la chaleur de condensation de vapeur pour alimenter le faisceau de chauffage dans la deuxième chambre à basse pression et température, et ainsi de suite (Akili et al. 2008) (Figure I.3).

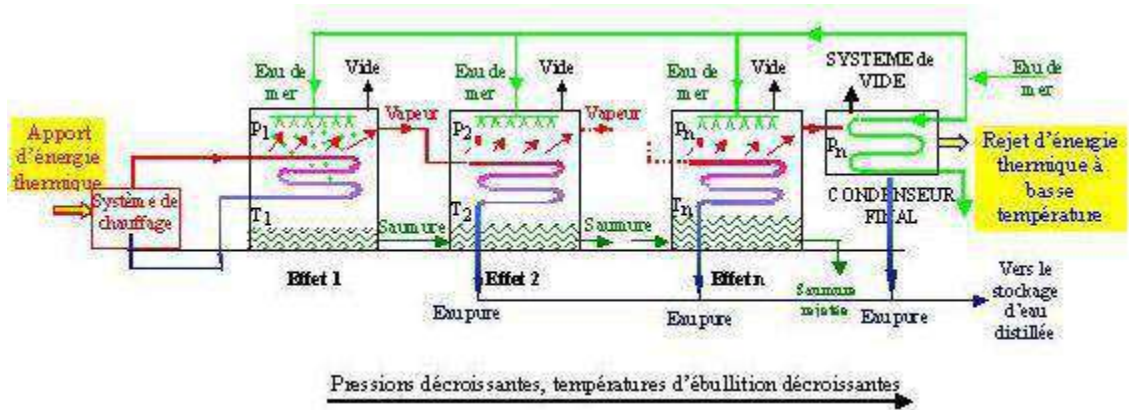


Figure I.3. Distillation par multiples effets.

I.6.1.2. distillation par compression de vapeur

Dans ce processus, l'eau à sucrer dans un hangar isolé thermiquement est bouillie. Absorbe le compresseur de vapeur résultant, augmentant la température de saturation. Cette vapeur passe ensuite à travers un faisceau de tube placé à la base de la pièce qui fait bouillir l'eau salée.

Par exemple, l'eau de mer s'évapore à 90°C et à une pression de 0,7 bar. La vapeur de produit est pressée sur la pression d'un absolu 1 bar, puis envoyée à la poutre de chauffage dans la chaudière ou refroidie à une pression constante, puis condensée, donnant la chaleur nécessaire à l'eau de mer pour bouillir (Akili et al. 2008) (Figure I.4).

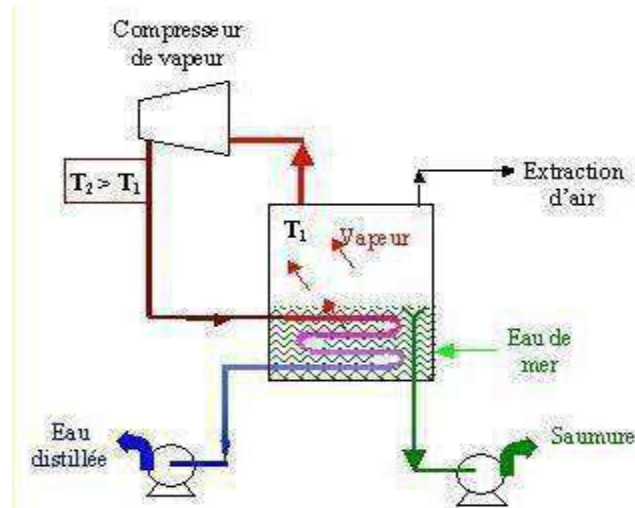


Figure I.4. Distillation par compression de vapeur.

I.6.1.3. Distillation par détente successives (multi-stage flash):

Ce procédé, aussi connu sous le nom de flash multiple, a été développé en partie à partir des années 1960 en raison des difficultés découlant du dimensionnement des surfaces d'échange d'évaporateurs utilisé dans la distillation à effets multiples.

À l'intérieur des condenseurs circule l'eau de mer de la cellule la plus froide à la cellule la plus chaude. Lors du croisement n cellules, la température monte de t_0 à $(t_0 + \Delta t)$.

Ensuite, il est alors admis à la cellule la plus chaude, où règne la température de t . Cela provoque la première relaxation. La vapeur du produit est alors transférée à la cellule suivante, où le second déclencheur se produit. Ce processus est répété à la cellule la plus froide. Dans la sortie de cette cellule, la saumure est obtenue à la température t et le jet de distillation à la même température t (DANIELOPOL, 1997) (Figure I.5).

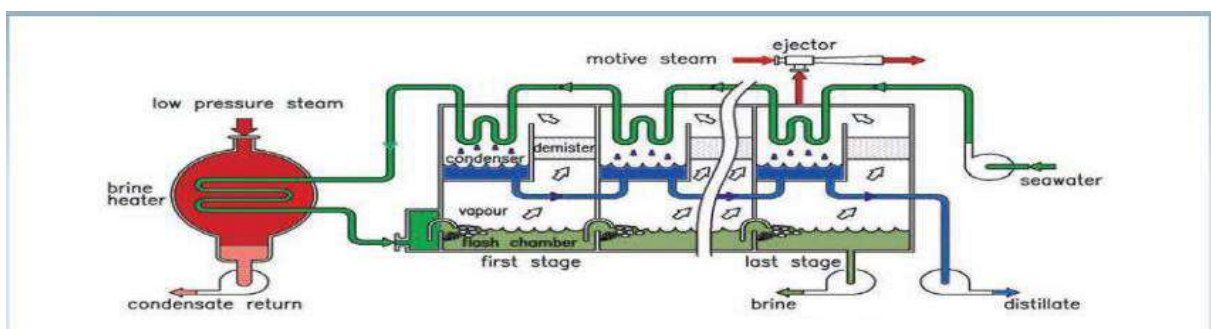


Figure I.5. Distillation par détente successives.

I.6.1.4. Distillation solaire

Il est utilisé pour obtenir de petites quantités d'eau douce (Figure I.6).

Un évaporateur solaire : d'un bac contient de l'eau salée à vaporiser et à absorber l'énergie solaire, de matière plastique ou d'une toiture de verre, qui sont des canaux dédiés à l'eau douce produite.

L'énergie radioactive à faible longueur d'onde traverse le plafond de verre et est absorbée par l'eau à travers le fond du réservoir, pour être convertie en énergie thermique. En revanche, le rayonnement de longues longueurs d'onde émis par l'eau et le fond du réservoir ne peut pas pénétrer le plafond de verre, refroidi par le vent et l'air, joue ici le rôle de condensat. Une telle distillation, la température de l'eau dépasse rarement 70°C (Maurel, 2006).

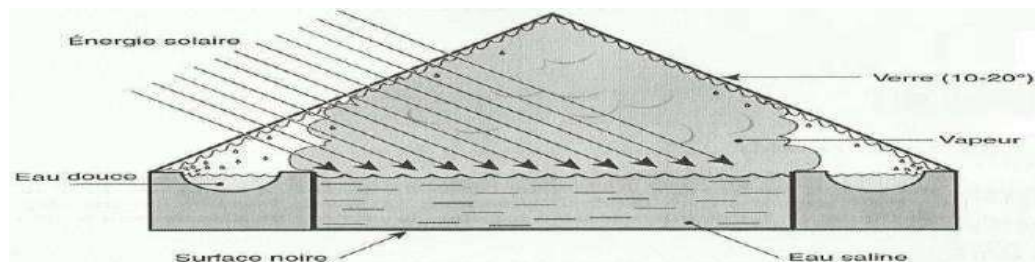


Figure I.6. Distillation solaire.

I.6.1.5. Le dessalement par congélation

C'est le changement de la phase liquide-solide de l'eau de mer. Selon la thermodynamique, la glace formée à d'eau de mer est pure. La glace peut être séparée de la solution concentrée, puis fondue afin d'obtenir de l'eau douce. En pratique, la glace est contaminée par des sels pendant la congélation pour des raisons cinétiques, et est contaminée par la saumure lui-même pendant la séparation de la solution de glace, ce processus permet de minimiser cette contamination (MANDRI, 2011).

I.6.2. Procédés à membrane

I.6.2.1. Osmose inverse

L'osmose inverse est séparée de l'eau et des sels dissous sous pression (pression appropriée pour le traitement de l'eau brute de 54 à 80 bars) par des membranes semi-perméables. Ce procédé fonctionne à la température de la pièce et ne comporte pas de changement de phase. Les membranes polymères utilisées permettent aux molécules d'eau de passer, pas aux particules dissoutes, aux sels et aux molécules organiques de taille 10-7 mm. La technique de l'osmose inverse exige que les pompes à haute pression consomment principalement de l'énergie électrique (Maurel 2006).

I.6.2.1.1. Principe de l'osmose inverse

L'osmose est le mouvement de l'eau à travers une membrane semi-perméable sous l'influence d'un gradient de concentration. Il s'agit d'un système composé de deux compartiments séparés par une membrane semi-perméable, contenant deux solutions à concentration différente (figure I.3). Le phénomène de l'osmose conduit à l'écoulement de l'eau dirigée de la solution diluée à la solution concentrée.

L'osmose inverse est l'application d'une pression supérieure à la pression d'osmose du côté concentré. Par conséquent, l'eau s'écoule de la cabine plus concentrée vers la cabine moins concentrée. L'utilisation de l'osmose inverse entraîne la production d'une solution diluée appelée perméat et d'une solution concentrée appelée rétentat. Le prétraitement est nécessaire pour éviter la contamination des membranes par: les bactéries, les virus, les matières organiques et les ions peuvent encrasser puis colmater la membrane, réduisant ainsi le débit et ajustant le taux de conversion (rapport du débit perméable au débit d'entrée d'eau à traiter) et la pression exercée. Le pré-traitement est important et consiste habituellement en une filtration selon le type de module de membrane utilisé (5-25 μm), qui peut être précédée par une coagulation par floculation (Le Guern et al. 2003).

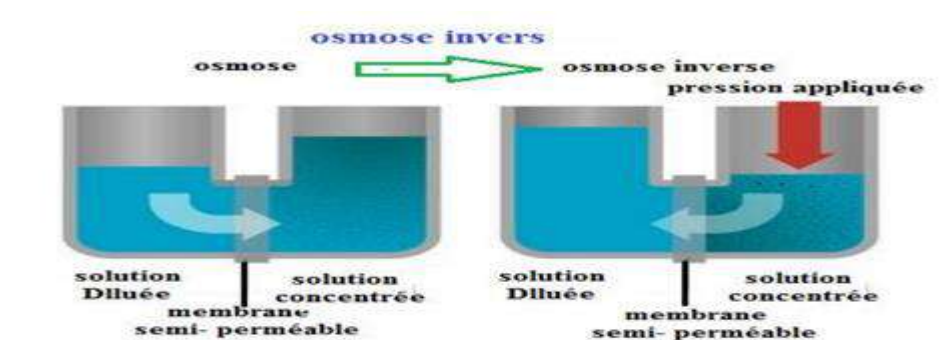


Figure I.7. Principe de l'osmose et de l'osmose inverse

I.6.2.2. électrodialyses

Dans le processus de séparation électrochimique connu sous le nom d'électrodialyse (E.D.), les ions sont déplacés à travers les membranes d'une solution à faible concentration vers une solution à plus forte concentration sous l'effet d'un courant électrique direct.

Pour clairement comprendre ce processus, il est essentiel de savoir comment un courant continu affecte une solution ionique. Supposez un réservoir rectangulaire, avec une électrode à chaque bout et rempli d'une solution de chlorure de sodium (NaCl).

I.6.2.2.1. Principe électrodialyses

L'électrodialyse est une technique de séparation dans laquelle des espèces ionisées minérales ou organiques dissoutes, telles que des sels, des acides ou des bases, sont transportées à travers des membranes ioniques et sous l'action d'un champ électrique. Lorsqu'une solution ionisée est envoyée dans les compartiments séparés par ces membranes, les cations migrent vers la cathode (-) et les anions vers l'anode (+), en traversant respectivement les membranes cationiques (C) et anioniques (A). Grâce à une disposition alternée des membranes, les ions capables de traverser les membranes cationiques sont arrêtés par les membranes anioniques, et réciproquement; il en résulte une augmentation de la concentration dans les compartiments de même parité (concentrat) et une diminution dans les compartiments adjacents (diluat) (Figure I.8).

Pour chaque faraday (96 490 coulombs) traversant l'appareil, il est séparé $N/2$ équivalent-gramme de sel, N étant le nombre total de compartiments autres que ceux qui contiennent les électrodes.

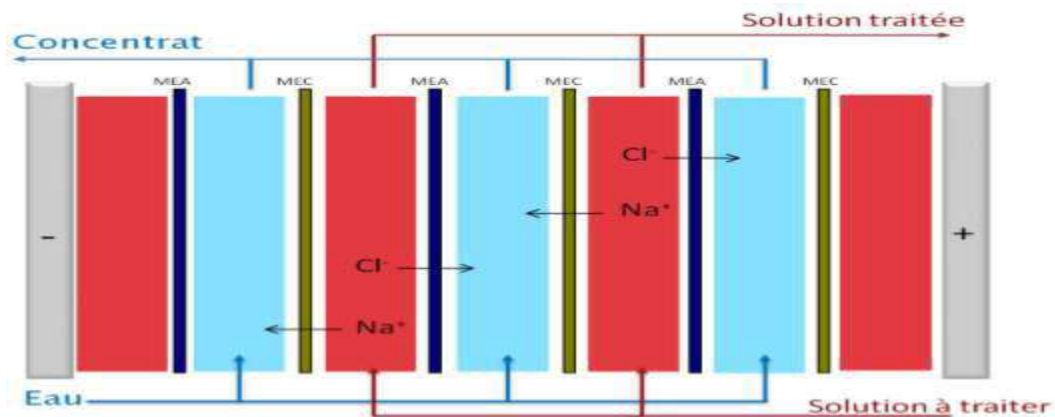


Figure I.8. Principe d'électrodialyse.

I.6.2.3. Nanofiltration

La nanofiltration est utilisée dans les procédés de purification d'eau, par exemple l'adoucissement, la décoloration, et l'élimination de micropolluant. La nanofiltration est l'une des dernières applications avancées de membrane et est située entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration. La nanofiltration est caractérisée par un faible rejet des anions monovalents et un rejet élevé de molécules organiques pesant plus de 200 molécules. Les applications dominantes sont la décoloration, le contrôle des THM (trihalométhane) et l'adoucissement des eaux souterraines et de surface. Outre la production d'eau, la nanofiltration est utilisée dans plusieurs domaines, notamment l'industrie alimentaire et la séparation des particules.

I.6.3. procédé chimique

I.6.3.1. Echange ions

L'échange d'ions est le processus consistant à retirer les ions d'une charge présente dans une solution (par exemple: cations) de cette solution par adsorption sur un matériau solide (l'échangeur d'ions), puis à pour être les remplacer par une quantité équivalente d'autres ions pour la même charge émise par le solide. Sachant, Les ions de charge opposée ne sont pas affectés.

Les réactions d'échange d'ions sont réversibles, sélectives et régies par les lois de l'équilibre chimique, c'est-à-dire qu'elles se produisent jusqu'à ce que les concentrations des différents ions atteignent certaines proportions précises. Les procédés chimiques sont basés sur l'échange d'ions et sont classés en trois grandes catégories:

- Substitution: Les ions à extraire présents dans la solution sont récupérés sur l'échangeur d'ions et on libère l'ion de l'échangeur. Ainsi, un ion est retiré de la solution et remplacé par un autre.
- Séparation: Une solution contenant une variété d'ions différents est passée à travers une colonne de billes de résine. Les ions sont séparés par ordre croissant d'affinité pour la résine.

Elimination: tous les ions sont enlevés et remplacés par de l'eau (H^+ , OH^-), en utilisant une combinaison de résine cationique (sous forme de H^+) et d'échangeur anionique (sous forme de OH^-). Et de lui la solution est déminéralisée et est en réalité une variante particulière de la substitution.

I.7. Indice de qualité de l'eau (IQE)

C'est une expression numérique utilisée pour évaluer la qualité de l'eau à partir de grandes quantités de données et qui est facilement compréhensible par les gestionnaires et les décideurs (Chauhan A et al. 2010). L'objectif de l'IQE est de fournir une méthode simple et concise pour évaluer la qualité de l'eau destinée à la consommation. L'IQE fournit une valeur qui exprime la qualité de l'eau en intégrant différentes variables de qualité de l'eau (Saeedi M et al. 2010). L'IQE indique un chiffre unique, comme une note, qui exprime la qualité de l'eau à un endroit et à un moment donné, selon de nombreux paramètres de qualité de l'eau. L'IQE reflète l'influence composite des facteurs contributifs sur la qualité de l'eau pour tout système d'eau (Kakati & Sarma 2007). La qualité de l'eau de différentes sources a été communiquée sur la base des indices de qualité de l'eau calculés. Les approches traditionnelles pour évaluer la qualité de l'eau sont basées sur la comparaison de paramètres déterminés expérimentalement avec des normes locales ou internationales. Bien que ces approches permettent d'identifier correctement les sources de contamination et puissent être essentielles pour vérifier la conformité légale, elles ne donnent pas facilement une vision globale des tendances spatiales et temporelles de la qualité globale de l'eau (Debels 2005). De nombreuses études ont utilisé IQE pour l'évaluation de la qualité de l'eau, et

différentes méthodes de calcul de l'IQE ont été développées. Les paramètres physiques et chimiques sont intégrés statistiquement et interprétés à l'aide des graphes.

I.8. Indice de qualité de l'eau d'irrigation (IQEI)

La qualité de l'eau d'irrigation et les risques associés aux caractéristiques du sol et au rendement des cultures constituent souvent un problème complexe. Ce Phénomène implique sur l'effet combiné de nombreux paramètres. Un indice de la qualité de l'eau fournit un chiffre unique qui exprime la qualité globale de l'eau à un endroit et à un moment donné en fonction de plusieurs paramètres de qualité de l'eau. L'objectif de l'IQEI est de convertir des données complexes sur la qualité de l'eau en information comprise et utilisable par le public.

Un seul chiffre ne peut pas raconter toute l'histoire de la qualité de l'eau; il existe de nombreux autres paramètres de la qualité de l'eau qui ne sont pas inclus dans l'indice. Cependant, un indice de la qualité de l'eau est basé sur des paramètres très importants afin de fournir un indicateur simple de la qualité de l'eau (**Yogendra & Puttaiah, 2008**).

Bien que l'indice de la qualité de l'eau a été largement utilisé par les décideurs dans plusieurs domaines, y compris la planification environnementale. L'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation est nécessaire pour éviter ou réduire les impacts sur l'agriculture (**Mohammed, 2011**).

L'utilisation des eaux dégradées pour l'irrigation a été la principale cause de la détérioration de la qualité des sols et des cultures agricoles cultivées sur ces sols (**Ayers & Westcot 1985**). Le concept d'indices pour représenter les dégradations de la qualité de l'eau a été proposé pour la première fois par **Horton, 1965**. Le besoin d'un tel outil d'évaluation facile à comprendre leurs propres systèmes de notation (**Brown et al. 1970; Prati et al. 1971; Landwehr 1979; Bhargava 1985; Dinius 1987 et Smith 1990**).

La qualité de l'eau d'irrigation nécessite une surveillance ou un contrôle régulier pour le développement durable des régions agricoles. Paramètre utilisé pour détecter la pertinence de la qualité de l'eau à des fins d'irrigation sont : le carbonate de sodium résiduel (RSC). L'indice de perméabilité (PI) est généralement utilisé pour rassembler une idée sur les interactions entre le sol et l'aquifère (**Nasri et al. 2015**). Une quantité excessive du rapport de risque de magnésium MHR par le Mg^{2+} peut généralement échanger la teneur en Na^+ dans les sols irrigués (**Nagaraju et al. 2014**). Pour évaluer ce phénomène, le MHR est largement utilisé pour la combinaison d'ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . Généralement, la teneur plus élevée en Mg^{2+} endommage la structure du sol et par conséquent, l'eau absorbe plus de Na^+ et de la salinité, ce qui affecte les rendements des cultures (**Subba Rao, 2017**). L'indice de **Kelly** calculé par les concentrations de Na^+ contre Ca^{2+} et Mg^{2+} selon l'excès ou la carence en sodium. La dureté totale (TH) est un indicateur de la teneur en minéraux d'un échantillon d'eau en fonction des concentrations de Ca^{2+} et Mg^{2+} . Le pourcentage de

sodium (%Na) ou pourcentage de sodium soluble (SSP) est un paramètre important pour détecter la diffusion de Na^+ . Les dangers de la dureté de l'eau sont inversement liés à la concentration de sodium (**Abdelghani et al. 2001**). Le risque de sodium de l'eau d'irrigation peut être évalué à l'aide du Sodium Adsorption Ratio (SAR) (**Nezli, 2004**). SAR est l'équilibre entre les ions calcium (Ca^{2+}) plus magnésium (Mg^{2+}) et les ions sodium (Na^{2+}) qui nous donne une idée de la quantité à laquelle les particules de sol chargées négativement sont collées ou floculées. Le modèle de l'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IQEI) a été appliqué aux données développées par (**Jerome & Pius, 2010**) et l'évaluation de la qualité de l'eau d'irrigation proposée par University of California Committee of Consultants UCCC (**Ayers & Westcot 1999**).

I.9. Études antérieures sur la déminéralisation des eaux

Khaled, 2019 a exposé l'évaluation de la qualité de l'eau potable produite par des stations pilotes privées de dessalement, spécialement conçues pour réduire la salinité des eaux souterraines dans la ville de Hail, au Royaume d'Arabie Saoudite. Cette évaluation a été réalisée en examinant les caractéristiques physicochimiques de l'eau et les concentrations en métaux lourds.

Des échantillons représentatifs ont été prélevés dans les stations de traitement de l'eau potable réparties dans les dix-sept districts de la ville de Hail. Les caractéristiques de la qualité de l'eau prises en compte incluent le pH, la turbidité, le TDS, le NO_2^- , le NO_3^- , le Ca^{2+} , le Mg^{2+} , la dureté totale, la dureté calcique et la dureté magnésienne. De plus, les concentrations des métaux lourds, tels que le fer (Fe), le manganèse (Mn) et le plomb (Pb), ont été analysées.

Les paramètres de qualité de l'eau ont été comparés aux normes saoudiennes et du Golfe pour l'eau potable non embouteillée. Les résultats obtenus ont révélé que la plupart des paramètres étudiés respectent les normes nationales et régionales. Cependant, certaines stations de traitement ont présenté des concentrations élevées de métaux lourds dépassant les niveaux admissibles, engendrant des effets indésirables sur la santé et l'esthétique, les rendant ainsi impropres à la consommation humaine.

Bashir Brika et al., 2014 ont mesuré les composantes chimiques du concentré de saumure déversé par l'usine de Tajoura et de mettre en évidence leur impact sur l'environnement. Cette étude a été menée au département de dessalement de l'eau du centre de recherche nucléaire de Tajoura. Des échantillons ont été prélevés dans la source d'alimentation (eau de mer) et dans le flux de rejet (point de décharge de la saumure). Les échantillons ont été analysés dans les installations du département de l'eau à l'aide d'instruments appropriés. Les résultats obtenus montrent des différences dans la plupart des composants chimiques mesurés entre l'eau de mer et la décharge de saumure, ce qui était très attendu. Il a été constaté que les rejets de saumure contenaient des traces de métaux tels que le chrome et ne contenaient pas d'autres métaux tels que le fer. Par conséquent,

la contamination par les métaux est inférieure au niveau critique. Ceci peut être attribué au fait que l'équipement métallique n'est pas utilisé dans l'usine d'OI de Tajoura. Le principal problème de la saumure rejetée par l'usine de Tajoura est sa salinité élevée, car son augmentation par rapport à l'eau d'alimentation dépasse de loin 1 psu.

I.10. Études antérieures sur la réutilisation des eaux de rejet

Belhout et al., 2022 ont traité la solution à haute salinité de la saumure par dessalement par osmose inverse et ont récupéré des ressources précieuses tout en produisant de l'eau douce. La mise en œuvre de l'étude se fait en deux phases : la première phase comprend le dessalement par un processus d'osmose inverse pour produire de l'eau douce et de la saumure concentrée, tandis que la deuxième phase consiste à récupérer les sels solides en utilisant la distillation solaire. Les résultats obtenus ont montré que les chlorures sont les constituants les plus dominants dans la composition des saumures, tandis que la productivité quotidienne de l'eau a contribué à environ 80% de la productivité totale du système solaire (volume de l'eau produite/m²/jour) et que la quantité de sel cristallisé par la distillation solaire représente 35 grammes par litre de saumure.

Valladares Linares R et al., 2014 ont étudié l'état actuel des niches de l'osmose en terme de deux domaines principaux : le dessalement de l'eau de mer et la réutilisation des eaux usées.

Des applications spécifiques pour le dessalement, le traitement, et la réutilisation de l'eau de mauvaise qualité sont décrites. Les avantages, les défis, les coûts et les lacunes dans les connaissances des systèmes hybrides d'osmose forcée peuvent jouer un rôle de pont pour intégrer les processus de traitement de l'eau en amont et en aval, afin de réduire la consommation d'énergie de l'ensemble des processus de dessalement ou de récupération et de réutilisation de l'eau, et de parvenir ainsi à une solution durable pour le lien entre l'eau et l'énergie. Les systèmes membranaires hybrides de FO ont montré des avantages par rapport aux procédés membranaires traditionnels tels que l'osmose inverse à haute pression et la nanofiltration pour le dessalement et le traitement des eaux usées.

Nasim J F et al., 2018 ont étudié l'évaluation de la qualité des eaux usées traitées par bioréacteur à membrane (BRM) en vue de leur réutilisation pour l'irrigation. Les qualités des effluents du bioréacteur à membrane dessalés par les procédés de nanofiltration (NF) et d'osmose inverse (RO) ont été comparées aux normes d'irrigation. L'effluent MBR n'a pas été considéré comme une eau appropriée pour l'irrigation en raison de sa forte teneur en sel salinité. D'après les mesures de la qualité de l'eau (en particulier les valeurs SAR et EC), il a été considéré que les perméats de NF et d'OI pouvaient diminuer la perméabilité du sol s'ils étaient utilisés directement pour l'irrigation. D'après les résultats des analyses SAR-EC, le mélange d'effluents de BRM et de perméat d'OI dans un rapport de volume de 2:1 (effluent de BRM:perméat d'OI) s'est avéré

approprié pour l'irrigation afin de supprimer les effets nocifs du perméat de BRM tels que la salinité. L'utilisation de ce mélange pourrait également améliorer les effets négatifs du perméat RO en termes d'infiltration.

I.11. Conclusion

Les procédés membranaires classiques et l'osmose inverse connaissent un essor important dans la déminéralisation des eaux saumâtres. Toutefois, quel que soit le procédé, il constituera un élément dans une chaîne d'opérations de traitement. Par ailleurs, comme nous l'avons précisé, chaque industrie est un cas particulier. La synthèse bibliographique que nous avons réalisée montre que ces techniques membranaires offrent de nombreuses possibilités d'emploi et une qualité du perméat conforme aux normes.

La déminéralisation de l'eau souterraine par osmose inverse est actuellement un procédé majeur pour la production d'eau potable dans les pays souffrant d'une pénurie d'eau douce. L'objectif principal de cette technique est l'élimination des sels présents dans l'eau souterraine. Les avantages de l'osmose inverse sont sa simplicité de mise en œuvre et son faible coût énergétique.

Chapitre II

Présentation de la zone d'étude

II.1. Introduction

Le Sahara algérien couvre une superficie de 2 millions de km², environ 84% de l'ensemble de la superficie totale (**Ouali. S 2005**). Le Sahara algérien est divisé en quatre régions : Sahara septentrional, central, méridional et occidental. Le Sahara septentrional est dominé à un climat méditerranéen extrême, avec un peu de pluie en hiver. Elle se marque comme une bande de passage entre la steppe méditerranéenne nord-africaines et le Sahara central (**Lehouerou 1990**).

L'eau souterraine est considérée également la seule source dans la zone du Sahara septentrional, mais présente une importante charge de salinité vu que la construction de cette eau est liée à la nature chimique des strates géologiques traversées. Les ressources en eau proviennent principalement des eaux souterraines. Elles sont regroupées dans 2 aquifères: le continental intercalaire (CI) et le complexe terminal (CT) qui sont divisés entre l'Algérie, la Lybie et la Tunisie (**UNESCO 1972**). Ces ressources sont parmi les plus vastes réservoirs d'eau au monde. L'aquifère du continental intercalaire couvre 1 100 000 km² avec une épaisseur de strate moyenne de 350 m et des secours estimées à $20\,000 \times 10^9$ m³ d'eau. L'aquifère complexe terminal couvre 665 000 km² avec une épaisseur de couche moyenne de 342 m et une capacité des secours d'eau estimée à $11\,000 \times 10^9$ m³ (**OULD BABA SY M 2005**). Le continental intercalaire a été alimenté en eau pendant la période humide et froide du Pléistocène inférieur (**Guendouz A et al 2003**).

La déminéralisation des eaux souterraines est devenue la principale et la seule solution pour fournir de l'eau potable à le Sahara septentrional de l'Algérie. La déminéralisation de l'eau salée est un enjeu très sérieux de nos jours ce qui implique la construction d'une station de déminéralisation devient de plus en plus nécessaire pour répondre aux besoins d'eau potable des consommateurs en terme de qualité (bonne qualité d'eau, eau douce et amusant).

Dans ce chapitre, nous fournirons un aperçu du Sahara septentrional et définir les caractéristiques des ressources en eau dans les aquifères, ainsi un aperçu de la croissance de la capacité à déminéralisation des eaux souterraines dans du Sahara septentrional algérien.

II.2. Sahara septentrional

Le système aquifère du Sahara septentrional s'étend sur l'Algérie, la Tunisie et la Libye contient des quantités importantes de ressources en eau, mais celles-ci sont peu renouvelables et ne peuvent pas être pleinement exploitées. Durant les 30 dernières années, l'étude des forages est passée de 0,6 à 2,5milliards de m³ par an. Aujourd'hui cette exploitation se trouve confrontée à de plusieurs risques: interférences entre pays, salinisation des eaux, tarissement des exutoires et réduction de l'artésianisme, etc.

Le système aquifère saharien consiste à l'accumulation de deux couches principales d'aquifères profonds, connues sous le nom de:

- La formation du continental intercalaire CI est la plus profonde.
- Complexe terminal CT.

Ce système a recouvert de plus d'un million de km² couvrant trois pays, d'abord en Algérie avec une superficie de 700 000, deuxième en Tunisie avec une superficie d'environ 80 000, et troisième en Libye avec une superficie de 250 000 (OSS, 2003).

Compte tenu des conditions climatiques du Sahara, ces couches sont doucement alimentées d'environ 1 milliard m³/an au total, pénétrant particulièrement aux piedmonts de l'Atlas Sahariens en Algérie, et aussi par le Dahar et le DJ. Nefoussa en Tunisie et en Libye. Néanmoins, l'accroissement du système et l'épaisseur des couches conduisent à l'agglomération de réserves substantielles.

Le système aquifère du sahara est exploité à environ 8800 points d'eau, sources, et forages environ 3500 dans la couche continentale intercalaire et environ 5300 dans la couche complexe terminale. Ces points sont répartis en trois pays : 6500 en Algérie, 1100 en Libye et 1200 en Tunisie.

On a observé une croissance significative de l'exploitation des eaux souterraines au cours des 20 dernières années ce qui implique un développement majeur du nombre de puits et leur système d'exploitation. Sa production atteint aujourd'hui 2,2 milliards m³/an répartis comme suit : 1,33 milliard en Algérie, 0,33 en Libye, 1 et 0,55 en Tunisie (OSS, 2003).

II.3. Les simulations exploratoires

Le scénario zéro est un scénario de référence qui comporte à maintenir les prélèvements de forages exécutés en 2000, puis à estimer le développement correspondant du système à 2050. L'Algérie propose deux modèles de prélèvement tel que:

- L'hypothèse dite forte, qui représente un prélèvement supplémentaire de 101 m³/s, ferait passer le prélèvement algérien de 42 à 143 m³/s entre 2000 et 2030.
- L'hypothèse dite faible, pour un prélèvement supplémentaire de 62 m³/s, ferait passer le prélèvement de 42 à 104 m³/s (OSS, 2003).

II.4. Les eaux souterraines au Sahara septentrional

Les seules ressources en eau du Sahara septentrional algérien sont les eaux souterraines. Ces eaux sont stockées dans les deux couches C.I et C.T. Les deux couches sont les plus grands réservoirs hydrauliques du monde avec un stock d'eau estimé à environ 5 milliards de m³ (ANRH 1986).

Les conditions lithologiques, hydrochimiques et hydrodynamiques varient en particulier dans la partie orientale de la zone, ce qui rend ces nappes particulièrement intéressantes. De plus, différentes recherches menées durant les trois dernières décennies montrent que les eaux de la zone sont caractérisées par une hyperminéralisation importante, généralement collaboratrice d'une dureté élevée et de fortes concentrations de fluorure (Achour 1990).

Bien que l'eau souterraine soit la principale ressource de la zone du Sahara septentrional, elle est très saline, car sa composition est liée à la nature chimique des couches géologiques qui se croisent (Figure II-1).

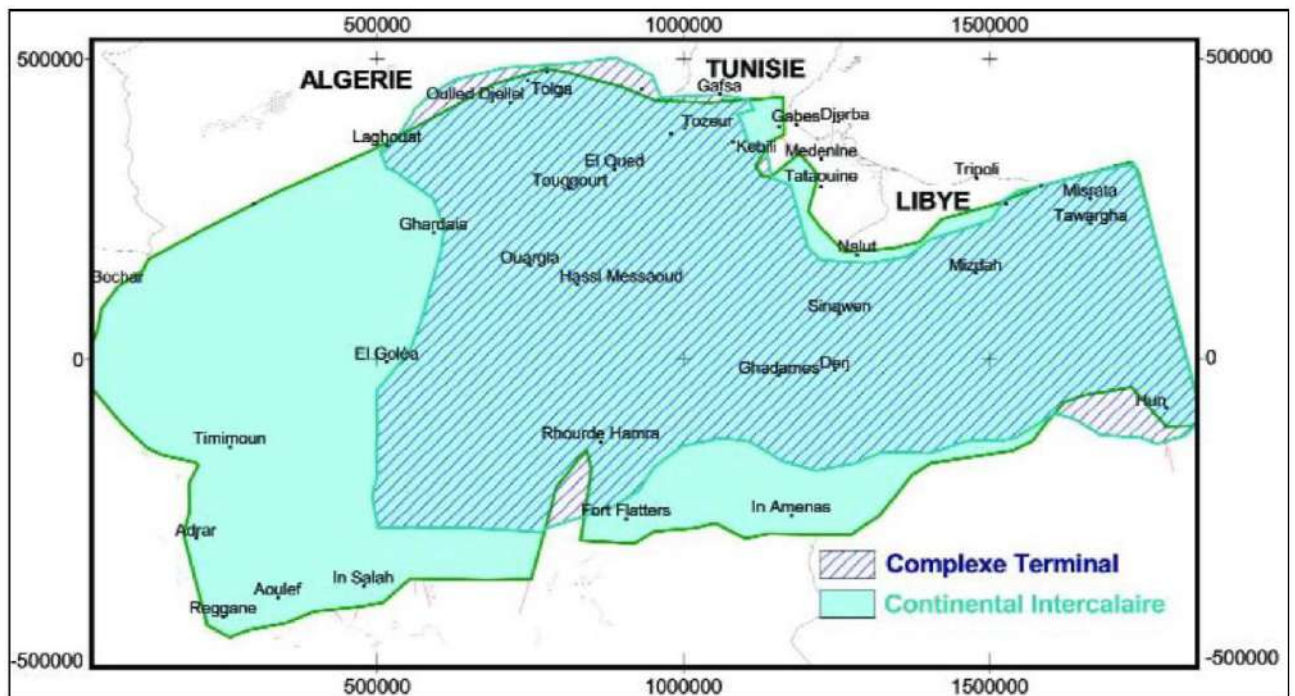


Figure II.1. Carte des eaux souterraines (CI et CT) (OOS, 2003).

II.4.1. Qualité chimique des eaux

II.4.1.1. Salinité de l'eau dans l'aquifère du complexe terminal

Il peut y avoir une certaine différence dans la variation de la minéralisation totale de l'eau entre la nappe des sables mio-pliocène et la nappe de calcaire sénonienne.

II.4.1.1.1. Nappes des sables mio-pliocènes

Les points de prélèvement sont généralement limités aux régions de production. Des phénomènes spécifiques, tels que les effets de l'exploitation extrêmement centralisée et le retour de l'eau à l'irrigation, peuvent provoquer des anomalies locales. Entre Ouargla et Oued Rhir, on peut observer:

- Dans la la grande Erg orientale (zone moitié du sud), la salinité est inférieure à 2 g/l ceci est dû à la nutrition actuelle de la pluviométrie exceptionnelle qui s'infiltré dans l'Erg.
- Dans la zone des pentes de Mزاب, la limite ouest de la nappe, et nord d'Ouargla, la salinité est inférieure à 2 g/l.
- Dans la zone du Draa Djérid correspondant à la mise de niveau des sables aquifères, la salinité est inférieure à 2,5 g/l. Mais la minéralisation est forte en dehors de cette zone.

Il s'agit d'un cas particulier chez :

- Dans la cuvette d'Ouargla.
- Sur l'axe Hassi Messaoud- Nord Chott Melrhir. Cette dernière anomalie semble refléter les effets de l'exploitation minière lourde et le retour de l'eau d'irrigation.

II.4.1.1.2. Nappe des calcaires

En Algérie, la nappe des calcaires sénoniens et éocènes est exploitée dans une région de Biskra à Ouargla. Les données sur la minéralisation de cette nappe sont plus partielles, mais il est possible de noter ce qui suit (OSS, 2003):

- Zone minéralisée faible sur toute la bordure ouest du bassin algérien, compatible avec les régions d'approvisionnement dans la dorsale de Mزاب.
- Région d'eau douce du côté ouest de Dahar.
- Région assez douce sur l'aile sud du Jabal Nafusah correspond à une région de recharge de nappe.
- Région très minéralisée dans le côté Oued Rhir nord (Djamaa- Meghair).
- Région d'eau saumâtre entre Ouargla, Togurt et secteur El-Hajira.

II.4.1.2. Salinité de l'eau de l'aquifère continental Intercalaire

Le niveau de salinité de l'eau du bassin du Grand Erg Occidental est inférieur à 1 g/l. Ce n'est pas l'éventualité dans ce bassin où la salinité varie entre 2 et 4 g/l. Les valeurs les plus élevées sont obtenues dans la région d'El Borma (OSS, 2003).

II.5. Les stations de déminéralisation dans le Sahara septentrional (Algérie)

Le gouvernement algérien a élargi le programme de la réalisation des stations de déminéralisation des eaux souterraines. La salinité des eaux souterraines de la nappe CI dans la zone du Sahara septentrional varie de 1,5 à 5 g/l de salinité. L'installation de ce type de station de déminéralisation est l'unique solution pour assurer les besoins locaux en eau douce. Ces stations réduisent la salinité des eaux souterraines afin d'obtenir des niveaux acceptables variés entre 0,5 et 0,8 g/L. La répartition des stations de déminéralisation dans le Sahara septentrional est comme suit:

Tableau II.1. Les stations de déminéralisation dans le Sahara septentrional (Algérie).

Wilaya	N ^o station	Station	Procédé	Mise en service	Capacité m ³ /j
El-oued	03	El-oued	osmose inverse	2020	40 000
		Hadj El-bachir	osmose inverse	2007	2000
		Tiba drinking water	osmose inverse	2005	416
El-M'Ghair	02	El-M'Ghair	osmose inverse	2018	18 933
		Djamma	osmose inverse	2017	16 000
Touggourt	01	Touggourt	osmose inverse	2015	46 000
OUARGLA	01	Ifri-gara	osmose inverse	2018	10500
	01	Gharbouz	osmose inverse	2015	3000
	01	Zyayna	osmose inverse	2014	3000
	01	Bamendil	osmose inverse	2014	3000
	01	Ain el Kheir	osmose inverse		9000
	01	Hai Bouzid	osmose inverse		4500
	01	Mekhadma	osmose inverse	2014	3000
	01	El khafdji	osmose inverse		7500
	01	El Hdeb	osmose inverse		27000
	01	El-Borma	osmose inverse	2016	1296
	06	Hassi Messaoud	Electrodialyse	1975	1000
	02	Hassi Messaoud	Electrodialyse	1976	110
	01	Gassi touil	Electrodialyse	1977	55
	02	Hassi Messaoud	Electrodialyse	1978	350
	01	Haoud berkaoui	Electrodialyse	1979	55
	02	Hassi Messaoud	Electrodialyse	1979	300
	01	Rhoud el baguel	Electrodialyse	1979	25
02	Rhoud el baguel	Electrodialyse	1981	300	
Ghardaia	01	Ghardaia	osmose inverse	1980	960
Tamanrasset	01	Tamanrasset	osmose inverse	2017	100 000

II.6. Présentation des stations d'étude

Nous étudierons le cas de trois stations dans la zone d'étude (figure II.2) : El-Oued, Touggourt et Ouargla.

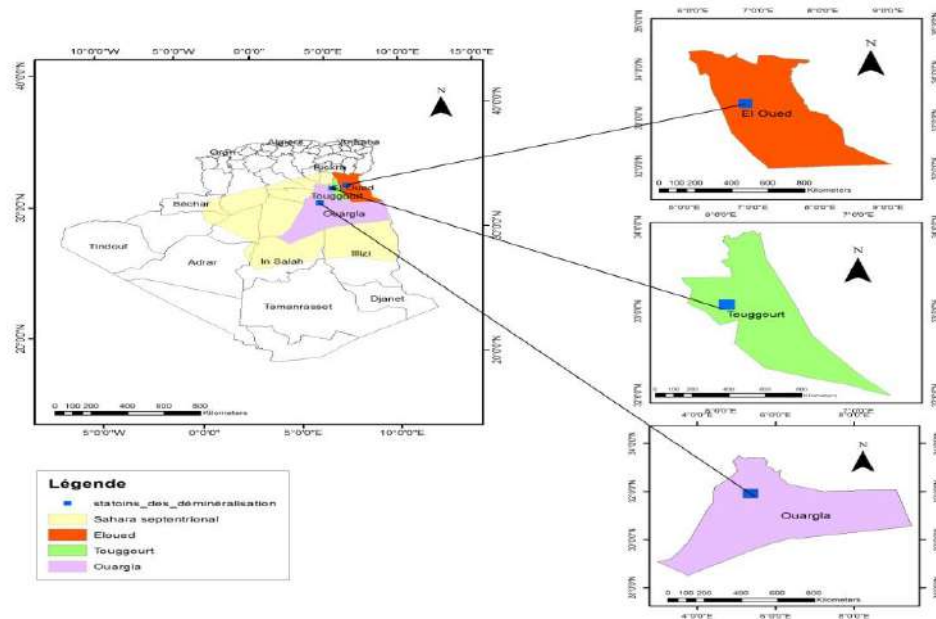


Figure II.2. Carte de la zone d'étude.

II. 6.1. La station de déminéralisation de la commune d'El-oued

La station de déminéralisation des eaux souterraines de la commune d'El-Oued a une capacité de 40 000 m³/jour pour une production de 30 000 m³/jour afin de répondre aux nécessités d'eau potable pour la population. La station est mise en service de façon permanente en 2020. Le procédé de déminéralisation utilisé dans cette station est basé sur la technologie de l'osmose inverse. Cette station rejette 10000 m³/j. La station traite les eaux souterraines de la nappe continentale intercalaire, et la salinité de cette eau est d'environ 1,5 g/l. Quant à la saumure, elle est rejetée vers la sortie de la station d'épuration de Kouinine. Puis l'eau de la station d'épuration et saumure de la station de déminéralisation est évacuée vers chatt Haloufa.

II.6.2. Les stations de déminéralisation dans wilaya Touggourt

Station de déminéralisation de Touggourt mise en service en avril 2015. L'exploitation de la station a une capacité de 46 000 m³/j pour produire 34 500 m³/j d'eau traitée et 11 500 m³/j d'eau rejet. Le procédé de déminéralisation dans la station est l'osmose inverse. La station est alimentée en eau par quatre forages de la nappe de l'Albien avec une salinité d'environ 2,5 g/l. La saumure est évacuée dans le canal d'oued Righ.

II.6.3. La station de déminéralisation El Hdeb

La station est alimentée en eau par trois forages de la nappe l'albien. La capacité de cette station est de 27000 m³/j pour produire 20250 m³/j d'eau traitée et 6750 m³/j d'eau rejetée. La technique de traitement est d'osmose inverse. Le rejet d'eau saumure est dans le Sebkhât Sefioune.

II.7. Fonctionnement de les stations

Les stations de déminéralisation sont équipées de deux lignes d'osmose inverse et sont alimentées par les eaux de forages d'Albian (eau brute). Si l'eau brute provient de l'aquifère du CI, elle est refroidie par une tour de refroidissement de 60°C à inférieure de 30°C. La tour est du type préfabriqué, elle est montée sur place et se compose de deux cellules de ventilation à contre-courant.

L'eau brute est prétraitée avant de passer à travers le filtre du sable. Ce traitement consiste en une injection permanente de 1,5-2 mg/l d'hypochlorite de sodium et de floclulé (TD – WASH 1) à l'aide des pompes doseuse.

L'eau prétraitée est collectée dans un réservoir et passe à travers un système de vannes, et reçoit une dose de métabiosulfite de sodium et du séquestrant TD-ASCAL (Annexe), et l'eau prétraitée passe à travers un filtre à cartouche avec un seuil de coupure de 5 µm.

L'eau filtrée traverse le premier étage du système d'osmose avec une pression de 13 bars par pompes à haute pression.

Le perméat (eau osmosée) est stocké dans un réservoir et le rejet du premier étage est introduit vers le deuxième étage de l'osmoseur à une pression de 10 bars.

L'approvisionnement en eau potable est un mélange de 80% d'eau traitée et de 20 % d'eau filtrée. L'eau est ensuite chlorée dans la station. Un processus typique de traitement de l'eau par osmose inverse est illustré schématiquement dans la figure II.3.

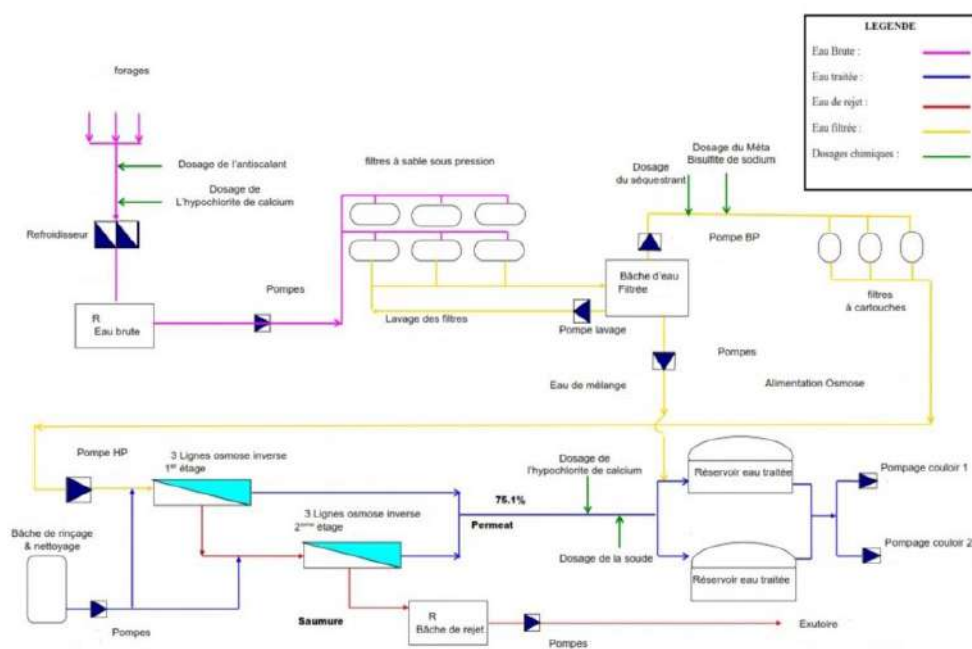


Figure II.3. Schémas de fonctionnement de la station.

II.8. Les composant des stations

II.8.1. Les forages

La station d'El Oued dispose de trois forages de la nappe d'Albien avec un débit moyen de 463 l/s, la station de Touggourt dispose de deux forages de la nappe d'Albien d'un débit moyen de 270 l/s et la station d'Ouargla dispose de trois forages de la nappe d'Albien avec un débit moyen de 404,16 l/s.

II.8.2. Une tour de refroidissement

Le procédé de déminéralisation choisi dans les différentes stations choisies étant du système osmose inverse, l'eau doit être refroidi à une température appropriée pour protéger les membranes de l'osmose inverse (Figure. II.4).



Figure II.4. Une tour de refroidissement.

II.8.3. Réservoir de stockage d'eau brute

L'eau brute refroidie dans la tour de refroidissement est stockée dans un réservoir (bassin) en béton armé (voir Figure II.5).



Figure II.5. Réservoir de stockage des eaux brutes.

II.8.4. Pompe d'alimentation des filtres à sable

Les pompes à eau haute pression fonctionnent en alternance, tandis que l'autre pompe se tient en attente pour assurer la continuité de fonctionnement continu (Figure II.6).



Figure II.6. Pompe d'alimentation des filtres à sable.

II.8.5. Filtre à sable

Les filtres à sable agissent comme un prétraitement pour éliminer les matières en suspension qui peuvent obstruer rapidement la membrane de filtration, étape clé du procédé envisagé (Figure II.7).



Figure II.7. Unités Filtre à sable.

II.8.6. Bassin d'eau prétraitée (filtrée)

La membrane osmotique est protégée contre les sels minéraux et calcaires en recevant l'eau d'un filtre à sable. Dans ce bassin, on ajoute du métabiosilfite de sodium (antioxydant et séquestrant antichlore) afin de préserver l'eau.

II.8.7. Sonde de lecture

Les canalisations relient le réservoir d'eau filtrée au filtre à cartouche afin de mesurer les valeurs de pH, de conductivité, de chlore et de turbidité. La lecture à distance des valeurs se fait dans la salle de contrôle.

II.8.8. Pompe d'alimentation du filtre à cartouche

Les pompes à eau à basse pression (4 bar), dont une en veille, garantissant la continuité du fonctionnement.

II.8.9. Filtre à cartouche

Dans le but d'éviter le passage de particules fines ou de sable fin dans le système membranaire, filtre à cartouche permettent d'arrêter les particules fines qui ont traversé le filtre à sable (Figure II.8).



Figure II.8. Les filtres à cartouche.

II.8.10. Pompe d'alimentation les osmoseurs

Afin de surmonter la pression osmotique et garantir la production d'eau osmotique, une pompe aspire l'eau provenant du filtre à cartouche et l'entraîne à travers le train de membranes à une pression adéquate. La pression augmentée est contrôlée afin de générer la quantité d'eau requise.

II.8.11. Unité d'osmose inverse

Après microfiltration, l'eau prétraitée est pompée par une pompe à haute pression pour atteindre la pression requise par le système d'osmose inverse et alimenter les tubes de pression équipés d'une membrane d'osmose inverse.

A- Premier étage

En disposant les membranes de l'unité d'osmose inverse en deux étages de type sérié et rejet, un taux de conversion global de 75% est atteint.

Le premier étage est constitué de tubes de pression connectés en parallèle et reçoit le débit fourni par la pompe HP. Le flux entrant est divisé en deux flux : premier pour l'eau osmosée ou perméate et le second pour l'eau saumâtre ou rejet.

B- Deuxième étage

Le deuxième étage fonctionne en série avec le premier étage et capte le débit du premier étage pour produire plus d'eau osmosée (Figure II.9).

La production de la deuxième et de la première étape constituent l'ensemble de la production totale de la ligne d'osmose inverse. Après la deuxième étape, l'eau de saumure (saumure de rejet de la deuxième étape) est envoyée vers le réservoir de rejet.



Figure II.9. Unité d'osmose inverse.

II.8.12. Station de lavage et de rinçage

Cette station a pour mission de nettoyer automatiquement tous les éléments de la station chaque jour avec de l'eau filtrée, ainsi que de nettoyer régulièrement l'unité d'osmose inverse avec de l'acide ou de la base.

II.8.13. Bassin de stockage des eaux traitées

Le perméat produit par la ligne d'osmose inverse est mélangé avec de l'eau filtrée et dirigé vers les réservoirs d'eau traitée. La minéralisation après le mélange qui ne dépasse pas 600 mg/l. Les réservoirs (le bassin) sont fabriqués en béton armé pour assurer le stockage de l'eau traitée et facilite le nettoyage régulier.

II.8.14. Pompe d'alimentation du château d'eau

Pour pomper l'eau traitée du réservoir vers le château d'eau de la ville.

II.8.15. Pompe doseuse de chlore

Assure la chloration de l'eau traitée dans les réservoirs destinés à la distribution publique d'eau.

II.8.16. Bassin de rejet

Reçoit le rejet de la station et renvoyé vers l'environnement récepteur.

II.8.17. Système anti-retour d'eau

Empêche la recirculation de l'eau du château d'eau vers les réservoirs de stockage d'eau traitée.

II.8.18. Laboratoire d'analyse

Toutes les analyses physico-chimiques des eaux brutes, traitées, filtrées et de rejet sont réalisées dans le laboratoire. Il est équipé d'un spectrophotomètre pour l'analyse chimique, d'un multiparamètre (mesure portable HQD40D) pour les paramètres physico-chimiques et d'un turbidimètre pour la mesure de la turbidité.

II.9. Les procédés de traitement des eaux salées

Le processus de traitement des eaux salées dans une station de déminéralisation comprend plusieurs étapes qui ont été indispensables pour obtenir la qualité d'eau souhaitée. Comme exemple de traitement des eaux salées, nous examinons les stations de déminéralisation dans les régions d'El-Oued, de Touggourt et d'Ouargla.

II.9.1. Le prétraitement

Ces membranes sont très sujettes au colmatage, c'est pourquoi un prétraitement de l'eau salée avant l'osmose inverse est essentiel. Afin de les préserver, il est nécessaire de respecter les conditions suivantes :

- Température adéquate (entre 22 et 32) pour protéger les équipements en aval.
- La turbidité maximale est de 5 NTU pour éviter le colmatage de la membrane.
- pH approprié pour protéger les pompes de la corrosion.

L'étape de prétraitement comprend trois opérations:

II.9.1.1. Alimentation en eau brute de la station

Les stations de traitement sont alimentées à partir des forages existants. Ces forages sont de type Albien et alimentent directement les stations de déminéralisation.

II.9.1.2. Le refroidissement d'eau

Le refroidissement par eau est assuré par un dispositif appelé tour de refroidissement. Avant de pouvoir être utilisé, il doit être protégé en deux étapes:

1^{ère} étape: le dosage d'anti-incrustant amont tours

La station reçoit l'eau brute grâce à un collecteur à fibre optique qui est directement connecté au puits de forage. Avant le début du refroidissement, il est nécessaire d'injecter un agent séquestrant pour prévenir l'accumulation de dépôts dans les conduites et les équipements. Les sels de calcium, ou de carbonate de calcium, ou d'oxalate de calcium, ou de phosphate de calcium, ou de silicates constituent le tartre.

Tout le système d'approvisionnement est touché par ce phénomène, entraînant des dégâts importants aux conduites de distribution, aux réservoirs de stockage, aux tours de refroidissement et aux stations de pompage.

Les dépôts de tartre ont eu un impact majeur sur le fonctionnement des usines de dessalement:

- Réduction de la section de passage.
- Dégradation de l'état de surface.
- Grâce à leur très forte adhérence, les tartres permettent d'obtenir des débits constants.

2^{ème} étape: le dosage de chloration

L'objectif de cette étape est de prévenir la croissance microbologique dans la tour de refroidissement (protection contre les lésionelles). Les lésionelles sont des bactéries naturellement présentes dans l'eau et la boue. Elles sont responsables de maladies respiratoires.

Légionellose s'installe fréquemment dans les réseaux d'eau, notamment les réseaux d'eau chaude. La prophylaxie contre ces bactéries est assurée par l'injection de réactifs tels que l'hypochlorite de calcium $\text{Ca}(\text{ClO})_2$.

II.9.1.3. Filtration

Après le refroidissement de l'eau brute, on passe ensuite à l'étape filtre à sable.

II.9.1.3.1. Le filtre à sable

Le filtre à sable renferme de grosses particules qui sont inaccessibles. La présence de flocculant améliore la qualité de filtration et réduit les espaces entre les granules de sable et l'antracite. Afin

d'éviter les blocages des filtres, il est nécessaire de renouveler régulièrement. Par exemple, il est recommandé de renouveler le sable et l'antracite pratiquement tous les cinq ans afin de préserver leur capacité de filtration.

II.9.1.3.2. L'opération de filtration

La station est équipée de filtres à sable et à anthracite pressurisés, pompés à partir de réservoirs d'eau brute. Un variateur de vitesse est installé dans la pompe d'eau brute afin de contrôler le débit vers le filtre à sable.

II.9.1.3.3. Principe de fonctionnement de ces filtres

L'eau poussée dans le filtre à bicouche par l'entrée en haut du filtre se distribue sur la couche filtrante (bicouche), qui se compose de:

- Une première couche d'antracite de 450 mm d'épaisseur avec une granulométrie de 0,8 à 1,6 mm, chargée de retenir les matières en suspension (MES).
- Une deuxième couche de sable d'une épaisseur de 400 mm et d'une granulométrie de 0,4-0,8 mm. Son rôle est de réduire le SDI (Silt Density Index) et la valeur de turbidité doit être égale à 0,1 NTU. Cette couche de sable est destinée à éliminer les gros détritiques et à éviter le colmatage de la membrane.

FFinalement, l'eau est filtrée par les raffineurs situés au bas du filtre, puis elle est collectée dans un réservoir d'eau de lavage du filtre, appelé bassin d'eau prétraitée.

Un capteur de turbidité avec alarme est installé à la sortie du filtre, ce qui permet déclencher une alarme en cas de turbidité élevée causée par un dysfonctionnement du filtre ou à une fuite de sable. Dans cette situation, les filtres doivent être nettoyés manuellement.

II.9.1.3.4. Système de nettoyage du filtre

Il est essentiel de procéder au lavage à rétro du filtre afin de préserver l'efficacité de la filtration. Il est réalisé en deux étapes :

- Étape 1: phase d'air pour éliminer les impuretés : la station est équipée de deux suppresseurs d'air qui alimentent les filtres à air par l'intermédiaire de pompes d'injection (chaque suppresseur est relié à une pompe).
- Étape 2: phase aqueuse pour l'élimination des matières en suspension et la reclassification des couches média mélangées à la phase air:
 - L'eau utilisée pour le nettoyage (le lavage) est de l'eau filtrée et le filtre est pompé avec de l'eau par pompes.
 - Le filtre est lavé à contre-courant. Le lavement est appliqué de bas en haut du filtre et l'eau du lavement est recueillie dans le réservoir d'eau brute.

Pour éviter les fuites lors du lavage à contre-courant, la vanne d'entrée du filtre est équipée d'un limiteur d'ouverture (réglé lors de la mise en service).

Finalement, l'eau traverse les crépines situées au fond du filtre et l'eau filtrée est recueillie dans un réservoir spécialement conçu pour l'eau prétraitée.

II.9.1.4. La microfiltration

La microfiltration permet de supprimer les particules mesurant entre 0,05 et 10 μm d'un liquide. L'impact de l'exclusion permet de retenir les espèces sous forme de solutés ou de particules à la surface de la membrane. L'objectif de cette étape est d'éliminer les particules de plus de 5 μm afin d'éviter de former une colmatation de la membrane.

On utilise principalement des membranes poreuses en polyamide ou en polypropylène, ou inorganiques (en oxydes métalliques ou en céramique). La pression à travers les membranes varie d'environ 0,5 à 3 bars. La microfiltration est adaptée non seulement pour séparer les solide-liquide, mais également pour séparer liquide-liquide des émulsions d'huile dans l'eau.

II.9.1.4.1. Le filtre à cartouche

Avant que l'eau ne pénètre dans la membrane d'osmose inverse, elle est physiquement prétraitée par une microfiltration et chimiquement par un agent réducteur comme HNaSO_3 afin d'éviter l'oxydation de celle-ci.

II.9.1.4.2. Système de pompage pour l'alimentation des filtres à cartouche

Les filtres à cartouche sont alimentés par des pompes basse pression. Il y a deux pompes basses pression (PMB) dans la station, dont une est en service et une pour secours.

II.9.1.4.3. Le principe de fonctionnement des filtres de station

La station est équipée de cartouches de filtration, chaque unité contenant 60 cartouches. Il y a un débit de 250 m^3/h pour chaque unité et une pression maximale de 10 bars.

II.9.1.5. Préparation chimique de l'eau avant l'osmose inverse

II.9.1.5.1. Dosage du Bisulfite de Sodium

Le bisulfite de sodium permet d'éliminer le chlore résiduel présent dans l'eau avant qu'il ne parvienne à la membrane d'osmose inverse, ce qui évite sa dégradation à l'oxydation. Avant et après la microfiltration (filtration à cartouche), on ajoute la solution de NaHSO_3 à la dose maximale en utilisant deux pompes doseuses afin d'obtenir le temps de contact maximal. Le but est d'éliminer de manière indirecte les matières biologiques en empêchant leur croissance et en diminuant l'oxygène dissous requis pour leur respiration.

II.9.2. Le traitement

Après prétraitement, l'eau saumâtre passe par un processus d'osmose inverse, ce qui réduit considérablement sa dureté et sa teneur en sels minéraux.

II.9.2.1. Définition du principe de l'osmose inverse

La séparation physique des solvants (eau) par perméation sélective à travers des membranes denses est réalisée par l'osmose inverse, un processus de filtration tangentielle. Il est contraire au phénomène naturel d'osmose, qui a pour effet de déplacer les solvants des solutions diluées vers des solutions concentrées, mises en contact par des membranes sélectives sous l'effet d'un gradient de concentration.

II.9.2.2. Equipement de pompage pour alimenter les membranes

Dans notre cas, nous disposons de plusieurs pompes, dont une pour chaque ligne d'osmose et une pour le secours, ce qui permet à chaque pompe de fournir une pression d'environ 13 bars. Ces pompes sont automatisées en fonction de la quantité d'eau osmosée définie.

II.9.2.3. Système membranaire d'osmose inverse

Une fois que l'eau brute a été prétraitée, nous entamons l'étape la plus cruciale. Cette étape consiste à traiter l'eau par osmose inverse. Cette étape vise à supprimer le sel. Deux trains d'osmose inverse sont utilisés pour distribuer l'eau, chacun comportant deux étages. Les membranes sont placées dans des tubes remplis de 7 unités chacune, répartis en deux niveaux :

- Dans la première étape, il y a 16 tubes de pression, chaque tube de pression à 7 membranes disposées en parallèle (112 membranes au total).
- Dans la deuxième étape, il y a 8 tubes de pression avec 7 membranes chacun (56 membranes au total).

Il s'agit d'un système membranaire de type di-étage en série rejet, où le concentré du premier étage est transmis au deuxième étage, ce qui permet d'obtenir un rejet final et un taux de conversion élevé (75%).

Finalement, on recueille le perméat des deux trains et on le pousse vers le réservoir d'eau traitée. Le reste qui n'est ni utilisé pour la déminéralisation ni pour le fonctionnement de la station de déminéralisation (eau de lavage des filtres) est rejeté dans des rejets ou des bâches.

II.9.2.4. Le nettoyage des membranes

Le nettoyage chimique des membranes dans la station est réalisé une ou deux fois par an (en fonction de l'augmentation de la pression différentielle entre les membranes). Dans cette situation, il est important de ne pas dépasser 8 bars, ce qui implique un arrêt régulier du fonctionnement de la

station. On utilise différents types de nettoyeurs en fonction du type de colmatage (organique ou minéral), ainsi que des produits acides et basiques.

Le système de nettoyage des membranes est un système CIP (Clean in Place). En d'autres termes, un système qui nettoie automatiquement des installations sans démonter. La durée du CIP est de 3 à 6 heures. Le nettoyage des membranes a pour objectif de limiter les colmatages irréversibles, où prolonge la durée de vie de la membrane.

II.9.2.4.1. Le colmatage

Les eaux naturelles (eau de mer ou eau saumâtre) contiennent généralement des matières organiques en suspension et des sels minéraux qui ont tendance à se déposer et à colmater les surfaces d'échange. Cela augmente la résistance de transfert et diminue la capacité de production de l'installation.

II.9.2.4.2. Le colmatage a comme conséquences

- Augmentation de la perte de charge.
- Augmentation du passage des sels, le colmatage empêche la rétrodiffusion des sels rejetés par la membrane.
- Perte de flux.

II.9.3. Post traitement

II.9.3.1. Eau osmosée

On sait que la consommation d'eau peu minéralisée a un impact négatif sur les mécanismes de l'homéostasie. L'homéostasie désigne la capacité de l'organisme à maintenir différentes constantes à des niveaux anormaux, tels que la température, le flux sanguin, la tension artérielle, le pH, le volume de liquide de l'organisme, la composition du milieu intérieur, etc. Plusieurs recherches sur les animaux ont démontré que la consommation d'eau déminéralisée entraîne une augmentation de la diurèse, une augmentation du volume de fluide cellulaire supplémentaire, une diminution du volume des cellules rouges et certains autres changements hématocritiques. Une étude allemande a mis en évidence le fait que l'eau distillée entraîne l'ajout d'électrolytes par vos intestins, qui sont prélevés dans les réserves de votre corps. Les électrolytes dissous dans l'eau de votre corps sont dilués en consommant de l'eau distillée. Une mauvaise répartition de l'eau dans le corps peut mettre en péril le bon fonctionnement des organes vitaux. .

Des problèmes de santé aigus ont été signalés chez les escaladeurs de montagne qui préparaient des boissons avec la neige ne contenant pas suffisamment d'ions nécessaires.

Une évolution plus grave de cette affection avec œdème cérébral, convulsions et acidose métabolique a été signalée chez des enfants dont les boissons étaient préparées avec de l'eau distillée ou en bouteille contenant très peu de minéraux (OMS, 2004).

II.9.3.2. Le Principe de mélange

L'eau osmosée ne répond pas aux normes de la qualité de l'eau potable et n'est pas recommandée pour la consommation humaine. Pour cette raison, une partie des sels dissous séparés doit être renvoyée. Cette étape s'appelle la re-minéralisation, peut se faire de deux manières différentes:

- De l'ajout de sels (chaux, carbonate de calcium, etc.) à l'eau osmosée
- Mélangeant une partie de l'eau prétraitée avec l'eau osmosée.

La deuxième méthode est beaucoup plus facile et est recommandée pour des eaux à faible salinité.

II.9.3.3. Equipement de pompage d'eau traitée

Il est conseillé d'installer une pompe à eau pulsée du réservoir d'eau de prétraitement vers le réservoir d'eau de traitement afin d'obtenir ce mélange. Il est nécessaire de placer la pompe avec un variateur de fréquence et un débitmètre électromagnétique dans la ligne de mélange, de manière à ce que le mélange soit automatiquement effectué en fonction de la conductivité du réservoir d'eau de traitement. Au cours de la dernière étape de mélange, appelée post-traitement, il y a deux étapes principales : l'ajustement du pH et la chloration.

II.9.3.3.1. Ajustement du pH

L'eau d'osmose est agressive. Le pH de l'eau d'osmose est inférieur au pH de saturation et le pH est modifié par une solution alcaline.

II.9.3.3.2. Chloration

Il est essentiel de garantir une étape de désinfection afin d'éviter toute contamination et croissance biologique. La désinfection de l'eau est possible à différentes façons, la plus répandue étant la chloration de l'eau avec une solution d'hypochlorite de sodium (eau de Javel).

Les agents pathogènes (les organismes) présents dans l'eau sont détruits par la chloration, ce qui empêche une contamination supplémentaire lors du transport ou du stockage. Le traitement de l'eau s'écoule dans un réservoir afin d'alimenter les châteaux déjà en place.

II.10. Le rejet de la saumure des stations de déminéralisation

Une fois la déminéralisation terminée, l'eau est divisée en deux parties :

- Perméat: fraction de l'eau qui a été déminéralisée.

- Concentrat: concentration élevée et est rejeté vers milieu récepteur.

Ce dernier contient une concentration en sel très élevée en raison de la quantité de sel présente dans l'eau brute avant le processus de déminéralisation.

II.10.1. Quantité des eaux de rejet

Les stations de déminéralisation font appel à la méthode membranaire afin de traiter l'eau et générer divers types de rejets :

- Concentrât;
- Eaux de rinçage;
- Eaux de lavage.

Le concentré est déchargé en continu pendant le traitement de l'eau. La thérapie par l'osmose inverse est effectuée avec un taux de conversion de 75 %, et la quantité de débit et le type de saumure sont associés au taux de conversion et à la qualité de l'eau brute. Comme le taux de récupération est de 75 %, le débit de la solution saline est de 25 % du débit d'eau brute. L'eau de rinçage et de lavage est également évacuée par intermittence. Si la chaîne de traitement implique l'ajout d'un ou plusieurs produits chimiques à l'eau brute, le rejet de la membrane contiendra des substances présentes dans l'eau brute plus les produits injectés pour traiter l'eau brute.

II.10.2. Le milieu récepteur du rejet

II.10.2.1. Le milieu récepteur du rejet de la station de déminéralisation d'El-oued

La saumure est jetée vers la sortie de la station d'épuration de Kouinine. Par la suite, la saumure a été rejetée vers Choot Halloufa avec les eaux de drainage et les eaux usées épurées grâce à une conduite de décharge déjà en place, mesurant 1000 mm de diamètre.

II.10.2.1.1. Situation du milieu récepteur d'El-oued

L'estuaire du Chott Haloufa est situé dans le nord de la wilaya d'El-Oued dans la ville de Sidi Aoun et de 11,5 km² superficie (voir Figure II.10), et de 10 km long.

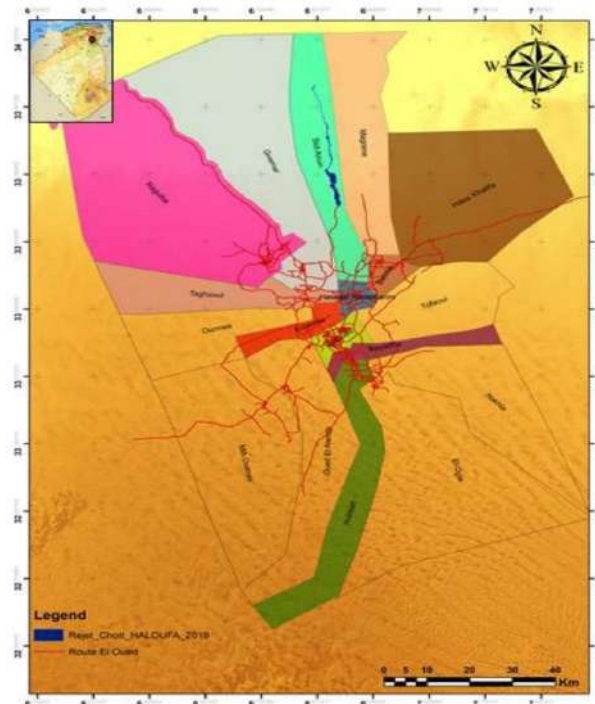


Figure II.10. Emplacement du point de déchargement chott halloufa.

II.10.2.2. Le milieu récepteur du rejet de la station de déminéralisation de Touggourt

La solution saline de la station de déminéralisation est rejetée vers chott Merouane par canal d'oued Righ (figure II.11). Chott Merouane est situé dans la partie Nord-Est du désert du Sahara en Algérie, dans la wilaya de Touggourt (Figure II.11), à 9 km de la wilaya d'El Meghaïer.

Les coordonnées géographiques sont : 33°55' N 6°10' E, altitude moins de 40 mètres, superficie 337 700 hectares. Cet affleurement naturel de la nappe phréatique se situe dans la partie nord de l'Oued Righ.

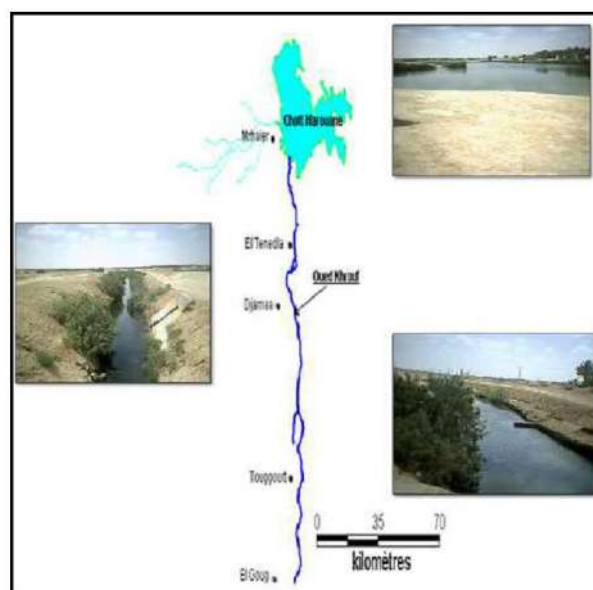


Figure II.11. Canal d'Oued Righ et son exutoire naturel Chott Merouane (ANRH, 2002)

II.10.2.3. Le milieu récepteur du rejet de la station de déminéralisation d'Ouargla

Les rejets d'eau sont dirigés vers sebkhat sefioune.

II.10.2.3.1. Situation du milieu récepteur d'Ouargla

Sebkhat Safioune est une grande dépression située à l'écart des zones urbaines, avec une superficie d'environ 10 000 hectares. Il se trouve à une distance d'environ 40 km au nord de la ville d'Ouargla.

Le site de cette Sabkha a été équipé d'un site de rejet d'une superficie de 2500 hectares. Pour accueillir les eaux rejetées. Ces eaux comprennent les eaux de rejet provenant des stations de déminéralisation, les eaux usées qui ont été purifiées des stations d'épuration et les eaux de drainage agricole provenant des palmeraies voisines de cette localité (figure II.12).



Figure II.12. Situation du milieu récepteur vers Sebkhat Safioune.

II.10.3. Indicateurs de supervision de l'impact environnemental de rejet des stations de déminéralisation

En raison de sa salinité et de ses concentrations en substances chimiques, l'évacuation de la saumure dans l'environnement peut avoir des conséquences néfastes sur le milieu récepteur, notamment sur les organismes (animaux sauvages, plantes et humains). Afin d'évaluer l'effet, il est nécessaire de prendre en considération plusieurs critères essentiels :

II.10.3.1. Température

Dans l'osmose inverse, la température de saumure est généralement à peu près la même que la température de l'eau d'alimentation.

A noter que, le processus d'osmose inverse peut augmenter la température et la salinité. La température de la saumure du système d'osmose inverse a été mesurée sur place et était de 31 à 33°C supérieure à la température de l'eau d'alimentation.

II.10.3.2. Salinité

L'osmose inverse produit une saumure contenant jusqu'à trois fois la salinité de l'eau brute. Cette augmentation de la salinité entraîne une augmentation de la densité de la saumure.

II.10.3.3. Le pH

Le processus de la chloration dans la station de déminéralisation peut légèrement augmenter le pH de saumure par rapport à l'eau d'admission. La littérature soutient ce point de vue en indiquant que le pH de la saumure des systèmes d'osmose inverse est généralement inchangé ou légèrement élevé dans l'eau d'admission.

II.10.3.4. L'oxygène dissous

Dans un système d'osmose inverse, la température n'est que légèrement élevée, de sorte qu'une réduction significative de l'oxygène dissous due au chauffage est peu probable.

L'utilisation des produits chimiques tels que le bisulfite de sodium pour prévenir la corrosion et éliminer le chlore résiduel dans l'osmose inverse peut réduire l'oxygène dissous dans la saumure. Une dilution rapide nécessite le maintien de la concentration en oxygène dissous dans la saumure.

II.10.3.5. Additifs antitartres

La recherche bibliographique que nous avons menée n'a pas révélé d'effets directs liés à l'utilisation de produits antitartres et séquestrants.

II.10.4. Impacts environnementaux de la déminéralisation des eaux

Diverses techniques de déminéralisation utilisées pour déminéraliser les eaux souterraines, telles que décrites dans le chapitre 1, permettent de répondre aux besoins en eau douce du Sahara septentrional. Cependant, cette méthode d'élaboration d'eau potable présente des effets bénéfiques ainsi que d'autres inconvénients, qui sont exposés ci-dessous. Les répercussions de la station de déminéralisation englobent les conséquences propres à la phase de construction ainsi que les conséquences liées à la phase d'exploitation. Les impacts émanent de la conversion du caractère du terrain (par exemple: d'un terrain de nature résidentielle, agricole ou industrielle à un terrain destiné à la construction de la station de déminéralisation), puis continuent avec de la perturbation du bruit de construction pour s'étendre aux émissions atmosphériques, les rejets dans l'eau et dans l'environnement ainsi que les dommages potentiels au milieu récepteur.

II.10.4.1. Impacts positifs

La déminéralisation de l'eau a un effet positif direct majeur, à savoir une augmentation de la disponibilité de l'eau. Le développement économique et social des communautés locales est conditionné par la disponibilité d'une eau de qualité. Effectivement, il permet d'accéder à des

ressources sécurisées et contribue à résoudre les problèmes d'eau et de pénurie d'eau pour la population. La construction de stations de déminéralisation a connu des avancées.

II.10.4.2. Impacts négatifs

Les conséquences néfastes de la déminéralisation peuvent être réparties en plusieurs aspects essentiels :

- Impact sur l'environnement terrestre.
- Nécessite une énergie considérable.
- La saumure concentrée est soit rejetée dans l'environnement (haute température lors de la distillation), soit injectée dans le sol.
- Utiliser des produits chimiques pour nettoyer la membrane.

II.10.5. Impacts environnementaux négatifs associés au processus de déminéralisation

Différents types de contaminants provenant de différents processus dans les stations de déminéralisation ou dessalement. En plus de la concentration élevée en sel, la saumure rejetée contient divers produits chimiques utilisés dans les étapes de pré- et post-traitement des stations de déminéralisation ou dessalement.

II.10.6. Impacts du rejet sur le milieu récepteur

La production de saumure est responsable de l'impact environnemental le plus important lié au processus de déminéralisation. L'eau saumâtre dessalée est une solution à forte salinité qui est produite par la concentrant.

II.10.6.1. Impact du rejet sur l'agriculture

- Cela dégradera la qualité de la terre.
- A notre connaissance, il n'y a pas de plantes qui supportent cette salinité (Eucalyptus supporte jusqu'à 6g/l).
- L'importance de débit.
- L'eau saumâtre pose deux problèmes aux plantes:

Le manque d'eau et la toxicité sont souvent associés à une ou plusieurs des concentrations en eau de la solution du sol. L'intoxication peut engendrer des troubles nutritionnels et des signes chez les plantes. Par exemple :

- Chlore : les seuils critiques de toxicité varient considérablement d'une espèce à l'autre.
- Sodium : le symptôme le plus important est la brûlure et le nanisme du feuillage et la nécrose des tissus trouvés sur le bord des feuilles.

- Déficit hydrique: une salinité élevée entraîne l'accumulation de sels dans la zone racinaire, ce qui entraîne un manque d'absorption de l'eau.

La cause de la sécheresse physiologique est le retard de croissance chez les individus. Les sels, notamment le chlorure de sodium et le chlorure de magnésium, sont toxiques en fonction de l'humidité du sol.

II.10.6.2. Impact de rejet dans les dunes de sable en milieu naturel

- Dégradation de la qualité de la nappe phréatique: l'injection de saumure dégrade la qualité des eaux de la nappe phréatique, ce qui affecte les activités agricoles de la zone.
- Augmentation de la remontée des eaux : l'injection de cette eau ferait monter la nappe phréatique, aggravant le problème de la montée des eaux qui sévit déjà dans la région.
- La montée de la nappe phréatique a provoqué des changements environnementaux importants, affectant principalement le secteur agricole, en particulier les palmeraies dans la cuvette, mais affectant également d'autres secteurs tels que la santé publique, le tourisme, et la vie socio-économique de la population. Ces problèmes écologiques ont un impact négatif plus ou moins important sur la région.

II.10.6.2.1. Impact de la remontée des eaux sur le sol

Trois altérations sont distinguées : altération physique, altération chimique et altération biologique.

- **Altération physique:** l'excès d'eau entraîne une dégradation rapide de la structure du sol et diminue sa stabilité. La compression accélère cette détérioration. En accumulant les agrégats qui se sont volatilisés. L'excès d'eau diminue l'aération du sol et favorise une sensation de fraîcheur. L'eau saturée est présente dans la macroporosité.
- **Altération chimique :** l'excès d'eau est également nocif car il étouffe l'environnement et favorise l'acidification. De plus, il accélère la décalcification du sol et le compacte pour le rendre plus imperméable et plus facile à réduire.
- **Altération biologiques :** l'excès d'eau réduit le développement de la matière organique et la croissance micro-organismes anaérobies. Il favorise l'évolution de maladies cryptogamiques telles que la fusariose.

II.10.6.2.2. Salinisation de l'eau d'irrigation

Les systèmes d'irrigation actuels pompent autant d'eau que les agriculteurs estiment nécessaire, ce qui entraîne une détérioration de la qualité de la nappe phréatique. De plus, cette injection de saumure dégrade la qualité de l'eau de la nappe phréatique, car les cultures s'infiltrant sur place et rejoignent progressivement la nappe phréatique, rendant ainsi impossible toute culture

ultérieurement. La montée des niveaux d'eau évapore l'eau stagnante si intensément que les terres agricoles sont fortement salines, ce qui entraîne une réduction des terres arables et a contribué à la désertification.

II.10.6.2.3. Impact de la salinité sur la terre

La salinité de la solution du sol augmente le dépôt de sel à la surface des sols à la fin de l'été. Une fine couche grisâtre ou blanchâtre se forme qui peuvent devenir dans sebkha et chotts dans les zones telliennes et sahariennes.

II.10.6.3. Effet du rejet sur les animaux sauvages et au pâturage

Si l'injection du rejet dans la nature, ils forment des étangs ou des lacs, et ces lacs d'eau verte se trouvent en dehors des zones urbaines, où meurent tous les animaux qui s'abreuvent ce lac.

II.10.6.4. Effets du rejet sur les humains

Les lacs formés en jetant les rejets dans la nature provoquent la prolifération d'insectes nuisibles porteurs de maladies et de toxines, et où ces insectes se déplacent vers l'environnement urbain, provoquant la propagation de maladies.

II.10.6.5. Effets des produits de corrosion

On le rejette dans les stations de déminéralisation ou de dessalement et il peut être toxique pour les organismes estuariens.

II.10.6.5.1. Les traces de métaux

Lors de la dissolution du système de condenseur de tuyaux de refroidissement et des éléments dépendants d'alliage dans la ligne de procédé, les traces de métaux suivants apparaissent : Ni, Mo, Fe, Cr et Zn. Ces métaux provoquent un stress dans les communautés aquatiques, et les effets sont plus prononcés dans les habitats benthiques riches en métaux traces (**Latteman & Höpner 2003**).

II.10.6.5.2. Effet du concentré (saumure)

La saumure est sans doute le facteur le plus influent dans le milieu récepteur. La quantité totale de saumure libérée dans ce milieu détermine les dommages qu'il peut causer. Lors du rejet de saumure concentrée en grandes quantités, l'impact environnemental doit être considéré avec plus d'attention que lors du rejet de petites quantités. Outre la quantité de saumure, la nature et le lieu du rejet sont importants pour l'impact potentiel.

Les éléments indispensables à la vie de la plante sont indispensables au sol : carbone, azote, potassium et phosphore, ainsi que différents sels tels que le sulfate de calcium, le magnésium, le

nitrate et l'ammonium. Le sel, notamment le chlorure de sodium, est toxique pour les végétaux. En outre, il y a des limites à respecter afin d'éviter tout dommage aux différentes cultures. Ce genre de dégradation de l'environnement comporte des dangers tels que la multiplication de bactéries, de coliformes et de pathogènes, qui ont un impact direct sur l'homme, qui est le principal consommateur de produits agricoles. Les animaux et les cultures produits par les agriculteurs qui résident dans des régions où les rejets ne sont pas maîtrisés.

II.10.7. L'impact négatif potentiel du rejet de la station de déminéralisation sur le milieu récepteur

Les éléments ci-dessous réduisent l'éventuel effet néfaste des rejets des stations de déminéralisation sur le milieu récepteur :

II.10.7.1. Facteurs des rejets

- Quantité totale de saumure rejetée: par exemple, le potentiel de dommages environnementaux d'une petite quantité de saumure peut être très différent impact potentiel associé à une quantité plus grande des rejets. Les rejets à grande quantités de saumure concentrée nécessitent une plus examen en compte des impacts potentiels sur l'environnement que les rejets à plus petite quantité.
- Les constituants de la saumure : les composants de saumure peuvent avoir des effets néfastes sur les organismes, tels que les biocides, des concentrations élevées de métaux et de faibles niveaux d'oxygène. Si ces ingrédients sont trouvés, ils doivent être retirés ou neutralisés avant le rejet.
- Facteur de dilution de la saumure avant rejet: une salinité élevée et des fluctuations de salinité dans le rejet peuvent tuer des organismes près de l'exutoire qui ne peuvent pas tolérer une salinité élevée ou des fluctuations. Il peut avoir un impact négatif sur l'environnement.

II.11. Conclusion

Les ressources en eau existant dans le Sahara septentrional sont les eaux souterraines. Ces eaux sont stockées dans les deux couches continentales intercalaires (C.I) et du complexe terminal (C.T). Ces deux couches sont les plus grands réservoirs hydrauliques du monde.

Bien que l'eau souterraine soit la principale ressource de la zone du Sahara septentrional. Elle est très saline, car sa composition est liée à la nature chimique des couches géologiques qui s'ercaissent.

L'Algérie a développé un ambitieux programme de déminéralisation des eaux souterraines en installant des stations de déminéralisation dans le Sahara septentrional.

L'expérience algérienne en domaine de déminéralisation de l'eau se développe dans le but d'utiliser l'eau pour l'approvisionnement en eau potable de la population.

Le rejet de la saumure des stations de déminéralisation d'El-Oued, de Touggourt et d'Ouargla se fait respectivement dans le milieu récepteur du Chott Halloufa, du canal d'Oued Righ et de la Sebka Safioune. L'impact de saumure de rejet des stations de déminéralisation sur le milieu récepteur dépend des propriétés physico-chimiques de saumure. Par conséquent, une bonne connaissance des propriétés des saumures et du milieu récepteur est nécessaire pour évaluer l'impact potentiel des stations de déminéralisation sur le milieu récepteur. Impacts du rejet sur le milieu récepteur: l'agriculture, la remontée des eaux sur le sol, la salinisation de l'eau d'irrigation, la salinité sur la terre, effet sur les animaux sauvages et au pâturage et effets sur les humains. Cela peut également impacter l'agriculture, les dunes de sable, la remontée des eaux sur le sol, la salinisation des eaux d'irrigation et la salinité du sol.

Chapitre III

Matériels et méthodes

III.1. Introduction

Pour évaluer la qualité des eaux souterraines, des eaux des stations de déminéralisation (brutes, traitées et rejete) et des eaux après mélange (eau de rejet diluée avec de l'eau souterraine) de la région d'étude, nous avons procédé à plusieurs analyses physico-chimiques entre 2021 et 2022, Soixante-quatre échantillons d'eau souterraine, à raison de quatre échantillons par puits pour un total de seize puits. Il y a trois forages de nappe du Continental Intercalaire (CI) et treize forages de nappe du Complexe Terminal (CT), ainsi que les échantillons des eaux brutes, traitées, rejet et rejet diluée avec de l'eau souterraine de les stations. Il est à noter que ces analyses ont été réalisées dans les laboratoires des stations de déminéralisation et dans le laboratoire de l'Université d'Ouargla. Ce chapitre présente les protocoles expérimentaux et le matériel des différentes analyses effectuées d'une part, et les moyens et outils d'analyse des données, qualitatives, quantitatives et cartographiques d'autre part. Il inclut également une présentation explicative des méthodes et des logiciels utilisés.

III.2. Échantillonnage

Le prélèvement des échantillons est la première procédure de toute analyse chimique et est considérée comme fondamentale, de sorte que toutes les précautions concernant l'échantillonnage représentatif doivent être prises. Une bouteille en plastique de 1,5 litre est utilisée pour le prélèvement d'échantillons. Toutes les bouteilles ont été lavées à l'eau du robinet puis à l'eau distillée. Pendant la préparation sur place, les bouteilles ont été lavées avec de l'eau de l'échantillon lui-même avant l'échantillonnage. Les bouteilles ont été soigneusement rincées avec de l'eau de l'échantillon pour s'assurer que les échantillons étaient représentatifs de la source d'eau. Une fois les prélèvements d'eau effectués, chaque bouteille a reçu une étiquette d'identification appropriée et toutes ont été emballées dans une boîte spéciale et transportées aux laboratoires, où les analyses des eaux souterraines ont été faites au niveau du laboratoire de l'ANRH et de l'ADE d'El-Oued, Touggourt et Ouargla. Les emplacements des forages échantillonnés et les nappes exploitées sont cités dans la Figure III.1. Les analyses des eaux brutes, traitées et des eaux rejetées ont été faites au niveau du laboratoire des stations de déminéralisation d'El-Oued, Touggourt et Ouargla. Les analyses du mélange des eaux ont été faites au niveau du laboratoire des stations de déminéralisation et du laboratoire de l'exploitation et du développement des ressources naturelles en zones arides, Université de Ouargla. L'ensemble des paramètres de qualité de l'eau utilisés dans les analyses sont : le potentiel hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE), les solides dissous totaux (TDS), la température (°C) et les cations significatifs étaient : le Ca^{2+} , le Mg^{2+} , le Na^+ et le K^+ . Les anions les plus importants sont le Cl^- , le SO_4^{2-} et le HCO_3^- .

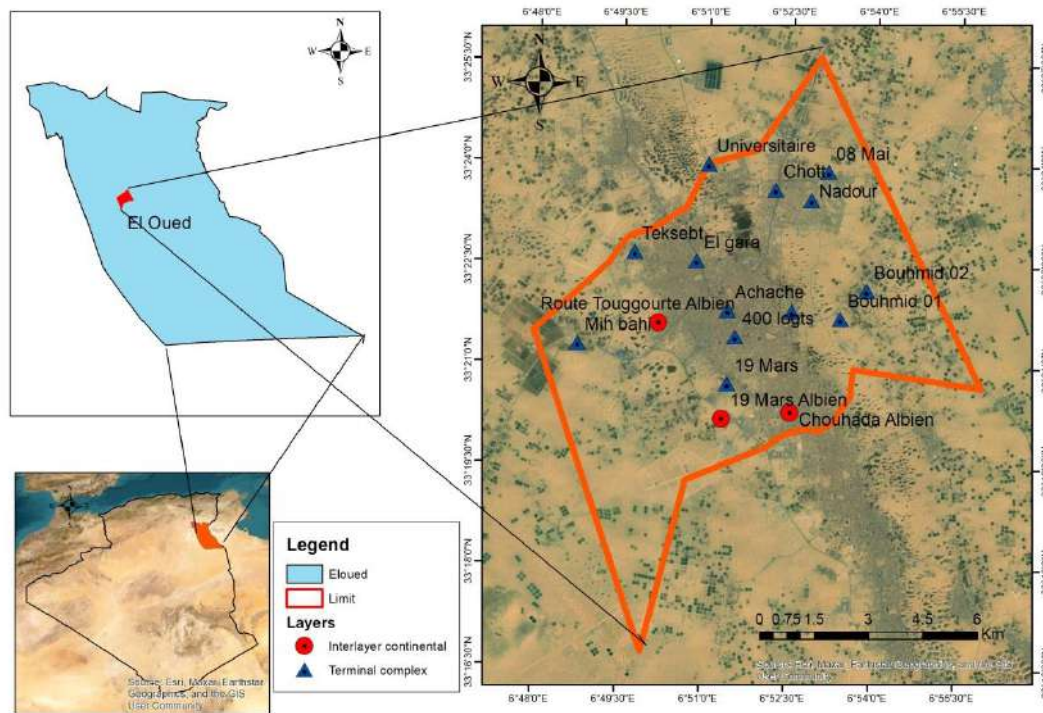


Figure III.1. La zone d'étudiée d'El-oued et des lieux d'échantillonnage.

III.3. Mesures in situ

Les mesures de terrain concernent le potentiel en hydrogène (pH), la conductivité électrique et la température. Les mesures ont été faites à l'aide d'un multi-paramètre de terrain.

III.3.1. pH

Le terme pH désigne la concentration d'ions hydrogène dans une solution. Dans l'eau, ce facteur est d'une importance exceptionnelle, en particulier dans les procédés de traitement. Dans les laboratoires de routine des usines de traitement, il est mesuré et ajusté si nécessaire pour améliorer la coagulation/floculation ainsi que pour contrôler la désinfection de l'eau. La valeur du pH va de 0 à 14. En dessous de 7, l'eau est considérée comme acide et au-dessus de 7 comme alcaline. L'eau ayant un pH de 7 est neutre. Pour effectuer une analyse de pH, nous avons besoin de solutions tampons de pH 4, pH 7 et pH 10. Comme appareillage, on utilise un pH-mètre et une électrode de verre. Le mode opératoire cité dans la norme NF T 90-800 est comme suit :

➤ Étalonnage de l'appareil :

- Allumer le pH-mètre
- Rincer l'électrode avec de l'eau distillée
- Prendre dans un petit bécher la solution tampon de pH 7
- Laisser stabiliser un moment jusqu'à l'affichage du standard 2
- Enlever l'électrode et la rincer abondamment avec de l'eau distillée

- Ré-étalonner de la même manière avec les solutions tampons de pH 4 et pH 10

➤ Méthode de mesure :

- Prendre environ 100 ml d'eau à analyser

- Mettre un agitateur avec une faible agitation

- Tremper l'électrode dans le bécher

- Laisser stabiliser un moment avec une faible agitation, puis noter le pH.

III.3.2. Température

La température dépend de l'augmentation de la consommation d'eau, de la fluoration, de la solubilité et de l'ionisation des substances coagulantes, du changement du pH, de la désinfection, etc.

III.3.3. Conductivité électrique

L'analyse de la conductivité électrique selon la norme NF T 90-031 consiste à utiliser une solution standard de KCl pour l'étalonnage, un conductimètre et une électrode de verre. Le mode opératoire est le suivant :

➤ Étalonage de l'appareil :

- Allumer le conductimètre.

- Rincer l'électrode avec de l'eau distillée.

- Prendre la solution standard de KCl dans un petit bécher.

- Laisser stabiliser un moment jusqu'à l'affichage de la constante de la cellule.

➤ Méthode de mesure :

- Prendre environ 100 ml d'eau à analyser.

- Tremper l'électrode dans le bécher.

- Laisser stabiliser un moment, puis noter la valeur de la conductivité affichée.

Le résultat est donné directement en $\mu\text{S}/\text{cm}$ ou bien en mS/cm .

III.4. Mesures et analyses au laboratoire

L'analyse élémentaire chimique a été limitée aux ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^-). Les analyses ont été réalisées au laboratoire de l'ANRH et l'ADE d'El-oued, Touggourt et d'ouargla, laboratoire de les stations de déminéralisation d'El-oued, Touggourt et d'ouargla, et laboratoire de les stations de déminéralisation et de laboratoire de l'université d'Ouargla, selon les normes algériennes.

III.4.1. Validité des résultats

Le calcul du bilan ionique (IB) permet de calculer l'erreur selon la formule suivante:

$$\text{BI} = ((\Sigma\text{c} - \Sigma\text{a})/(\Sigma\text{c}+\Sigma\text{a})) \times 100$$

Où:

Σc : Total Cations connu comme l'unité suivante (meq/l).

Σa : Total Anions connu comme l'unité suivante (meq/l).

Précision pour l'analyse chimique obtenue par le calcul de balance ionique pour chaque échantillon, les valeurs d'erreur inférieures à $\pm 5\%$ sont les meilleures estimations analytiques, ou le niveau d'erreur accepté est $\pm 10\%$ (Danielsson et al. 1999 ; Andersen et al. 2001 ; Bentoutou et al. 2018).

Un taux d'erreur supérieur à $\pm 10\%$ indique une erreur de calcul ou d'échantillonnage.

Après avoir calculé le BI pour tous les échantillons, nous avons constaté ce qui suit: 6 échantillons de bilan ionique de moins de $\pm 5\%$, 2 échantillons de moins de $\pm 10\%$ et 1 échantillon dépasse la valeur de $\pm 10\%$.

III.5. Traitement des résultats

III.5.1. Le logiciel statistique « R »

R est un logiciel permettant d'effectuer des analyses statistiques et de créer des graphiques. Mais R est aussi un langage de programmation complet, et c'est cet aspect qui distingue R des autres logiciels statistiques. Des informations sur R peuvent être trouvées sur la page d'accueil du projet : <http://www.r-project.org/>. R est un clone libre du logiciel S-Plus vendu par MathSoft et développé autour du langage S par Statistical Sciences.

Les principales caractéristiques de ce package sont la facilité d'utilisation et la grande fiabilité. Nous utilisons R pour présenter les résultats d'analyse, calculer statistiquement les mesures (maximum, minimum, moyenne, écart-type) et effectuer une analyse en composantes principales (ACP).

➤ R fonctionne dans plusieurs fenêtres sous Windows. En particulier, il distingue la fenêtre de la console R, la fenêtre principale dont l'entrée de commande et la sortie de résultat sont en mode texte par défaut. À cela, vous pouvez ajouter un ensemble de fenêtres optionnelles telles que des fenêtres graphiques et des fenêtres d'informations (historique des commandes, aide, visualiseur de fichiers, etc.). Tous ces éléments sont appelés par des commandes spécifiques via la console.

➤ Le menu Fichier contient les outils dont vous avez besoin pour gérer votre espace de travail. Vous pouvez sélectionner le répertoire par défaut, modifier les fichiers sources externes, enregistrer et charger l'historique de commandes, etc.

➤ Le menu Édit ou Édition contient les commandes habituelles de copier-coller ainsi que des boîtes de dialogue permettant de personnaliser l'apparence de l'interface utilisateur.

➤ Le menu Divers traite de la gestion des objets en mémoire et permet d'arrêter les procédures en cours de traitement.

- Le menu Packages automatise la gestion et la surveillance des bibliothèques de fonctions, permettant leur installation et leur mise à jour en toute transparence depuis le site CRAN (Comprehensive R Archive Network) : <http://cran.r-project.org/> ou de toute autre source locale.
- Enfin, les menus Windows (ou Fenêtres) et Help (ou Aide) proposent des fonctionnalités similaires à celles des autres applications Windows : définition spatiale des fenêtres, accès en ligne, manuels de référence des logiciels R.
- L'entrée de l'utilisateur est en rouge, la réponse de R est en bleu. Les chiffres entre crochets au début de chaque ligne indiquent l'indice du premier chiffre de la ligne (Bertrand, 2009).

III.5.2. L'analyse en composant principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) est l'une des techniques les plus largement utilisées lors de la recherche d'informations dans de grands ensembles de données (variables). L'ACP étudie et visualise les corrélations entre les variables afin de limiter éventuellement le nombre de variables à mesurer ultérieurement. L'ACP visualise les variables dans un espace à deux ou trois dimensions afin d'identifier des groupes d'observation homogènes, ou au contraire, des groupes d'observation atypiques. De plus, il diminue le nombre de variables sans perdre l'information (Barkat et al., 2021; Hakimi et al., 2022; Fartas et al 2022). Dans notre étude l'ACP permet de découvrir les corrélations existantes entre les composants chimiques et minéraux de l'eau afin de sélectionner les éléments d'une forte corrélation et de les utiliser dans la calcul de l'indice de qualité des eaux . Concernant les paramètres, nous avons choisi le cas classique et nous avons fixé le nombre de composants à deux (4) selon la règle de kaiser. De plus, nous avons demandé d'afficher la matrice de corrélation qui montre le coefficient de Pearson.

III.5.3. Diagrammes

Le logiciel d'hydrochimie d'Avignon (Version 4, 2008) a été utilisé pour classer les eaux (faciès chimique, classe d'irrigation...) et pour construire les diagrammes de Piper, Wilcox, Chadha et USSL.

III.6. Cartographie

Dans les études environnementales en général, et dans celles portant sur la qualité des eaux souterraines en particulier, la cartographie joue un rôle très important dans la visualisation des variations spatiales des éléments, facilitant ainsi la détection des zones potentielles et des sous-zones appropriées pour un type d'activité ou d'usage donné. Le logiciel ArcGIS a été utilisé pour effectuer toutes les tâches liées à la cartographie dans cette thèse.

III.6.1. Présentation d’ArcGIS

ArcGIS est un système d'information géographique (SIG) permettant de travailler avec des cartes et des informations géographiques gérées par l'Institut de recherche sur les systèmes environnementaux (Esri). Il est utilisé pour créer, utiliser, compiler, analyser, partager, découvrir et gérer des cartes et des données géographiques dans une variété d'applications. Le système fournit une infrastructure pour rendre les cartes et les informations géographiques disponibles dans toute une organisation, une communauté et sur le Web. ArcGIS Desktop (souvent appelé « ArcMap » pour le distinguer d'ArcGIS Pro) est composé de quatre applications fondamentales :

- ArcMap est utilisé pour visualiser et éditer des données spatiales en deux dimensions et créer des cartes bidimensionnelles.
- ArcScene est utilisé pour visualiser et éditer des données spatiales tridimensionnelles dans une vue projetée locale.
- ArcGlobe est utilisé pour afficher de grands ensembles de données 3D globaux.
- ArcCatalog est utilisé pour la gestion des données SIG et les tâches de manipulation.

Nous avons utilisé le logiciel ArcGIS pour créer toutes les cartes, qu'il s'agisse de cartes de présentation de la zone ou de cartes de distribution géospatiale par interpolation.

III.6.2. Méthodologie adopté pour l’interpolation

Pour créer des cartes de distribution spatiale d'un paramètre Z sous ArcGIS, une base de données consistant en des coordonnées (X, Y) et les concentrations (Z) de chaque point (forage dans notre cas) est nécessaire. ArcGIS fournit plusieurs méthodes d'interpolation, laissant à l'utilisateur le choix de la meilleure méthode adaptée au type de données étudié. Parmi ces méthodes, on peut citer : Krigage, IDW et Spline.

III.7. Méthodes d’évaluations de la qualité des eaux

III.7.1. Calcul de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE)

Brown et al. (1970) ont développé un indice de la qualité de l'eau dont la structure est similaire à celle de l'indice de Horton, mais avec une sélection de paramètres plus rigoureuse, le développement d'une échelle commune et l'attribution de poids.

Des pondérations pour lesquelles des exercices de Delphes élaborés ont été réalisés. Cet effort a été soutenu par la National Sanitation Foundation (NSF). Pour cette raison, l'indice de Brown est également connu sous le nom de WQINSF (Brown et al., 1970; Abbasi & Abbasi, 2012).

Pour calculer l'IQE, trois étapes ont été suivies:

Dans la première étape, chacun des 11 paramètres (pH, CE, TDS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^-) s'est vu attribuer un poids (w_i) en fonction de ses effets perçus sur la santé primaire (tableau III.4).

Le poids maximale de 5 a été attribuée à des paramètres tels que les nitrates et les solides dissous totaux, car ils sont importants pour évaluer la qualité de l'eau. Les autres paramètres se sont vus attribuer un poids compris de 1 à 5 selon leur importance dans la qualité globale de l'eau de consommation (**Brown et al., 1970; Abbasi & Abbasi, 2012**). La deuxième étape est " Calcul du poids relatif ". Le poids relatif (W_i) est calculé dans l'équation (1) ci-dessous:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (1)$$

Où:

w_i : Un poids pour chaque paramètre.

n : Le nombre de paramètres.

W_i : Le poids relatif.

Les poids (w_i), les valeurs de poids relatives calculées (W_i) et les normes de l'OMS pour les paramètres sont présentés dans le tableau III.1.

Dans la troisième étape, la métrique d'évaluation de la qualité (q_i) pour les différents paramètres a été calculée par l'équation (2):

$$q_i = (C_i/S_i) \times 100 \quad (2)$$

Où:

q_i : C'est une évaluation de qualité.

C_i : la concentration de chaque paramètre physico-chimique dans les échantillons d'eau (mg/l).

S_i : Normes OMS pour chaque paramètre chimique en mg/l.

Enfin, en utilisant les valeurs W_i et q_i , le SI_i pour chaque paramètre chimique a été calculé (équation 3) et l'IQE (équation 4) a été calculé à partir des équations suivantes :

$$SI_i = q_i \times w_i \quad (3)$$

$$WQI = \sum SI_i \quad (4)$$

Où:

SI_i : sous-indice du $i^{\text{ème}}$ paramètre.

q_i : est le classement basé sur la concentration du paramètre i .

n : est le nombre de paramètres.

Les indices de qualité de l'eau présentés dans cette étude sont dérivés sur la base des niveaux de cations et d'anions dans l'eau. Ces indicateurs ne peuvent décrire que les niveaux de qualité de l'eau potable dans l'eau souterraine dans la zone d'étude. Dans la phase de « sélection », 11

différents paramètres sont sélectionnés comprenant le PH, la CE, le TDS, le Cl^- , le SO_4^{2-} , le HCO_3^- , le NO_3^- , le Ca^{2+} , le Mg^{2+} , le Na^+ et le K^+ (paramètres physico-chimiques) en tant que composants importants de l'eau potable pour être impliqués dans l'indice. Le tableau III.1 présente les paramètres et leur valeur standard selon les normes de la qualité de l'eau potable de l'OMS.

Tableau III.1. Les poids attribués et les poids relatifs des paramètres physico-chimiques.

Parameter	WHOs	Weight (wi)	Relative weight (Wi)
pH	8.5	4	0.114286
CE	500	4	0.114286
TDS	600	5	0.142857
Ca^{2+}	200	2	0.057143
Mg^{2+}	50	2	0.057143
Na^+	200	2	0.057143
K^+	12	1	0.028571
SO_4^{2-}	250	4	0.114286
HCO_3^-	500	3	0.085714
Cl^-	600	3	0.085714
NO_3^-	45	5	0.142857
Total		35	1

L'indice de qualité de l'eau (IQE) a été utilisé pour déterminer l'aptitude de l'eau souterraine à la consommation. L'IQE est un outil très utile pour communiquer des informations sur la qualité globale de l'eau. Les normes de potabilité sont prises en compte dans le calcul de l'IQE et selon les recommandations de l'OMS.

Les valeurs IQE calculées se répartissent essentiellement en cinq catégories (tableau III.2): excellent, bon, mauvais, très mauvais et impropre à la consommation humaine.

Tableau III.2. Classification de la qualité de l'eau par valeur IQE (Ramakrishnaiah et al. 2009).

Gamme IQE	Class	Type d'eau
<50	I	Eau excellente
50.1–100	II	Bonne eau
100.1–200	III	Eau pauvre
200.1–300	IV	Eau très pauvre
>300	V	Eau impropre à la consommation

III.7.2. Indicateurs utilisés pour l'évaluation de l'aptitude de l'eau à l'irrigation

L'eau d'irrigation affecte à la fois les plantes et le sol. Il est donc important de connaître sa qualité. Des changements dans la perméabilité, la structure et l'aération du sol peuvent être dus à la forte salinité de l'eau. Pour évaluer de qualité de l'eau souterraine dans l'irrigation, il est nécessaire de déterminer diverses propriétés de l'eau d'irrigation. Pour cette raison, les indicateurs de qualité de l'eau pour l'irrigation sont l'absorption du sodium (SAR), l'indice de perméabilité (PI), l'indice de Kelly (KI) et le pourcentage de solubilité du sodium (SSP ou N%), le carbonate de sodium résiduel (RSC), le risque de magnésium (MH) et l'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IQEI) ont été calculés et interprétés.

III.7.2.1. Indice de perméabilité (PI)

La porosité et la perméabilité sont des propriétés physiques importantes du sol. La perméabilité est la capacité d'un sol à transmettre de l'eau et de l'air. Lorsque l'eau d'irrigation est utilisée pendant une longue période affecte la perméabilité du sol et de son rôle affecte l'eau d'irrigation contenant des ions Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- dans le sol (**Singh et al. 2013a, Singh et al. 2013b**).

Doneen, 1964 montre le procédé pour classer l'eau d'irrigation en fonction de l'IP. L'IP est calculé en utilisant la relation suivante:

$$\text{PI} = \frac{(\text{Na}^+ + \sqrt{\text{HCO}_3^-}) \times 100}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+}$$

Où, les concentrations utilisées dans le calcul sont exprimées en unité meq/l. Il divise l'eau en trois classes :

- Si $\text{PI} > 75\%$: la classe I (bon).
- Si $25\% < \text{PI} < 75\%$: la classe II (adapté).
- Si $\text{PI} < 25\%$: la classe III (inadapté).

III.7.2.2. L'indice de Kelly (KI)

Cet indice est exprimé par le rapport de la somme de la concentration de Na^+ à la concentration de Ca^{2+} et Mg^{2+} . C'est l'un des indicateurs de base pour juger de l'aptitude de l'eau d'irrigation. L'eau à forte concentration de Na^+ ne convient pas à l'irrigation, l'IK peut être calculé en utilisant la relation suivante, Kelley:

$$\text{KI} = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}}$$

Où les concentrations en méq/l.

Selon **Kelley (1940)** et **Paliwal (1967)**:

- Si : $KI < 1$: Indique que l'eau est de bonne qualité pour l'irrigation.
- Si : $1 < KI < 2$: admissible pour l'irrigation.
- Si : $KI > 1$: Indique que l'eau est impropre à l'irrigation.

III.7.2.3. Pourcentage de sodium (Na%) ou pourcentage de solubilité du sodium (SSP%)

Une teneur élevée en Na^+ dans l'eau d'irrigation cause des dommages importants. Des concentrations très élevées de sodium dans l'eau affectent la perméabilité du sol et l'infiltration d'eau. Le sodium peut déplacer et désassembler les ions alcalins de la Terre (Ca^{2+} et Mg^{2+}) dans l'argile, ce qui entraîne la dégradation de la structure du sol et réduit considérablement sa perméabilité (**Baize, 1988**).

Un excès de sodium peut également provoquer une intoxication chez certaines plantes, mais le sodium est absorbé par la plante en même temps que l'eau, ce qui provoque la concentration du sodium dans les feuilles de la plante et l'excrétion de l'eau sous forme de sueur (**Ayers & Westcot, 1985**). Lorsque la concentration en sodium atteint le seuil de tolérance de la culture, une toxicité peut être observée, se manifestant par le brûlage et le dessèchement des feuilles, ce qui entraîne toujours une certaine mort de la plante.

En général, les plantes supportent mal les sols saturés de Na^+ . La classification Wilcox est basée sur la CE et la teneur en Na^+ en l'eau exprimée en pourcentage. Na% peut être calculé en utilisant la relation **Todd 1995** suivante:

$$SSP(Na \%) = \frac{(Na^+ + K^+) \times 100}{Ca^{+2} + Mg^{+2} + Na^+ + K^+}$$

Où, les concentrations utilisées dans le calcul sont exprimées en unité meq/l.

Classifications de Na % :

- Si : $Na\% < 20$: Indique une excellente d'eau.
- Si : $20 < Na\% < 40$: Indique une bonne d'eau.
- Si : $40 < Na\% < 60$: Indique une admissible qualité d'eau pour l'irrigation.
- Si : $60 < Na\% < 80$: Indique une douteux d'eau.
- Si : $Na\% > 80$: Indique d'eau d'inadapté pour l'irrigation.

III.7.2.4. Sodium Absorption Ratio (SAR)

Un chercheur de l'USDA Richards de Riverside, Californie en 1954 a proposé l'indice de SAR pour classer et caractériser l'eau d'irrigation. Il est très pratique et fiable. Cependant, il ne peut pas être utilisé pour estimer le risque de salinisation ou de sodisation. La valeur du SAR est donnée par la relation **Raghunath 1987** suivante :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})}{2}}}$$

Où, les concentrations utilisées dans le calcul sont exprimées en unité meq/l.

La qualité de l'eau d'irrigation peut être classée en quatre catégories:

- Excellente si le SAR est inférieur à 10. Risque sodique faible (S1).
- Bonne s'il est compris entre 10 et 18. Risque sodique moyen (S2)
- Douteuse s'il est compris entre 18 et 26. Risque sodique élevé (S3).

Impropre à l'irrigation s'il est supérieur à 26. Risque sodique très élevé (S4).

III.7.2.5. Le carbonate de sodium résiduel (RSC)

Eaton (1950) et **Richards (1954)** ont proposé le concept d'alcalinité résiduelle, désignée par le symbole RSC. On pense souvent qu'il s'agit de dépôts de calcite et de Sépiolite. Un bon indicateur du risque de sodicité dans l'eau d'irrigation. Les anions bicarbonate et carbonate de l'eau d'irrigation ont tendance à précipiter les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} dans le sol, ce qui entraîne une augmentation des ions Na^+ . C'est pourquoi le RSC a été adopté comme indicateur du risque de sodicité de l'eau.

L'abondance des ions carbonate (CO_3^-) et bicarbonate (HCO_3^-) dans l'eau d'irrigation doit être évalué. Lorsque les eaux d'irrigation ont une proportion plus élevée de CO_3^- et de HCO_3^- que de Ca^{2+} et Mg^{2+} , ces deux derniers éléments ont tendance à précipiter, augmentant le SAR.

Eaton (Eaton 1950) a suggéré de calculer RSC en utilisant l'équation suivante :

$$\text{RSC} = (\text{CO}_3^- + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

Où, les concentrations utilisées dans le calcul sont exprimées en unité meq/l.

Eaton (1950) a conclu que l'eau d'irrigation peut être classée en trois classes selon les valeurs RSC:

RSC < 1,25 meq/l : est adaptée à l'irrigation.

1,25 < RSC < 2,5 meq/l : est considérée comme marginale.

RSC > 2,5 meq/l : n'est pas adapter à l'irrigation.

III.7.2.6. Risque de magnésium (MH)

Selon **Gowd 2005**, la présence de niveaux élevés de magnésium dans l'eau d'irrigation affecte négativement la qualité du sol en le rendant plus alcalin, ce qui entraîne une baisse des rendements. L'indicateur de risque de magnésium "Magnesium Hazard" est utilisé pour déterminer si l'eau convient à l'irrigation. La valeur MH% est donnée par la relation suivante:

$$\text{MH} = \frac{\text{Mg}^{+2}}{\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}} \times 100$$

Où toute concentration en méq/l.

Raghunath (1987) conclut que l'eau d'irrigation peut être classée en deux classes selon les valeurs MH:

- Si MH % > 50% : n'est pas adaptée à l'irrigation.
- Si MH % < 50% : est sûre pour l'irrigation.

III.7.3. Indice de Qualité de l'Eau d'Irrigation (IQEI)

L'indice de qualité de l'eau d'irrigation L'IQEI indique que les exigences en matière de qualité de l'eau d'irrigation peuvent varier d'un champ à l'autre, selon les types de cultures cultivées ainsi que selon les conditions climatiques et pédologiques locales. Ces dernières années, l'indice de qualité de l'eau (IQE) a été largement utilisé pour évaluer la qualité de l'eau pour l'irrigation et la consommation. Sur les données disponibles dans la région d'étude le modèle IQEI a été utilisé. Le modèle a été développé par **Meireles et al. (2010)**. Les paramètres choisis en premier étaient ceux jugés les plus pertinents pour l'irrigation. La deuxième phase consiste à définir les termes des valeurs, les mesures de qualité (q_i) et les poids d'agrégation (P_i). Selon les normes développées par **Ayers & Westcot (1999)** et les paramètres de qualité de l'eau d'irrigation fournis par le comité consultatif de l'université de Californie (UCCC), la valeur de (q_i) est estimée sur la base des valeurs de chaque paramètre.

Les valeurs sont présentées dans le tableau III.8 (**Meireles et al. 2010**). Des nombres sans dimension ont été utilisés pour représenter les paramètres de qualité de l'eau. Plus le chiffre est élevé, meilleure est la qualité de l'eau.

Tableau III.3. Valeurs pour les mesures de qualité (q_i).

q_i	CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	SAR (meq/l)	Na ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻
			Meq/l		
85 - 100	$200 \leq \text{CE} < 750$	SAR <3	$2 \leq \text{Na} < 3$	Cl <4	$1 \leq \text{HCO}_3 < 1.5$
60 - 85	$750 \leq \text{CE} < 1500$	$3 \leq \text{SAR} < 6$	$3 \leq \text{Na} < 6$	$4 \leq \text{Cl} < 7$	$1.5 \leq \text{HCO}_3 < 4.5$
35 - 60	$1500 \leq \text{CE} < 3000$	$6 \leq \text{SAR} < 12$	$6 \leq \text{Na} < 9$	$7 \leq \text{Cl} < 10$	$4.5 \leq \text{HCO}_3 < 8.5$
0 - 35	CE <200 or CE ≥ 3000	SAR ≥ 12	Na <2 or Na ≥ 9	Cl ≥ 10	HCO ₃ <1 or HCO ₃ ≥ 8.5

Les valeurs q_i ont été calculées par la relation suivante en fonction des valeurs des paramètres indiquées dans le tableau III.3.

$$q_i = q_{i\max} - \left\{ \frac{[(x_{ij} - x_{\text{inf}}) \times q_{i\text{amp}}]}{x_{\text{amp}}} \right\}$$

Où:

$q_{i\max}$: la valeur maximale de q_i pour chaque classe.

x_{ij} : la valeur observée de chaque paramètre.

x_{inf} : la valeur correspondant à la borne inférieure de la classe à laquelle appartient le paramètre.

$q_{i,amp}$: l'amplitude de la classe.

x_{amp} : l'amplitude de la classe à laquelle le paramètre appartient.

Ensuite, à l'aide de l'équation **Meireles et al. 2010**, les valeurs P_i ont été normalisées de manière à ce que leur total soit égal à 1.

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^k F_j A_{ij}}{\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n F_j A_{ij}}$$

Où:

P_i : le poids du paramètre pour l'IQE.

F : la valeur auto du composant 1.

A_{ij} : l'explicabilité du paramètre i par le facteur j .

I : représente le nombre de paramètres physico-chimiques et chimiques retenus dans le modèle. Il varie de 1 à n .

J : le nombre de facteurs sélectionnés dans le modèle, variant de 1 à k .

Le poids relatif est indiqué dans le tableau III.4 (**Meireles et al. 2010**).

Tableau III.4. Poids relatif (P_i) de chaque paramètre dans l'IQEI.

Paramètre	CE	Na	HCO ₃	Cl	SAR	Total
Poids (P_i)	0.211	0.204	0.202	0.194	0.189	1.0

Les valeurs susmentionnées de Q_i et P_i peuvent être utilisées pour calculer la valeur de l'IQEI conformément à l'équation suivante :

$$IQEI = \sum_{i=1}^n q_i \times p_i$$

Où:

IQEI: Un paramètre sans dimension avec une valeur comprise entre 0 à 100.

Q_i : La qualité du $i^{\text{ème}}$ paramètre, un nombre compris entre 0 à 100, fonction de sa mesure ou de sa concentration.

P_i : le poids normalisé du $i^{\text{ème}}$ paramètre, fonction de son importance relative pour la qualité de l'eau souterraine.

$0 < IWQI < 40$: est une eau de classe 5, "restriction sévère" (SR) pour l'irrigation et peut être utilisée dans des sols très perméables, selon **Meireles et al. (2010)**.

III.8. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de présenter les méthodologies sélectionnées afin d'exécuter toutes les tâches essentielles dans cette thèse. Premièrement, pour évaluer la qualité des eaux souterraines, des eaux des stations de déminéralisation (brutes, traitées et rejet) et des eaux après mélange (eau de rejet diluée avec de l'eau souterraine) de la région d'étude, des analyses physico-chimiques telles que le potentiel en hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE), la température (T °C), les cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) et les anions (Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^-) ont été effectuées. De plus, nous avons présenté les différents outils et moyens d'analyse des données ainsi que l'élaboration des modèles, tels que les diagrammes, R et ArcGIS. Dans le chapitre suivant, nous entamons la première partie des résultats et de la discussion.

Chapitre IV

Évaluation de la qualité des eaux souterraines, des eaux brutes, traitées et rejet.

IV.1. Introduction

L'eau souterraine est la seule source dans une zone Sahara septentrional, Cette eau est utilisée pour la consommation, l'irrigation, l'industrie, etc.

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'évaluation de la qualité des eaux souterraines est menée dans le but de déterminer et de connaître l'origine de faciès chimique des eaux, son évolution spatiotemporelle, ainsi d'avoir une idée générale sur la qualité de ces eaux et les secteurs d'utilisation.

Les stations de déminéralisation traitent les eaux souterraines à l'aide de diverses techniques, telles que l'osmose inverse, couramment utilisée dans le nord du désert du Sahara septentrional en Algérie. Lorsque l'eau brute est traitée à l'aide de la technique d'osmose inverse, l'eau traitée contient 75 % d'eau brute et l'eau rejet contiennent 25 % d'eau brute. Cette étude est menée afin d'évaluer l'efficacité des stations de déminéralisation en évaluant la qualité de l'eau brute, traitée et rejet .

IV.2. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux de deux nappes étudiées montrent une variété significative dans les concentrations des éléments chimiques dans l'eau, ce qui donne des interprétations, classifications et jugements différents d'une nappe à l'autre. Pour cela, et pour une meilleure compréhension des résultats obtenus, nous avons d'abord présenté les normes de potabilisation selon l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et les normes algériennes (NA) dans le tableau IV.1. nous avons d'abord présenté les normes d'irrigation selon l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) dans le tableau IV.2 . Nous avons comparé les résultats analytiques avec les valeurs indicatives standards suggérées par l'OMS, la réglementation algérienne et FAO. Ensuite, statistiquement, nous avons présenté les valeurs maximales, minimales, moyennes, l'intervalle et l'écart-type des analyses physico-chimiques de chaque nappe dans le tableau VI-2. Nous avons étudié les résultats uniquement pour la région d'El-Oued, car la zone d'étude est très vaste et le nombre d'échantillons est élevé. Statistiquement, nous avons présenté les valeurs maximales, minimales, moyennes et l'écart-type des analyses physico-chimiques de chaque nappe dans le tableau IV.3.

Tableau IV.1. Normes de potabilisation des eaux.

Paramètre	Les normes Algériennes (2011)	Les normes de l'OMS	
		minimum	maximum
pH	6.5 à 9	6.5	8.5
CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	2800	1500	1500
TDS (mg/l)	/	500	1500
TH (mg/l CaCO ₃)	200	100	500
Ca ²⁺ (mg/l)	200	75	200
Mg ²⁺ (mg/l)	150	50	150
Na ⁺ (mg/l)	200	200	200
K ⁺ (mg/l)	12	12	12
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	400	250	600
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	/	500	600
Cl ⁻ (mg/l)	500	250	600
NO ₃ ⁻ (mg/l)	50	0	50

Tableau IV.2. Les normes des eaux d'irrigation.

Paramètres	L'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (OAA / FAO)
pH	8.5
CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	3000
TDS (mg/l)	2000
Ca ²⁺ (mg/l)	400
Mg ²⁺ (mg/l)	60
Na ⁺ (mg/l)	919
K ⁺ (mg/l)	2
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	960
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	610
Cl ⁻ (mg/l)	1036
NO ₃ ⁻ (mg/l)	10

Tableau IV.3. Description statistique des propriétés physico-chimiques des échantillons.

	Paramètre										
	pH	CE ($\mu\text{s/cm}$)	TDS	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	So ₄ ²⁻	HCo ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
	Nappe du Continental Intercalaire (CI)										
Max	7.74	2830	1811	412.82	162.84	300	38	843.78	660.25	168.36	27.36
Min	6.93	2630	1453	200.4	53.47	210	13	354.53	394.2	109.8	0.12
Moy	7.37	2705	1683.08	294.92	111.39	250.16	30.58	559.26	468.35	145.99	8.27
Ecart types	0.25	64.87	116.30	88.01	34.50	35.52	9.16	148.76	96.88	19.36	11.46
	Nappe du Complexe Terminal (CT)										
Max	7.87	4980	3185	585.17	217.88	600	42	1368.48	970.56	170.8	31.65
Min	6.95	2630	1683	196.39	31.59	210	15	446.7	480.17	103.7	1.25
Moy	7.48	4022.14	2503.17	322.92	120.04	388.97	30.42	922.14	691.74	131.06	18.70
Ecart types	0.15	303.20	281.37	101.38	36	79.49	5.89	184.74	120.91	17.14	7.41

Concentration des ions et TDS en mg/l ; min—minimum ; max—maximum ; Moy—moyenne.

IV.3. Interprétation des résultats

D'après le tableau IV.3 on trouve que:

Les résultats de l'analyse de l'eau sont présentés dans le tableau IV.3. Nous avons comparé les résultats analytiques avec les valeurs indicatives standard suggérées par l'OMS et le NA (tableau IV.1) pour évaluer deux strates d'eau souterraine destinées à la consommation.

L'analyse du pH montre un min de 6,93 et un max de 7,87. En général, les deux couches avaient des eaux souterraines appropriées dans tous les échantillons.

Électroconductivité (EC): les résultats d'analyse montrent que toutes les couches présentent des eaux souterraines dépassant les limites acceptables.

Ions : les résultats de l'analyse chimique des eaux souterraines de l'Albien montrent que la couche a une eau impropre à la consommation, où nous avons trouvé que toutes les valeurs de chlorure (Cl⁻), de calcium (Ca²⁺), de magnésium (Mg²⁺), de potassium (K⁺) et de sodium (Na⁺) ont dépassé la valeur maximale acceptée dans tous les échantillons. Par ailleurs, les valeurs de sulfate (SO₄²⁻) ont dépassé la valeur maximale acceptée dans 91,66% des échantillons. Nous expliquons cette situation avec la présence de gypse et l'accumulation de sels. La présence de gypse et d'anhydrites est la raison pour laquelle ces valeurs augmentent. Nous avons également constaté que le bicarbonate (HCO₃⁻) et le nitrate (NO₃⁻) sont ajustés dans l'eau avec une valeur acceptable respectant les normes.

Pour la couche terminale complexe, nous avons trouvé que les valeurs de chlorure (Cl⁻), de sulfate (SO₄²⁻), de potassium (K⁺) et de sodium (Na⁺) ont dépassé la valeur maximale acceptée dans tous les échantillons, à l'exception des valeurs de calcium (Ca²⁺) et de magnésium (Mg²⁺) qui ont dépassé la valeur maximale acceptée dans 97,92% et 95,83% des échantillons, respectivement. Cette mauvaise qualité est due à deux facteurs principaux, le premier étant le type d'activité dans la

zone d'El-Oued (agriculture), et le second étant l'infiltration des eaux peu profondes et l'accumulation de sels. Nous avons également constaté que le HCO_3^- et le NO_3^- sont présents dans l'eau avec une valeur acceptable selon les normes. Sur la base des résultats des analyses physico-chimiques, il est clair que les concentrations des échantillons d'eau souterraine sont supérieures aux limites acceptables et souhaitées pour les consommateurs d'eau, à l'exception de HCO_3^- . Par conséquent, nous recommandons la mise en place d'une usine de déminéralisation pour rendre l'eau potable selon les normes de l'OMS.

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines dans la zone d'El-Oued ont été examinées afin d'analyser la qualité des aquifères CI et CT. Le pH de l'eau indique que le type de terrain traversé influençait par son caractère acide ou alcalin. Les concentrations de TDS varient entre 1453 et 3185 mg/L. Les échantillons peuvent être classés comme frais à modérément salés par TDS, et 76.66% d'entre eux dépassent les critères de l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) (Tableau IV.2) (Ayers & Westcot 1985) pour l'eau. L'eau mesurée avait un pH compris entre 6.93 et 7.87. Les normes de la FAO ont été respectées sur la base de ces résultats (Tableau IV.2). La valeur du pH a également montré que l'eau était peu alcaline et que les mécanismes de fixation de la dolomite et de la calcite prédominaient entre les valeurs de pH de 6,5 et 8,5. Par conséquent, l'EC fournit des données sur le degré de minéralisation de l'eau. Avec une gamme de 2630-4980 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Notamment, cette étude a trouvé des résultats supérieurs à la recommandation de la FAO de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans 76.66% des échantillons d'eau. Tous les forages de la nappe CT de la région d'El-Oued présentaient des valeurs EC plus élevées ($\text{CE} > 3000$). Les niveaux de Ca^{2+} dans les échantillons d'eau variaient de 196.39 à 585.17 mg/L. Pour l'eau d'irrigation, la FAO fixe un seuil maximum acceptable de 400 mg/L, le nombre moyen de sites d'eau était inférieur à la recommandation de la FAO. Les concentrations de Mg^{2+} allant de 31.59 à 217.88 mg/L, le nombre moyen de sites d'eau était supérieur à la recommandation de la FAO. La dureté de l'eau est principalement due à des quantités élevées d'éléments alcalino-terreux. Le type de sol a affecté leur concentration. La quantité de Ca^{2+} a atteint son maximum vers le Sud-Est et le Sud-Ouest. De même, le sud-est et le sud-ouest de la région présentaient les concentrations de Mg^{2+} les plus élevées, atteignant un maximum de 217.88 mg/L. En général, la décomposition des roches ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), du gypse (CaSO_4) et du carbonate de calcium (CaCO_3) dans l'aquifère produit du Ca^{2+} (équations suivante):



Les éléments alcalins Na^+ se trouvent naturellement dans l'eau d'irrigation. La concentration de Na^+ est variée de 210 à 600 mg/L. Tous les échantillons d'eau examinés étaient inférieurs à la limite de 919 mg/L fixée par la FAO. Les concentrations de K^+ variaient de 13 à 42 mg/L. La norme de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture OAA établit une concentration maximale admissible de 2 mg/L pour l'eau d'irrigation. La décomposition du KCl et du NaCl dans les interactions roche-eau, les suintements salins et les apports atmosphériques mineurs sont les causes de cet enrichissement (**Panno et al 2002**). Les concentrations de potassium les plus élevées ont été trouvées dans les échantillons prélevés dans tous les forages de la zone d'étude. La concentration de Cl^- variait de 354.53 à 1368.48 mg/L, cette dernière valeur étant la plus élevée. Une étude antérieure de **Lima et al 2012** a suggéré que la forte concentration de chlorure pourrait être due aux types de formations traversées par l'eau, ou qu'elle pourrait être le résultat d'un traitement inadéquat des eaux usées. Le traitement inadéquat des eaux usées. Certains chiffres ne répondent pas aux exigences de FAO (1036 mg/L). Dans les forages d'eau, les plus élevées concentrations de Cl^- ont été trouvées dans les échantillons du Sud-Est de la zone d'étude. Les concentrations élevées de Cl^- font rouiller les métaux, donnent à l'eau un goût salé et réduisent la résistance du béton. Les directives de la FAO indiquent que la concentration de HCO_3^- doit être d'environ 610 mg/L. Néanmoins, les échantillons d'eau souterraine prélevés dans la zone d'étude ont révélé des teneurs comprises entre 103.7 et 170.8 mg/L, qui se situent dans la fourchette spécifiée précédemment. Dans cette étude, les niveaux de SO_4^{2-} variaient entre 394.2 et 966.1 mg/L et étaient conformes aux normes de l'OAA. Les échantillons d'eau analysés dans la région d'El-Oued présentaient des concentrations de NO_3^- allant de 0,12 à 31.65 mg/L. Certains chiffres ne répondent pas aux exigences de la FAO (10 mg/L). D'après le tableau IV.3, La valeur élevée des nitrates dans la zone d'étude indique qu'il y'a eu contamination par les nitrates due à des activités anthropogéniques. Bien que NO_3^- soit généralement considéré comme un anion mineur dans l'eau propre, sa concentration élevée est le signe d'une utilisation excessive d'engrais ou d'engrais minéraux dans l'agriculture (**Nemc., Jazbec 2017**). La Figure IV.6 montre les cartes de distribution des paramètres physico-chimiques dans la zone d'étude.

Sur la base des résultats de l'analyse des eaux souterraines pour les deux couches, il est clair que 96,67% des échantillons prélevés à El-Oued ont une eau souterraine basique, avec un pH minimum de 6,93 et un pH maximum de 7,87. Seuls 3,33% des échantillons présentent un pH inférieur à 7, dont un échantillon du complexe terminal et un de l'Albien. Les cations dans les puits étudiés ont été classées dans l'ordre décroissant suivant:

Dans le complexe terminal, $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$, tandis que dans l'albien, $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. Le rapport Na/Cl moyen de 2,40 (supérieur à 1) indique souvent la dissolution de

minéraux silicatés comme source d'ions Na^+ , qui sont liés aux ions Ca^{2+} et Mg^{2+} dans les échantillons. Par contre, les anions sont disposés dans l'ordre décroissant suivant: Dans le complexe terminal, $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$, tandis que dans l'Albien, $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$. La lithologie de la zone d'étude explique les sources primaires de SO_4^{2-} et de HCO_3^- , qui sont la présence de gypse et de roches carbonatées sédimentaires (Cambro-Ordovicien) dans les formations géologiques, respectivement. Les concentrations élevées d'ions Ca^{2+} suggèrent que la zone d'étude peut être affectée par la dissolution de minéraux carbonatés. Bien que NO_3^- soit généralement considéré comme un anion mineur dans l'eau propre, sa concentration élevée est le signe d'une utilisation excessive d'engrais ou d'engrais minéraux dans l'agriculture.

IV.4. Faciès hydrogéochimiques

Les données chimiques des ions clés ont été représentées sur un diagramme de Piper afin de déterminer les faciès et les voies potentielles de développement géochimique. Le diagramme se compose d'un champ central en forme de diamant et de deux champs triangulaires pour les ions positifs et les anions. Le champ central représente les caractéristiques générales de l'eau en faisant tomber les indicateurs dans les champs triples. D'après le diagramme de Piper (Figure IV.1), le faciès hydrochimique des eaux souterraines dans 95,84 % des puits du complexe terminal et 100 % des puits albien est $\text{Cl}^- \text{SO}_4^{2-} \text{Ca}^{2+} \text{Mg}^{2+}$, tandis que dans 4,16 % des puits du complexe terminal, il s'agit de $\text{Cl}^- \text{Na}^+ \text{K}^+$. Les types ou catégories d'eau servent de base à un système standard de classification des eaux naturelles. L'hydrochimie de tout faciès est contrôlée par la lithologie, la cinétique de la solution et les schémas d'écoulement de l'aquifère.

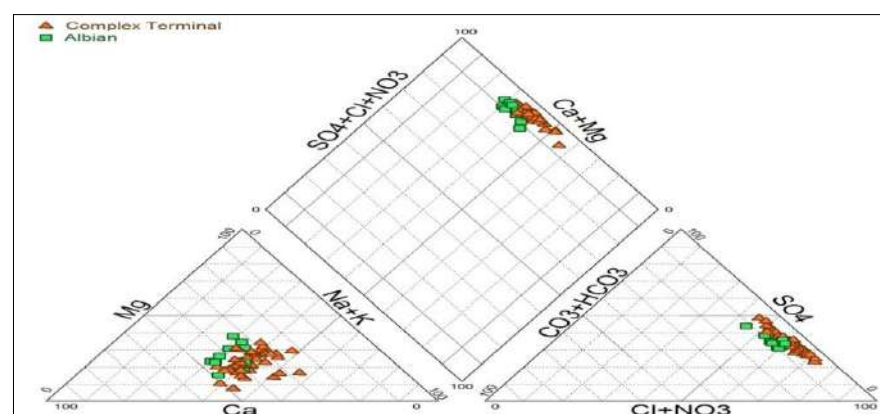


Figure III.1. Diagramme de Piper pour les échantillons d'eau souterraine en région El-oued entre 2021 et 2022.

Pour classer les eaux souterraines et identifier les processus hydrochimiques, un nouveau diagramme hydrochimique (diagramme de Chadha) est utilisé. Les sous-champs d'étude primaires

du diagramme définissent le caractère général de l'eau. Sur la base de leur composition chimique, les échantillons d'eau analysés peuvent être regroupés en deux types d'eau (Figure IV.2), qui correspondent à leur distribution géographique et à l'influence de la lithologie:

Le groupe A montre que les métaux alcalins dépassent les alcalino-terreux et que les anions acides forts dépassent les anions acides faibles. Ce groupe se compose des eaux souterraines à salinité relativement élevée (TDS = 2582 - 3132mg/L) de type $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ (33%) ou $\text{Na}^+ - \text{SO}_4^{2-}$ (67%). Les échantillons (n°:6, 57, 58) provenant du terminal complexe de la zone d'étude montrent une quantité significative de sulfate et de chlorure. Ce type d'eau crée généralement des problèmes de salinité, tant que pour l'irrigation que pour la consommation.

Le groupe B montre que les alcalino-terreux dépassent les métaux alcalins et que les anions acides forts dépassent les anions acides faibles. Ce groupe représente 57 échantillons (n°:1-5,7-56,59-60) avec une eau de type $\text{Mg}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ et une salinité plus élevée (TDS = 1453 - 3185 mg/L). Ces échantillons ont été reconnus dans les eaux souterraines de deux couches (albien et complexe terminal). Ces eaux ont une dureté permanente et ne déposent pas de carbonate de sodium résiduel lors de l'irrigation.

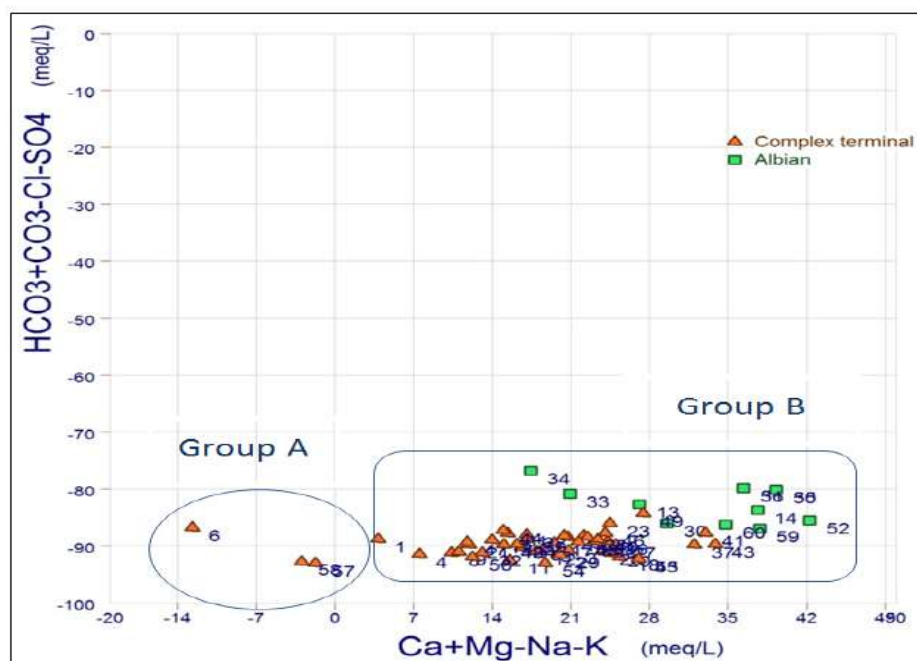


Figure III.2. Classification des échantillons d'eau étudiés selon le diagramme de Chadha.

IV.5. Classification de la qualité des eaux souterraines par valeur IQE

L'indice de la qualité des eaux (IQE) a été utilisé pour déterminer l'aptitude des eaux souterraines à la consommation. Les valeurs calculées de l'IQE se situent entre 177,27 et 292,28. L'IQE de cette zone d'étude est divisé en cinq catégories différentes: excellente qualité de l'eau, si l'IQE est supérieur à 50; bonne qualité de l'eau, si l'IQE est compris entre 50 et 100 ; mauvaise

qualité de l'eau, si l'IQE est compris entre 100 et 200 ; qualité de l'eau inférieure, si l'IQE est compris entre 200 et 300, et impropre à la consommation, si l'IQE est supérieur à 300, comme démontrer par **Ramakrishnaiah et al. (2009)**.

Le tableau IV.4. montre que 18,75 % des échantillons d'eau souterraine sont de mauvaise qualité pour la consommation et que 81,25 % des échantillons d'eau souterraine appartiennent à la catégorie des eaux de très mauvaise qualité.

Tableau IV.4. Classification de l'IQE, pourcentage d'eau souterraine et type d'eau.

Numéro de l'échantillon	Les nappes	Lieu d'échantillonnage	Valeur de l'IQE	Plage de l'IQE	Type d'eau souterraine	% d'échantillons
-		-	-	<50	Excellente eau	0
-		-	-	50–100	Bonne eau	0
S1	Nappe du Continental Intercalaire (CI)	Rout toughert	177.27	100–200	Eau de mauvaise qualité	18.75
S2		Chouhada	177.60	100–200		18.75
S3		19 Mars	187.08	100–200		18.75
S4	Nappe du Complexe Terminal (CT)	gara	262.99	200–300	Eau très pauvre	81.25
S5		pole universitaire	246.47	200–300		81.25
S6		sidi messtour	237.21	200–300		81.25
S7		08 mai	239.35	200–300		81.25
S8		bouhmid 01	217.78	200–300		81.25
S9		mih bahi	219.13	200–300		81.25
S10		achache	250.73	200–300		81.25
S11		bouhmid 02	236.64	200–300		81.25
S12		teksept	233.67	200–300		81.25
S13		nadour	292.28	200–300		81.25
S14		chott	224.93	200–300		81.25
S15		19 mars	241.16	200–300		81.25
S16		400 logts	237.44	200–300		81.25
-		-	-	>300	Eau impropre à la consommation	0

IV.6. Classification de la qualité des eaux souterraines pour l'IQEI

IV.6.1. Rapport d'adsorption du sodium

La valeur SAR est comprise entre 2,69 et 2,97 (tableau IV.5). La figure 6. B montre la présence de sodium faible à élevé dans les eaux souterraines pour toute la zone d'étude dans la couche terminale complexe. La valeur SAR varie de 4,39 à 6,97 (tableau IV.5).

Conductivité électrique (CE): l'activité osmotique des cultures et leur capacité à absorber l'eau et les nutriments du sol peuvent être affectées par des valeurs élevées de conductivité électrique (salinité). Quatre classes distinctes (tableau IV.5) ont été déterminées sur la base de la CE dans les eaux souterraines. La valeur de la CE a été enregistrée entre 2760 et 4980 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (tableau IV.5). Les

résultats de l'analyse chimique des eaux souterraines albiennes montrent que la couche contient de l'eau très saline pour l'irrigation. Pour la couche terminale complexe, nous avons constaté que 100 % des échantillons ont une salinité très élevée pour l'irrigation.

Tableau IV.5. Classification de l'eau d'irrigation sur la base du SAR et de la CE.

Nom du paramètre	Type d'eau	Fourchette	Nombre d'échantillons	% d'échantillons
SAR	Faible teneur en sodium	<10	16	100
	Moyennement riche en sodium	10-18	0	0
	Haute teneur en sodium	18-26	0	0
	Très haute teneur en sodium	>26	0	0
CE	Faible teneur en sel	<250	0	0
	Saline moyenne	250-750	0	0
	Forte teneur en sel	750-2250	0	0
	Très haute teneur en sel	>2250	16	100

Dans la présente étude, tous les échantillons appartiennent dans la classe excellente (faible teneur en sodium), c'est-à-dire que les valeurs SAR sont inférieures à 10. Les échantillons classés comme étant à faible teneur en sodium sont utilisés pour l'irrigation. En fonction de la concentration de l'ion Na^+ , celui-ci réagit avec le sol, ce qui entraîne une augmentation ou une diminution de son imperméabilité. **Karanth (1987)** a déclaré qu'une valeur de % Na plus élevée pouvait être une source de défloculation, causant des dommages au sol et à la perméabilité du sol.

Tous les échantillons d'eau souterraine prélevés dans les deux strates sont classés dans la classe 1, risque sodique faible S1, sur la base du SAR. Les valeurs CE et SAR ont été reportées sur un diagramme de salinité américain (USSL 1954). Selon le diagramme USSL (Figure IV.3), les échantillons d'eau souterraine appartiennent à deux catégories : C4S1 (salinité très élevée avec peu de sodium) et C4S2 (salinité très élevée avec un taux de sodium moyen). Ces échantillons présentent des risques alcalins faibles à moyens et une salinité très élevée. Selon le diagramme USSL, les échantillons d'eau souterraine conviennent à l'irrigation dans tous les types de sol.

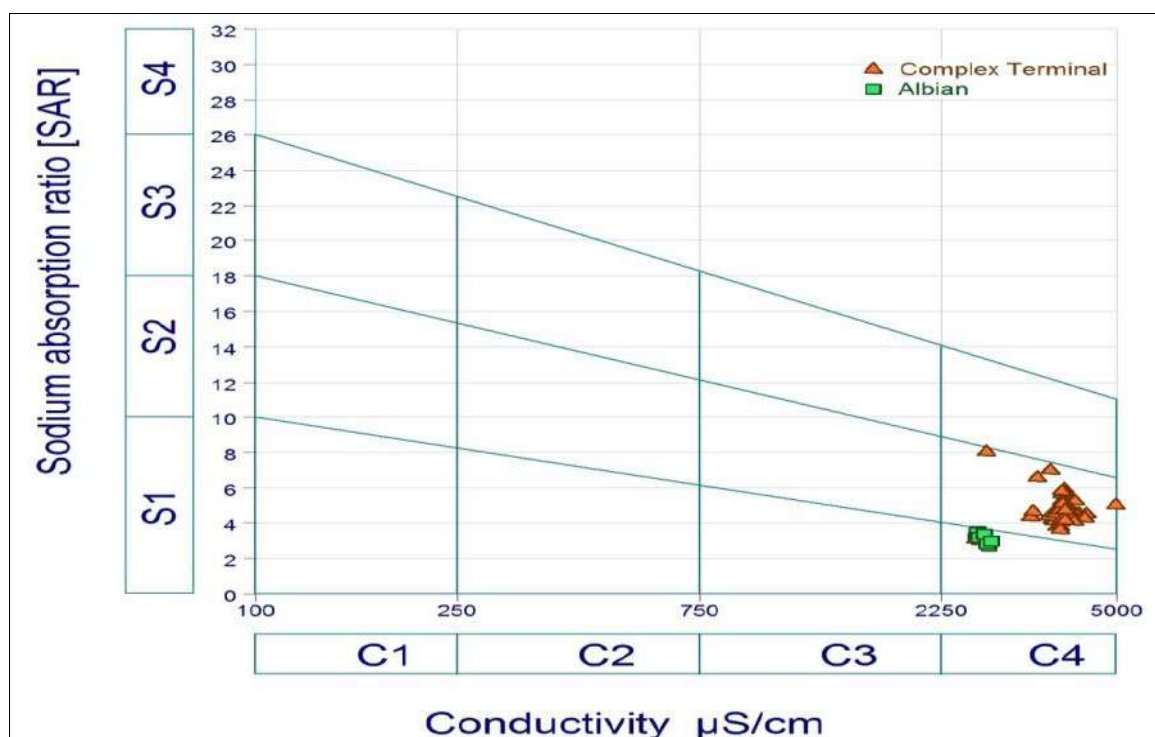


Figure IV.3. Aptitude des eaux souterraines à l'irrigation selon la classification de l'USSL.

IV.6.2. Pourcentage de sodium

Dans cette zone d'étude, la concentration en Na% dans la couche intercalaire continentale varié de 27 à 31 %, et dans la couche terminale complexe, la concentration en %Na varié de 35 à 50 %. La valeur la plus faible de Na% a été enregistrée dans la couche intercalaire continentale et la plus élevée dans la couche terminale complexe de la zone d'étude, comme montré dans le Tableau IV.6. Le tableau IV.6 montre que 5 échantillons dépassent la limite de 40, tandis que 11 échantillons d'eau souterraine ont des valeurs de Na% <60, ce qui peut être classé comme une bonne qualité pour l'irrigation. Les échantillons d'eau souterraine prélevés dans les deux strates ont été évalués quant à leur aptitude à l'irrigation sur la base de leur pourcentage de sodium soluble (SSP), et tous les échantillons ont été jugés aptes à cet usage. La classification des eaux souterraines à des fins d'irrigation était basée sur la corrélation entre Na% et CE (Figure IV.4), conformément au schéma de classification de Wilcox (1955). Cependant, dans la couche albienne, 100 % des échantillons d'eau souterraine ont été considérés comme douteux pour un usage agricole. Dans la couche terminale complexe, seuls 4,16 % des échantillons ont été considérés comme douteux, tandis que les 95,84 % restants ont été jugés impropres à l'utilisation agricole.

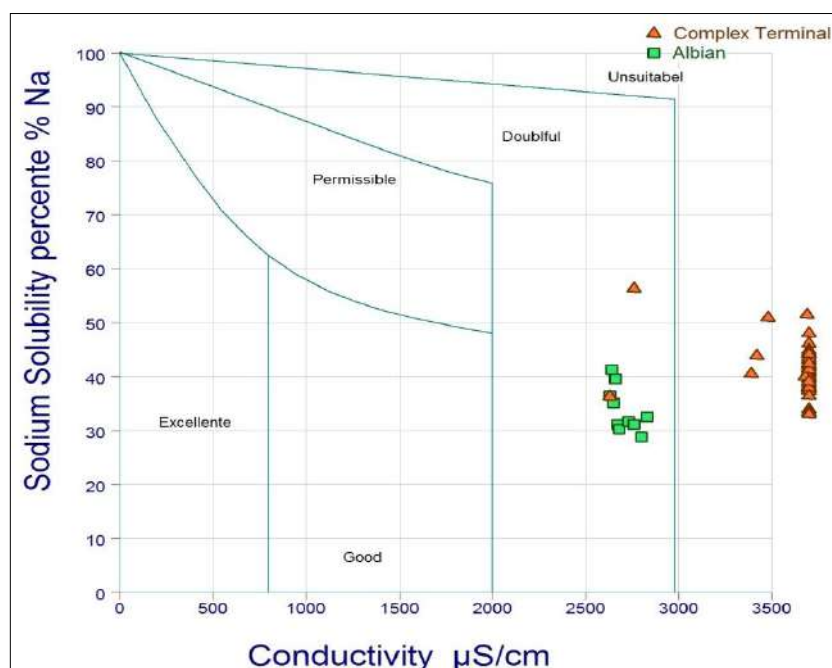


Figure IV.4. Tracé du pourcentage de sodium (%Na) en fonction de la CE.

IV.6.3. Carbonate de sodium résiduel

Raghunath (1987) a montré que l'utilisation du RSC peut être utilisée pour évaluer la qualité des eaux souterraines pour l'irrigation. Les valeurs de RSC inférieures à 1,25 indiquent que les eaux souterraines sont bien adaptées à l'irrigation, comme le montre le tableau IV.6.

IV.6.4. Risques liés au magnésium

Dans cette étude, les valeurs de MH variaient de 13 à 53 mg/L. Le tableau IV.6 montre clairement que la plupart des échantillons d'eau souterraine (81,25 %) conviennent à l'irrigation, et que 18,75 % (S1, S3 et S4) des échantillons ne conviennent pas à l'irrigation, ayant un MH >50.

IV.6.5. Indice de Kelly

L'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation a été déterminée à l'aide du ratio/indice (KR) (Kelley 1963). Les résultats montrent que 6,25 % (S16) des échantillons sont impropres à l'irrigation, tandis que 93,75 % des échantillons d'eau souterraine ont un KR inférieur à 1 du KH. Il s'agit d'une eau de bonne qualité pour les pratiques agricoles (Tableau IV.6).

IV.6.6. Indice de perméabilité

Dans cette étude, les valeurs de le PI étaient comprises entre 0,33 et 0,54 %. Le tableau IV.6 montre clairement que tous les échantillons d'eau souterraine (100 %) sont marginalement sûrs pour l'irrigation, c'est-à-dire qu'ils ont un PI de $0,25 < 0,75$.

IV.6.7. Indice de qualité de l'eau d'irrigation

Dans cette étude, les valeurs de l'IWQI sont comprises entre 23,46 et 35,57. Il ressort clairement du tableau IV.6 que tous les échantillons d'eau souterraine (100 %) sont soumis à des restrictions sévères (SR) pour l'irrigation (les sols doivent avoir une perméabilité élevée), qui ont $0 < IWQI < 40$.

les valeurs SAR, SSP (ou %Na), KR, RSC, MH et PI (Tableau IV.6) des eaux souterraines échantillonnées dans la ville d'El-Oued confirment que les eaux souterraines prélevées dans deux couches sont adaptées à l'irrigation.

Table IV.6. Classification des échantillons d'eau souterraine selon différents paramètres.

Paramètres	Valeurs	Type d'eau	Nombre d'échantillons	% of samples
%Na (Wilcox 1955)	<20	Excellent	0	0
	20–40	Bon	11	68.75
	40–60	Admissible	5	31.25
	60–80	Douteux	0	0
	>80	Inadapté	0	0
MHR (Raghunath 1987)	<50	Adaptée	16	100
	>50	Inadapté	0	0
RSC (Raghunath 1987)	<1.25	Bon	16	100
	1.25-2.5	Douteux	0	0
	>2.5	Inadapté	0	0
KR (Kelley 1963)	<1	Bon	15	93.75
	>1	Inadapté	1	6.25
PI	<0.25	Sûr	16	100
	0.25-0.75	Peu sûr	0	0
	>0.75	Peu sûr	0	0
IQEI Meireles et al. (2010)	85-100	Aucune restriction (NR)	0	0
	70-85	Restriction faible (LR)	0	0
	55-70	Restriction modérée (MR)	0	0
	40-55	Restriction élevée (RH)	0	0
	0-40	Restriction sévère (SR)	16	100

IV.7. Distribution géospatiale de la qualité des eaux souterraines

Trente-huit (38) cartes pour la zone d'El-Oued ont été maillées à l'aide des outils du SIG représentant dix-neuf paramètres hydrochimiques (TDS,CE, Ph, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , So_4^{2-}

,Hco₃⁻,NO₃⁻, SAR, %Mg, %Na, CSR, KI, PI, IQEI et IQE) dans le but de créer des modèles de distribution géospatiale correspondants (Figure IV.5, 6 et 7). Cette partie de notre étude permet de faire une analyse géospatiale de la qualité des eaux souterraines et la détection les sous-zones appropriées pour l'irrigation.

La carte de distribution spatiale de l'IQE a montré que la mauvaise qualité de l'eau potable est répartie dans toute la zone d'étude dans la couche intercalaire continentale (Figure IV.5). La figure IV.5 montre que la totalité de la zone d'étude située dans la couche terminale complexe présente une qualité d'eau souterraine très médiocre.

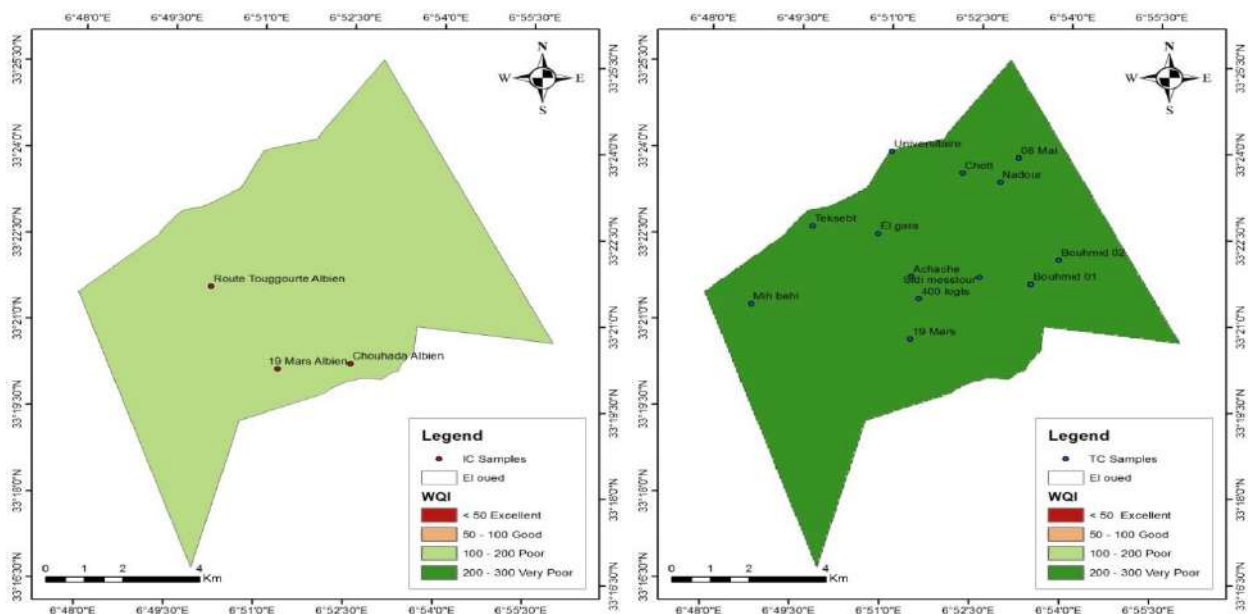
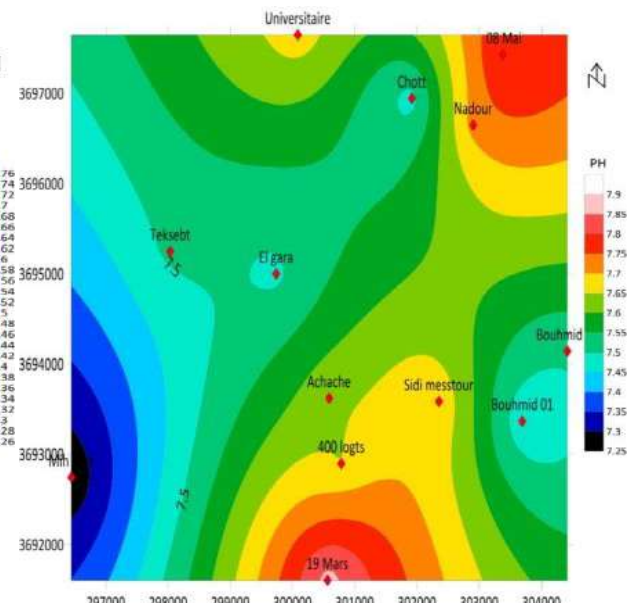
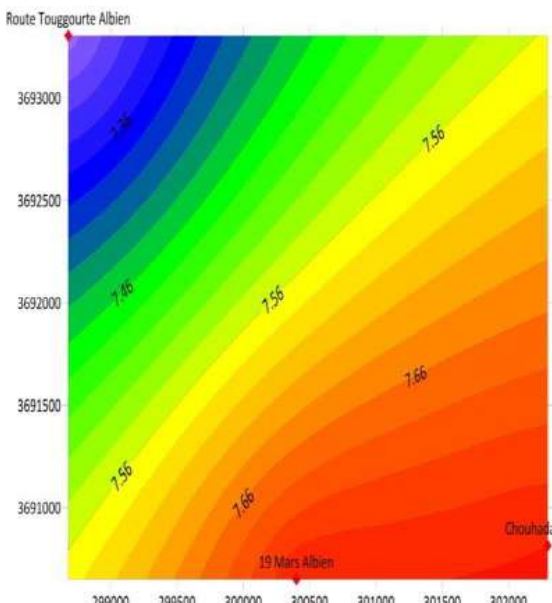
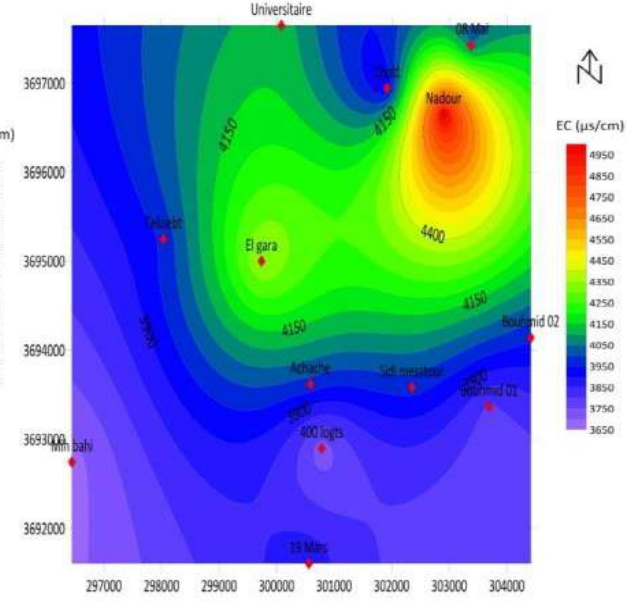
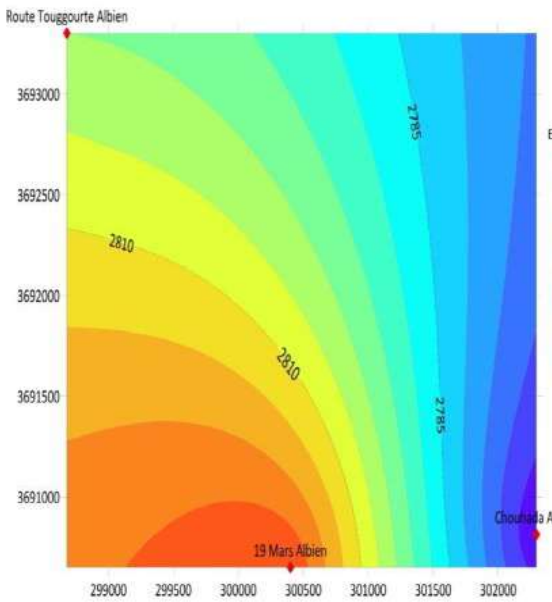
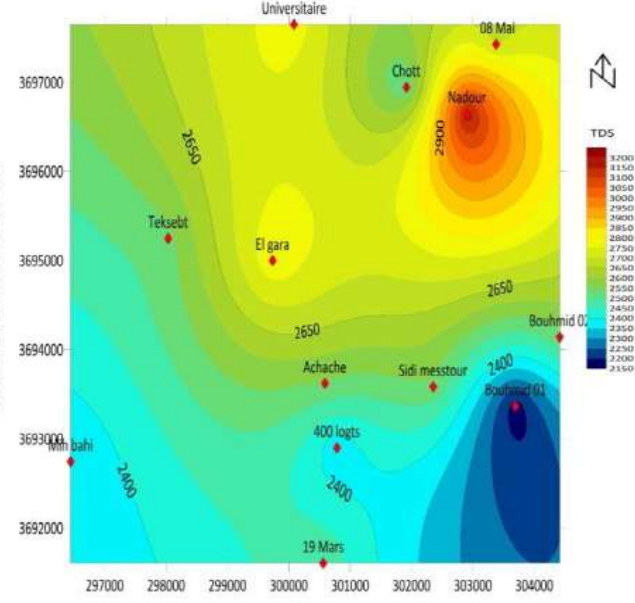
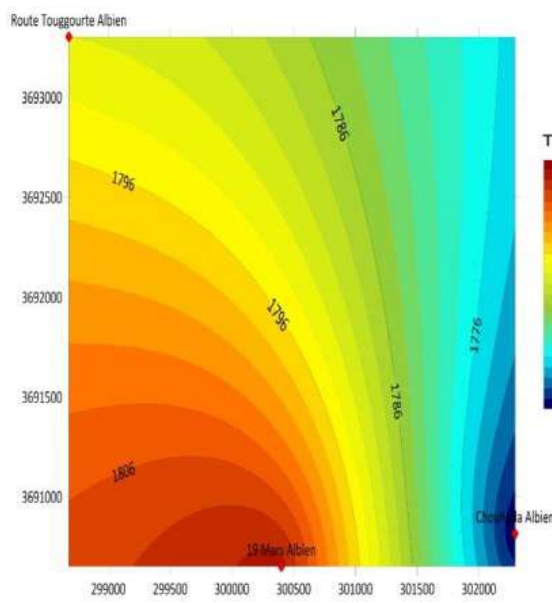
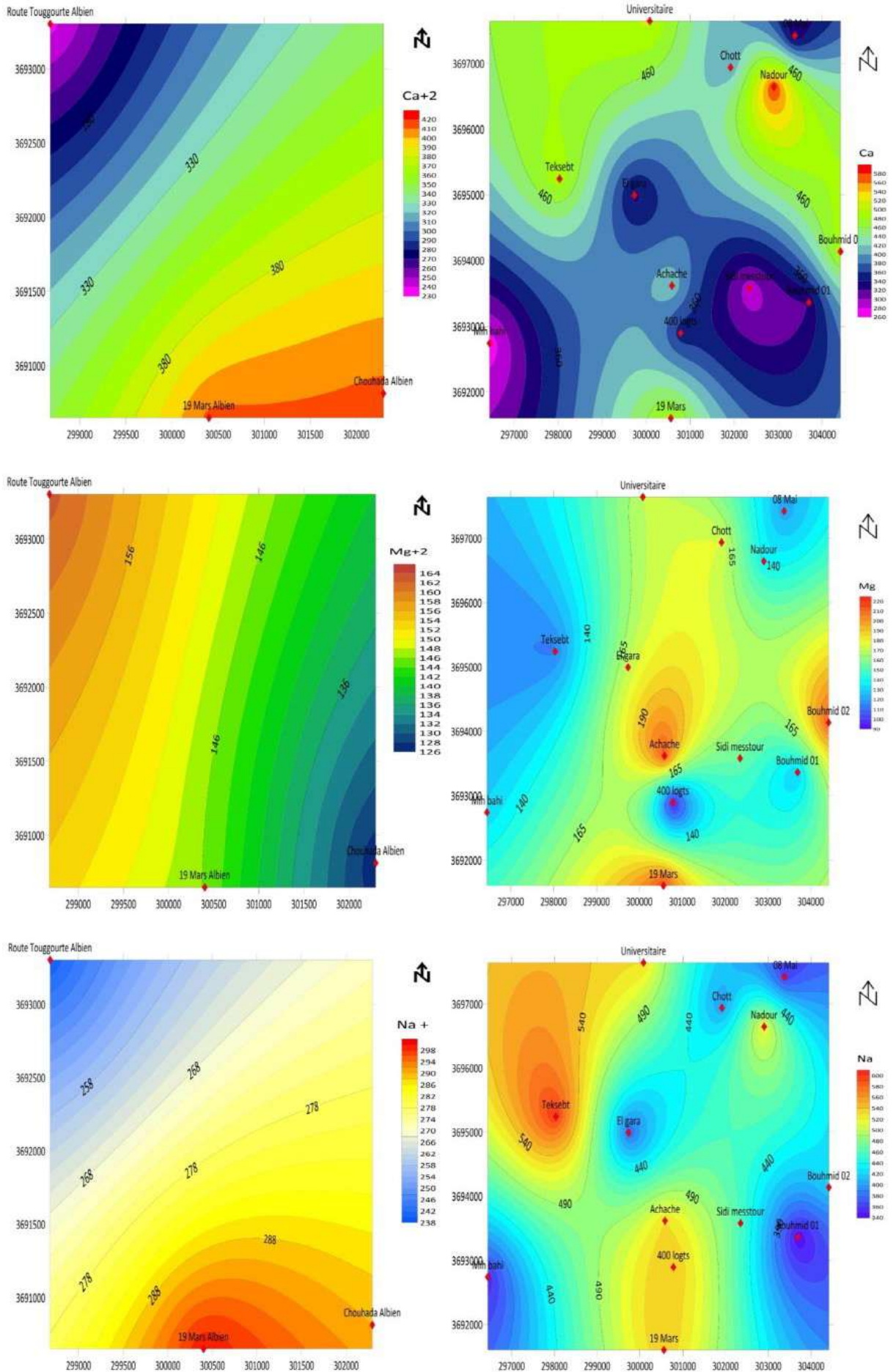
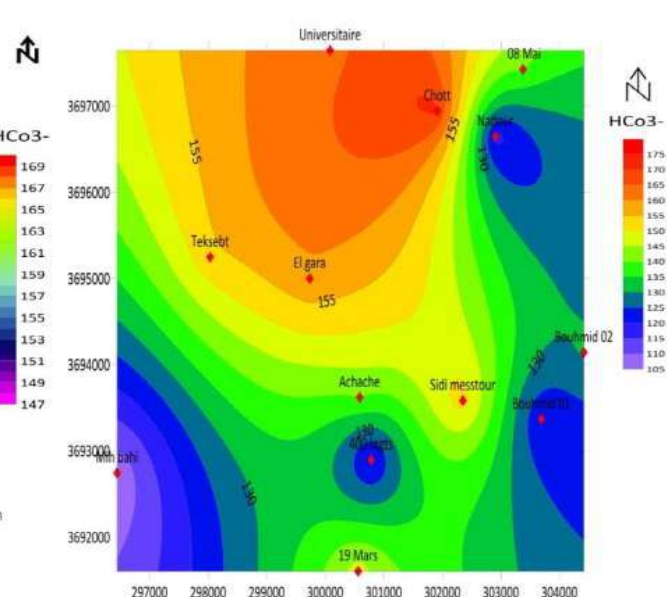
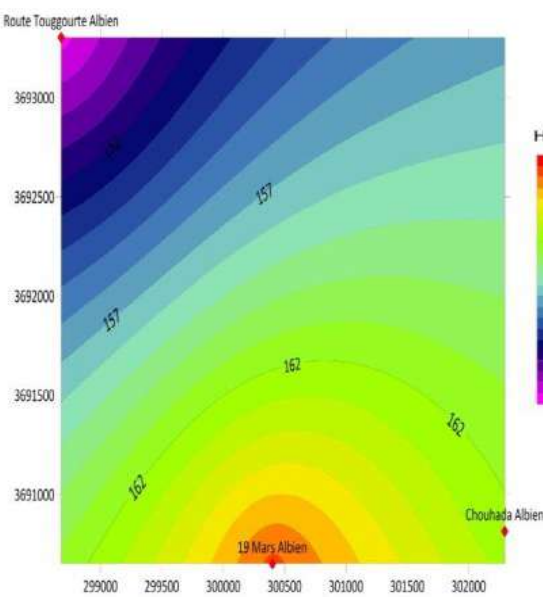
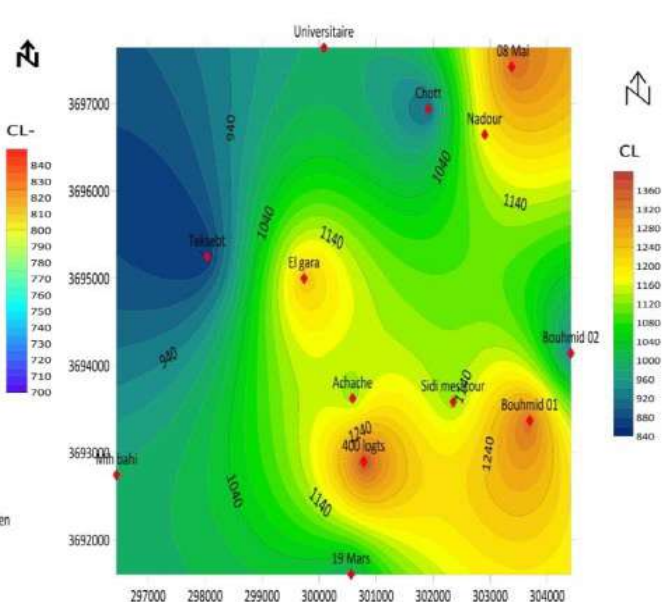
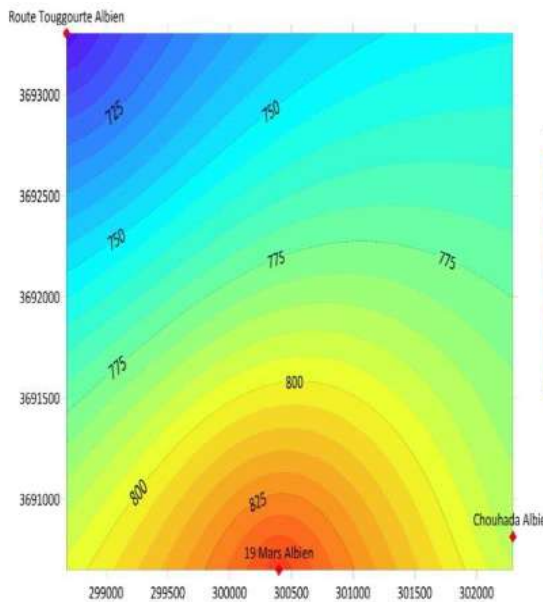
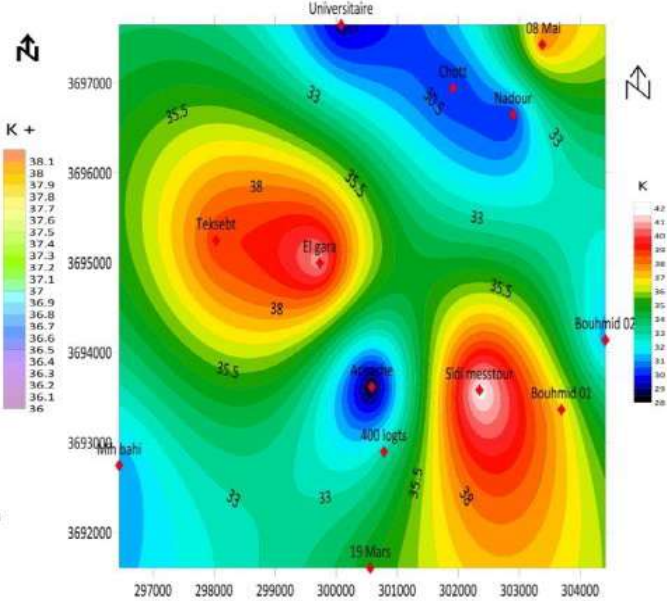
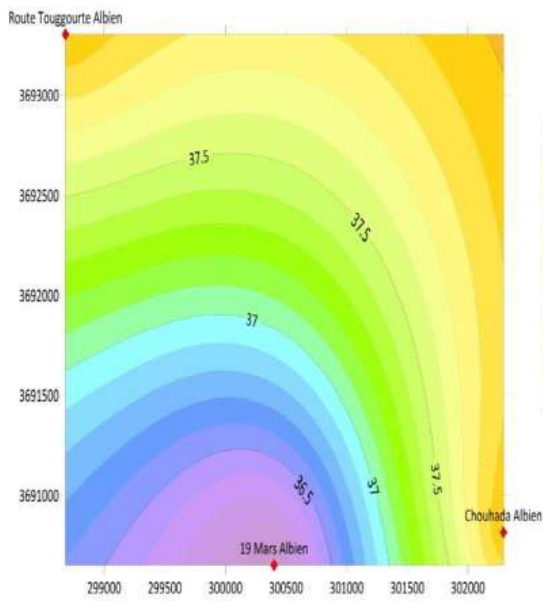


Figure IV.5. Distribution spatiale de l'IQE à la région d'El-oued.

La Figure IV.6 montre les cartes de distribution des paramètres physicochimiques dans la zone d'étude.







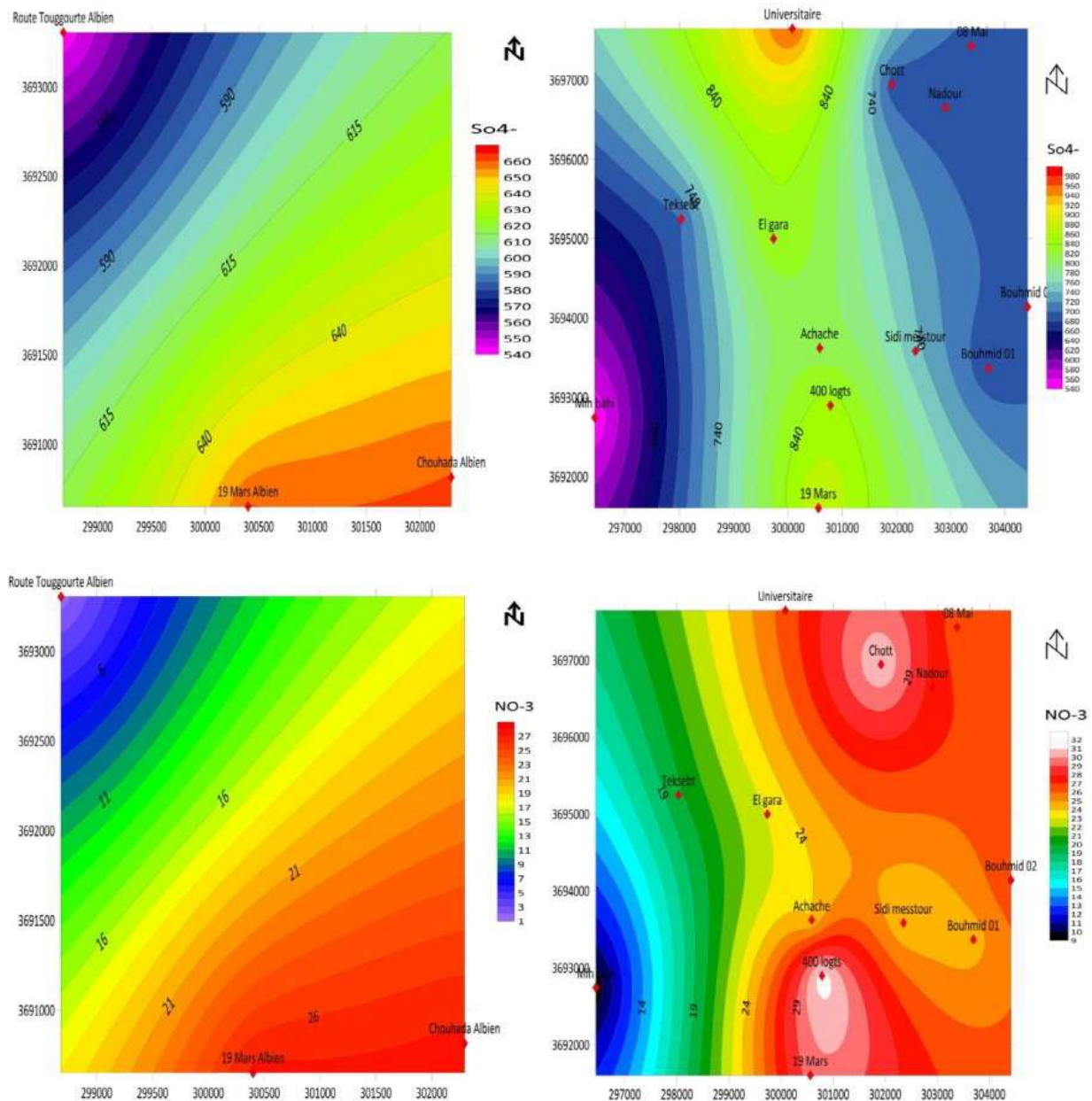
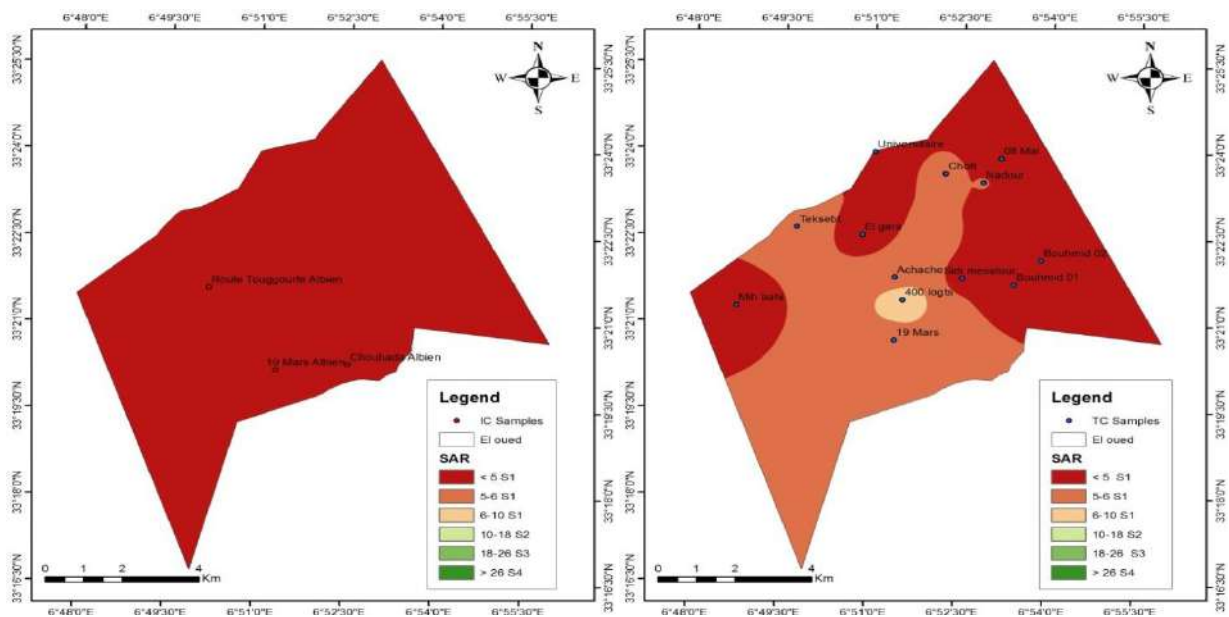
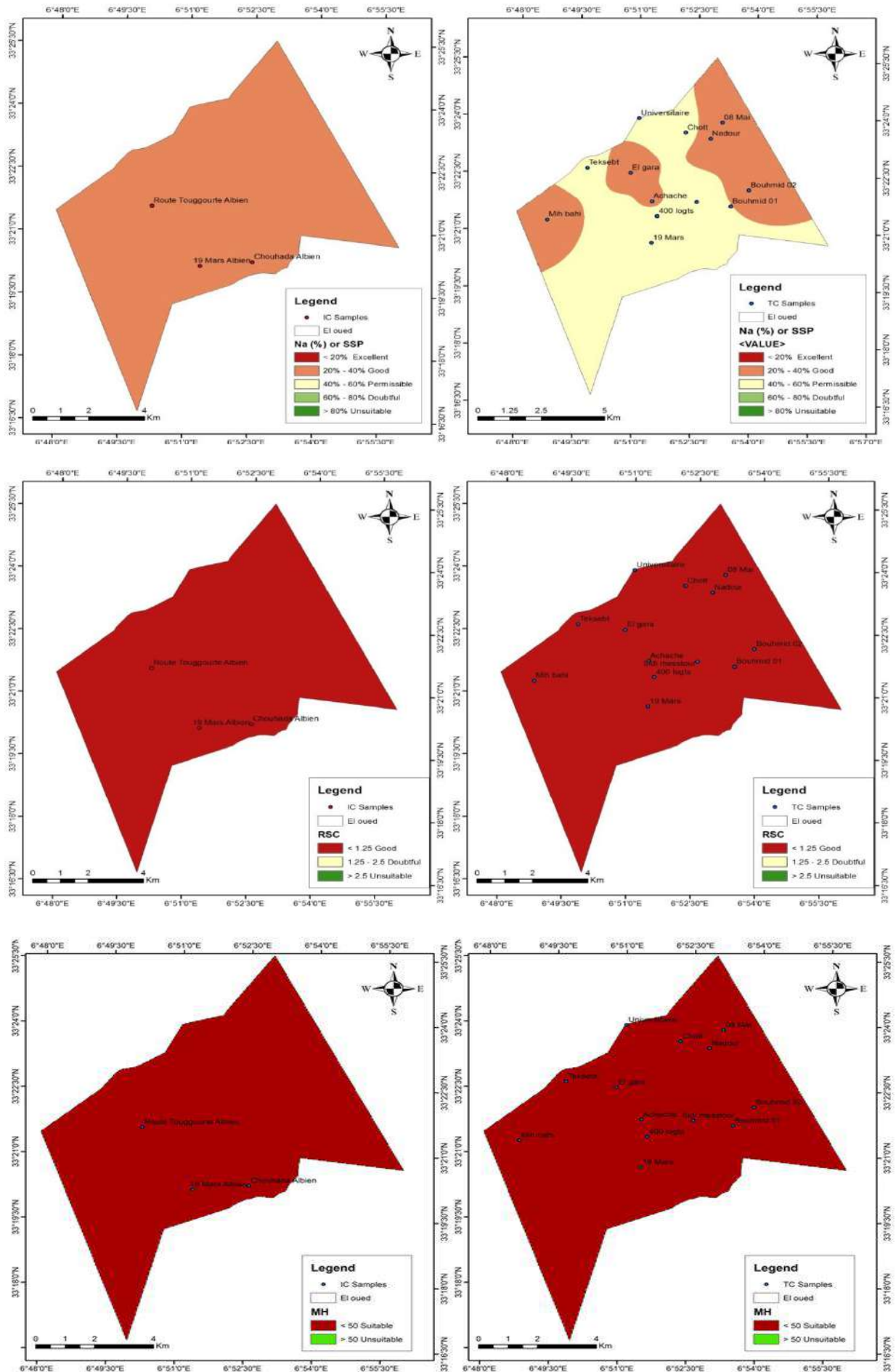


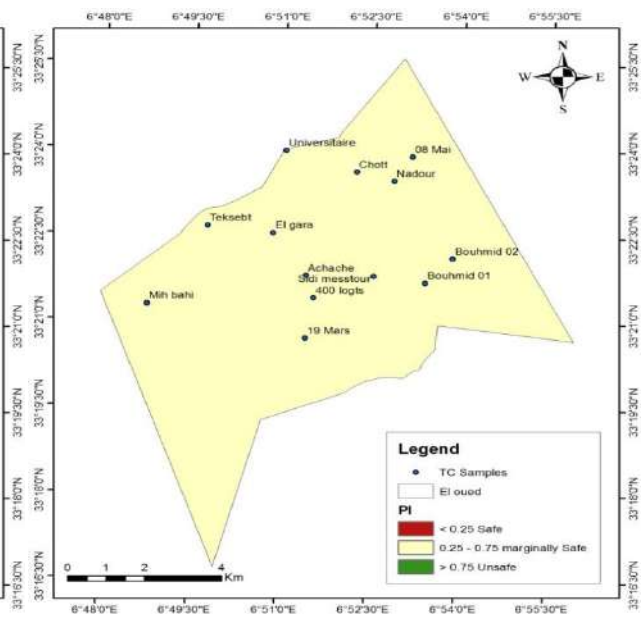
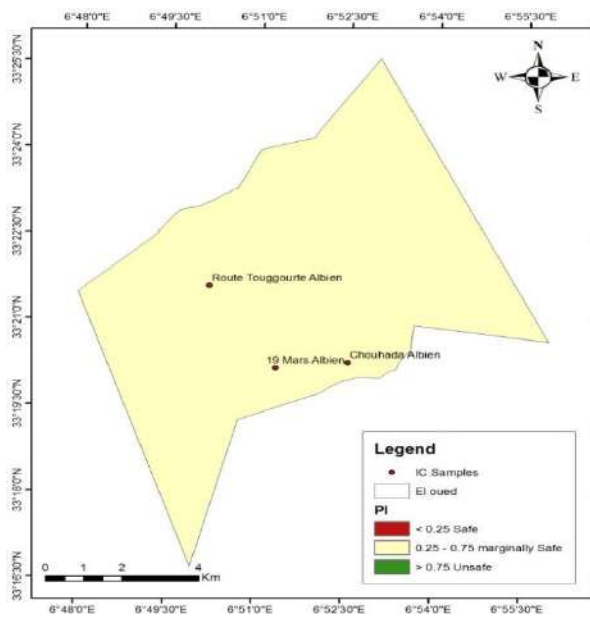
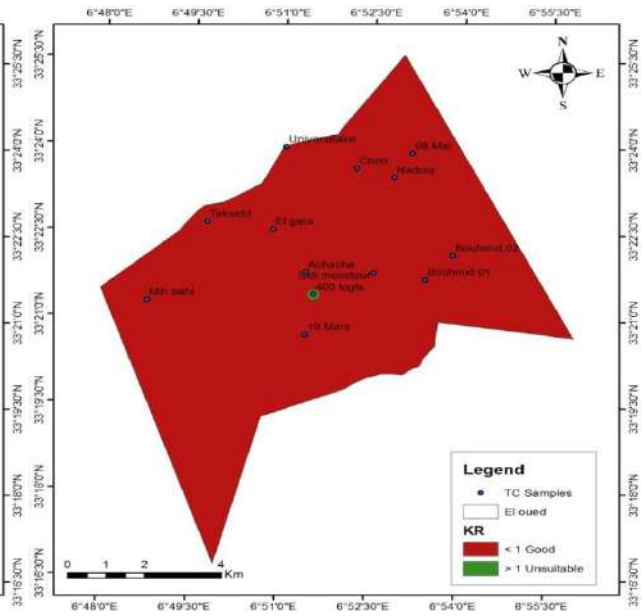
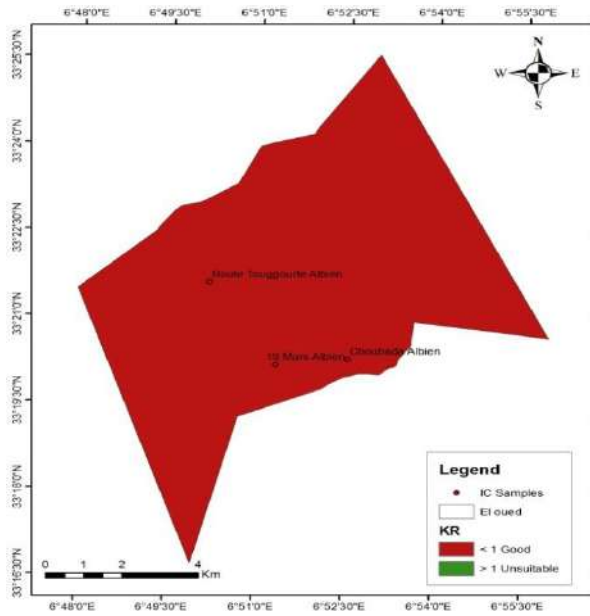
Figure IV.6. Des paramètres physicochimiques dans la zone d'étude.

La figure IV.7 présente la distribution spatiale des indicateurs de la viabilité de l'eau pour l'irrigation dans d'El-Oued. SAR montre la présence de sodium faible $SAR < 10$ dans la couche intercalaire continentale et le terminal complexe, tous les échantillons classés à la catégorie excellent (Faible teneur en sodium). La distribution spatiale du Na% montre que les eaux souterraines de bonne qualité pour l'irrigation sont distribuées dans toute la zone d'étude dans la couche intermédiaire continentale, et montre que l'ensemble de la zone d'étude dans la couche terminale complexe présente une qualité d'eau souterraine qualifiée de bonne pour l'irrigation. La carte de distribution spatiale du RSC montre que les eaux souterraines sont de bonne qualité pour l'irrigation à la fois dans la couche intermédiaire continentale et dans la couche terminale complexe.

Le $RSC < 1.25$ indique l'absence des effets dangereux dans la zone d'El-Oued et favorable pour des activités agricoles. La carte de distribution spatiale montre la variation de la distribution des valeurs MH des eaux souterraines dans les deux couches. Il s'agit d'une eau de bonne qualité pour les pratiques agricoles. La valeur maximale est observée pour les forages gara, rout tourourt et 19 mars dans la région d'El-Oued classés comme inadéquats. La carte de distribution spatiale du KI montre que les eaux souterraines sont de bonne qualité pour l'irrigation dans la couche intermédiaire continentale et dans la couche terminale complexe. La distribution spatiale de PI a montré que les eaux souterraines marginalement sûres pour l'irrigation étaient réparties dans toute la zone d'étude, dans la couche intermédiaire continentale et dans la couche terminale complexe. La carte de distribution spatiale de l'IWQI montre que les eaux souterraines de toute la zone d'étude sont classées comme ayant des restrictions sévères (SR) pour l'irrigation, dans la couche intercalaire continentale et la couche terminale complexe, et qu'elles peuvent être utilisées dans des sols à haute perméabilité.







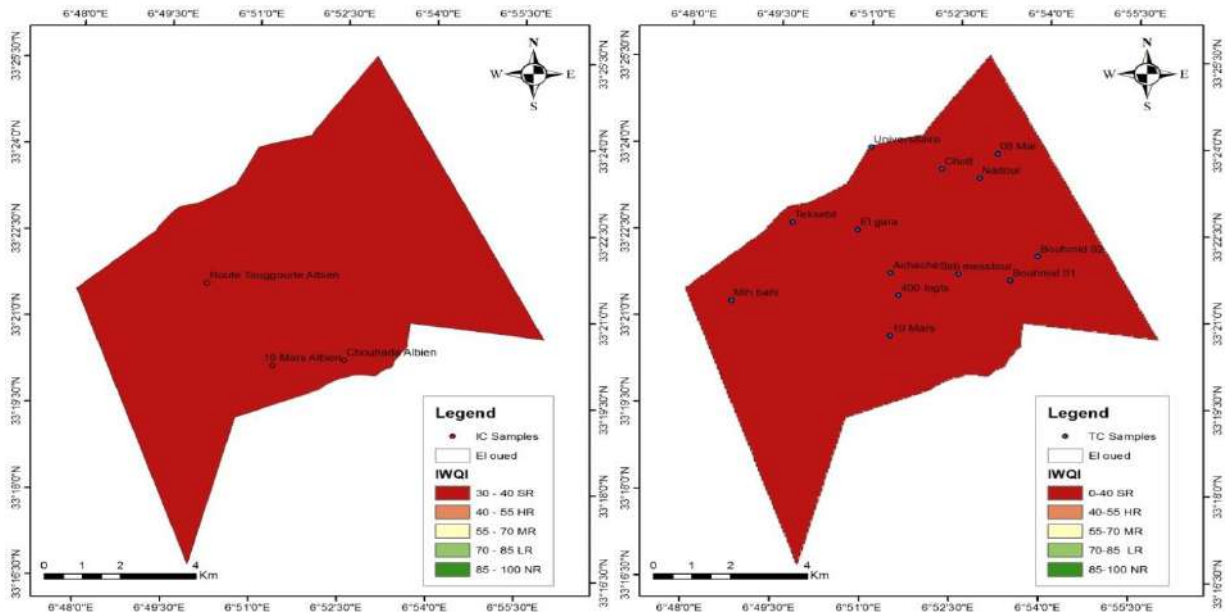


Figure IV.7. Distribution des caractéristiques de l'eau d'irrigation à la région d'El-oued.

IV.8. Analyse bi variée (corrélation des paramètres)

Les relations linéaires entre les 11 paramètres sont évaluées en calculant la matrice de corrélation (Figure IV.8.a), avec le coefficient de corrélation critique $R_c = 0,27$ au seuil de 5%. Les corrélations positives sont représentées en bleu, les corrélations négatives sont représentées en rouge. À droite du corrélogramme, la légende des couleurs indique les coefficients de corrélation et les couleurs correspondantes. Les corrélations non significatives sont indiquées par une croix.

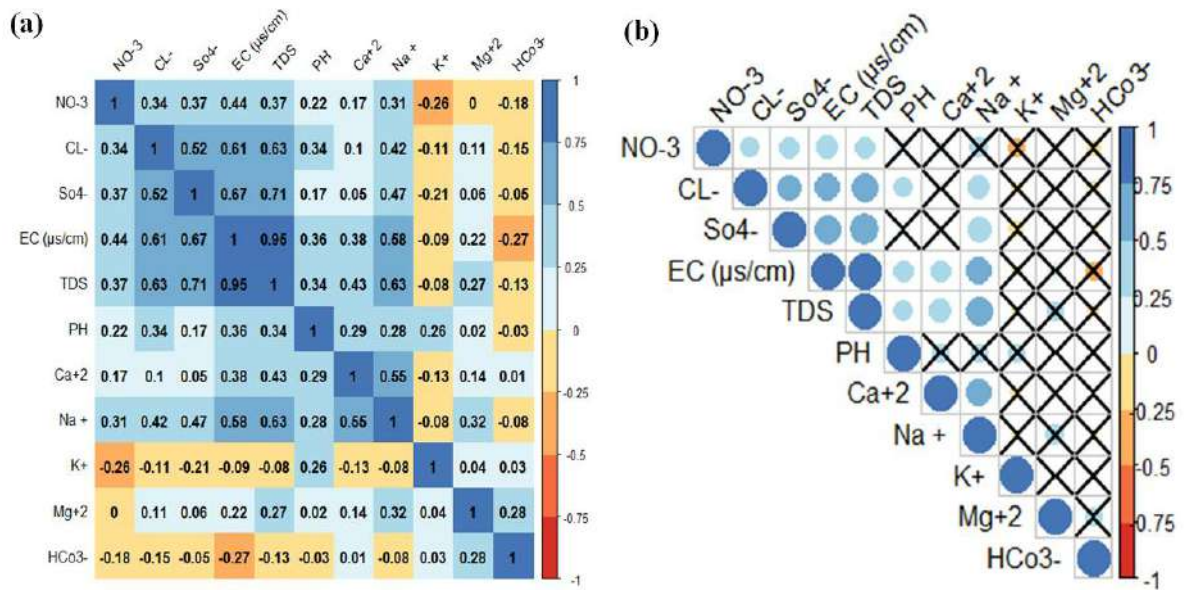


Figure IV.8. (a) matrice de corrélation pour les 11 variables (b) combinaison du corrélogramme et du test de signification.

Plusieurs corrélations significatives ont pu être identifiées (Figure IV.8.b), la corrélation entre NO_3^- avec TDS, Cl^- , SO_4^{2-} et CE, Na^+ avec Ca^{2+} , TDS, CE et Cl^- . Elles donnent les coefficients de corrélations suivantes : TDS& CE (0,95), Na^+ &TDS (0,63), Na^+ & CE (0,58), TDS& SO_4^{2-} (0,71), TDS& Cl^- (0,63),...ex. Ceci montre le rôle important et significatif que jouent ces éléments dans la détermination de la charge saline de ces eaux.

IV.9. Composantes principales et analyse en grappes

Les techniques environnementales s'appuient sur divers modèles statistiques pour mieux interpréter la qualité des données. Les modèles statistiques multivariés couramment utilisés pour l'analyse des données environnementales comprennent l'analyse en grappes (CA), l'analyse en composantes principales (ACP), l'analyse factorielle (FA) et l'analyse discriminante (DA). Ces techniques d'extraction de données sont très utiles pour la reconnaissance des formes et l'analyse exploratoire des données, et révèlent également des informations cachées sur l'ensemble des données.

L'analyse en composantes principales (ACP) est l'une des techniques les plus utilisées pour trouver des informations dans de grands ensembles de données (variables). L'ACP visualise les variables dans un espace à deux ou trois dimensions afin d'identifier des groupes d'observations homogènes ou, au contraire, atypiques. En outre, le nombre de variables peut être réduit sans perte d'information (Fartas et al., 2022).

L'analyse en grappes est un groupe de techniques multi-variées dont l'objectif principal est d'assembler des objets en fonction des caractéristiques qu'ils possèdent. Le clustering regroupe les observations les plus similaires.

IV.9.1. Analyse en composantes principales

Les données sont projetées sur des axes indépendants appelés CP, le nombre d'axes étant choisi en fonction de la quantité minimale d'information requise. Quatre facteurs (F) ont été retenus dans l'analyse ACP avec une valeur Eigen supérieure à 1 selon la règle de Kaiser. F1 explique 59,86 % de la variabilité de l'ensemble des données, tandis que les facteurs dans leur ensemble expliquent 72,74 % de la variance totale. Le tableau IV.7 présente les scores des quatre facteurs extraits. Une corrélation supérieure à 0,75 est considérée comme "forte", une corrélation comprise entre 0,75 et 0,50 comme "modérée" et une corrélation comprise entre 0,50 et 0,30 comme "faible". Une valeur proche de 1 indique une forte corrélation entre le facteur et les variables.

Table IV.7. Matrice des Composantes Principales.

	F1	F2	F3	F4
pH	0.453	0.248	0.616	0.082
CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	0.918	-0.058	0.068	-0.074
TDS	0.932	0.058	-0.002	-0.110
Ca^{+2}	0.485	0.382	-0.060	0.719
Mg^{+2}	0.260	0.652	-0.356	-0.245
Na^{+}	0.760	0.265	-0.099	0.225
K^{+}	-0.168	0.431	0.734	-0.261
Cl^{-}	0.718	-0.165	0.099	-0.310
SO_4^{-}	0.736	-0.230	-0.159	-0.380
HCO_3^{-}	-0.192	0.599	-0.395	-0.275
NO_3^{-}	0.546	-0.356	-0.091	0.153

L'analyse des plans factoriels F1 et F2 montre que 51,63% de l'information est exprimée (Figure IV.9.a). Le plan F1, avec 38,34% de la variance, exprime un axe caractérisant la minéralisation de l'eau par lessivage des formations géologiques. Le TDS, la CE et le Na, qui sont fortement corrélés entre eux et positivement avec F1, puisqu'ils définissent des vecteurs propres de même direction, le déterminent. Les résultats ont montré que le TDS et la CE étaient les principaux paramètres distinctifs de F1. Ils sont modérément corrélés avec SO_4^{2-} , Cl^{-} et NO_3^{-} . F1 montre une dissociation du nitrate des autres éléments chimiques présents dans les eaux souterraines, ce qui indique une source anthropogénique.

Le facteur F2 ne représente que 13,29% de l'information et est considéré comme un axe caractérisant la présentation du magnésium, déterminée par Mg^{2+} et HCO_3^{-} (Figure IV.9.a). D'autres variables telles que pH, K^{+} et Ca^{2+} sont proches du centre du plan factoriel, et leur corrélation n'est certainement pas très forte. Ces variables sont probablement mieux expliquées par d'autres composantes principales, autres que CP1 et CP2.

La source de Ca^{2+} , Mg^{2+} et K^{+} peut être due à des sources anthropogéniques, telles que la qualité de l'eau d'irrigation, les déchets domestiques et la fertilisation non contrôlée. Le SO_4^{2-} provient quant à lui des engrais et des composés sulfatés. La présence de chlorure peut être due à des modifications du sol et à la formation de sel. Ces résultats mettent en évidence la façon dont les activités humaines et les processus d'échange d'ions affectent la qualité des eaux souterraines.

Ces résultats sont comparables à ceux trouvés par Barkat et al (**Barkat et al., 2021**) dans la région d'El-Oued de l'aquifère complexe terminal des eaux souterraines par l'application des méthodes statistiques multivariées et Hakimi et al (**Hakimi et al., 2022**) dans l'aquifère continental intercalaire (CI) sont démontrés à l'aide de données hydrochimiques les effets des interactions

eau/roche et des conditions hydrodynamiques sur les caractéristiques des eaux souterraines et isotopiques provenant de la crête du Mzab.

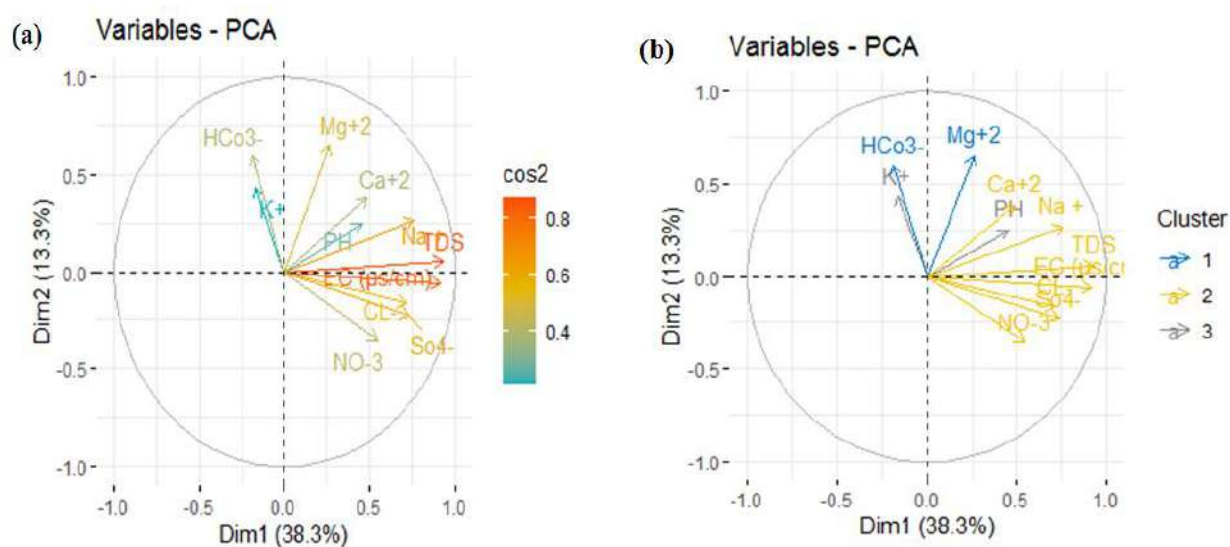


Figure IV.9. (a) Projection des variables sur le plan principal 1-2, (b) Classification en groupes.

IV.9.2. L'analyse par grappes

L'analyse par grappes est un groupe de techniques multi-variées dont l'objectif principal est d'assembler des objets en fonction des caractéristiques qu'ils possèdent. Le clustering regroupe les observations les plus similaires.

D'après la Figure IV.9.b, les paramètres sont divisés en trois groupes : un groupe contient les paramètres minéraux, un deuxième est constitué de tous les paramètres déterminés par CP2, et le troisième comprend le pH et le potassium (K^+).

IV.10. Évaluation de la qualité des eaux brutes des stations de déminéralisation

IV.10.1. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux brutes

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux montrent qu'il existe une importante évolution dans la concentration des éléments chimiques de l'eau. Les résultats obtenus ont été comparés avec les normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et les normes algériennes (NA) d'eau potable afin d'étudier la qualité de l'eau brute. Les valeurs d'analyse physico-chimique de l'eau brute dans le tableau IV.8. A noter que l'eau qui alimente la station provient de la nappe souterraine de l'Albien, qui est réputée très profonde et protégée de la contamination, aucune propriété biologique n'a donc été mesurée.

Tableau IV.8. Les valeurs des analyses physico-chimiques de l'eau brute.

Paramètre	Les eaux brutes provenant d'une couche Continental Intercalaire (CI) à trois stations			NA (2011)	OMS
	El-oued	Touggourt	Ouargla		
pH	7.05	7.6	8.15	6.5-9	6.5-8.5
CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2790	2990	2149	2800	1500
TDS (mg/l)	1786	1985	1070	/	500-1500
TH (mg/l CaCO ₃)	740	1100	700	200	100-500
Ca ²⁺ (mg/l)	188.37	140.8	140.28	200	75-200
Mg ²⁺ (mg/l)	65.62	95.92	85.06	150	50-150
Na ⁺ (mg/l)	411	376.31	200	200	200
K ⁺ (mg/l)	32.47	31	14	12	12
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	950	760	380	400	250-600
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	151.28	174.46	102.03	/	500-600
Cl ⁻ (mg/l)	475.07	1410	414.45	500	250-600
NO ₃ ⁻ (mg/l)	1.61	0.5	8.4	0-50	0-50

IV.10.2. Interprétation des résultats

Suite aux résultats obtenus dans le tableau IV.8, on constate que :

IV.10.2.1. La conductivité électrique

La conductivité électrique peut être utilisée pour évaluer la capacité d'une solution aqueuse à transporter par le courant électrique. Ce terme est réciproquement proportionnel à la résistivité électrique. L'unité de mesure couramment utilisée est le Siemens (S/cm), souvent exposé en microsiemens/cm ($\mu\text{S}/\text{cm}$) ou en millisiemens (mS/cm). La conductivité est immédiatement corrélative à la quantité de solides dissous dans l'eau (sels minéraux, pas matières organiques). Par conséquent, plus la concentration de solides dissous est élevée, plus la conductivité est élevée.

Les résultats obtenus montrent que les concentrations de conductivité électrique des eaux brutes des stations de déminéralisation d'El-Oued et d'Ouargla correspondent à la norme algérienne avec une valeur de 2790 et 2149 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement. De plus, la valeur de la station de Touggourt a dépassé la norme algérienne avec une valeur de 2990 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Au contraire, trois stations d'El-Oued, de

Touggourt et d'Ouargla ont des valeurs dépassant la norme OMS. La figure IV.10 représente l'évolution de la conductivité électrique des échantillons des stations étudiées.

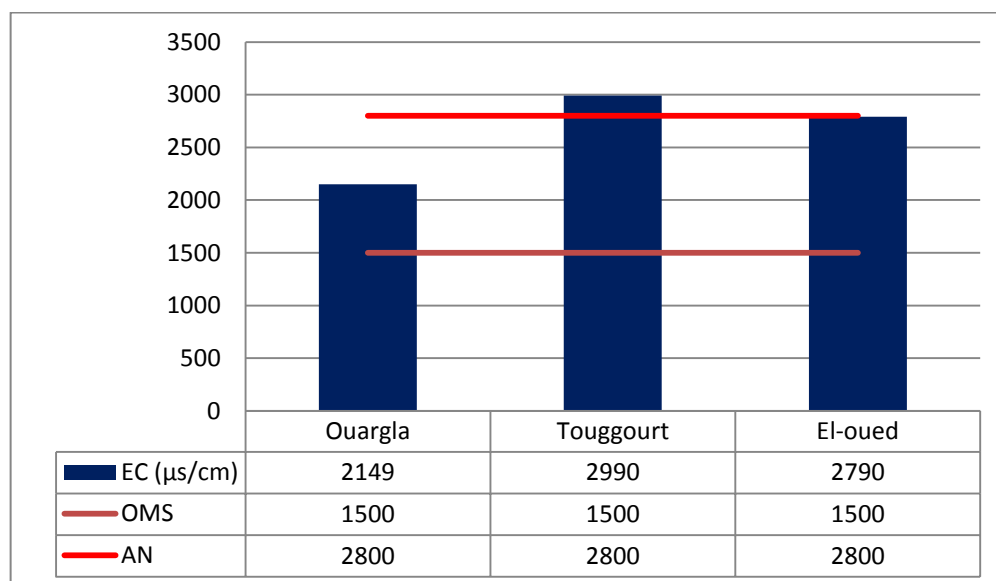


Figure IV.10. Les valeurs de la conductivité électrique de l'eau brute avec NA et OMS.

IV.10.2.2. Potentiel hydrogène (pH)

Le pH est utilisé pour évaluer la concentration d'ions hydrogène dans une solution. Cette mesure stoechiométrique présente le degré d'acidité ou la base d'une solution aqueuse. Plus l'acidité de la solution est élevée, plus le pH est faible et vice versa sur l'échelle de 0 à 14. La figure IV.11 montre la variation du pH pour le prélèvement d'eau brute des stations étudiées. Les trois stations contiennent des valeurs de pH conformes aux normes algériennes et OMS avec des valeurs minimales de 7,05 et maximales de 8,15.

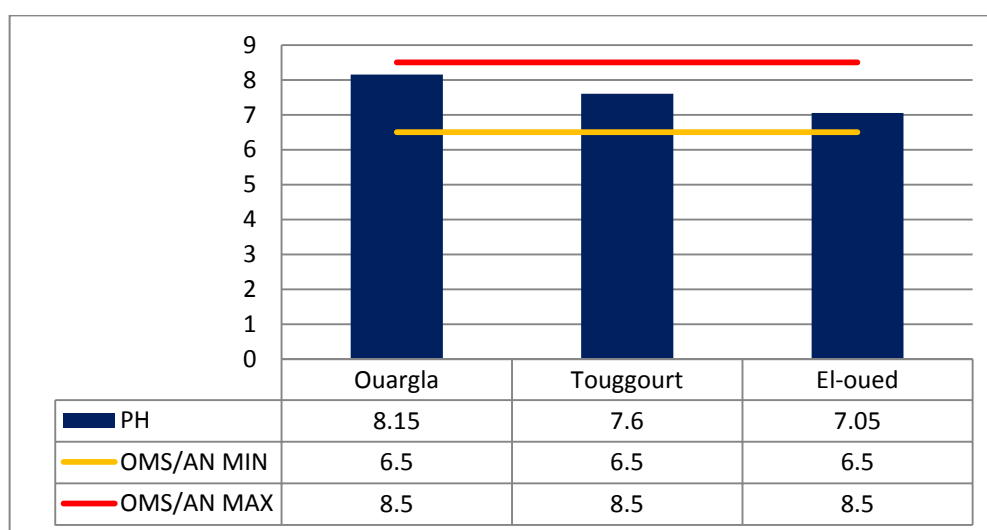


Figure IV.11. Variation de Potentiel hydrogène des eaux brutes.

IV.10.2.3. Dureté totale (TH)

La dureté de l'eau reflète la valeur totale en ions Ca^{2+} et Mg^{2+} . Elle est exprimée en ppm m/V (ou mg/L) de $CaCO_3$, et en degrés français ou en méq/l.

Les teneurs de la TH de l'eau brute des stations d'El-Oued, de Touggourt et d'Ouargla correspondent à 740, 1100 et 700 mg/l respectivement. Les valeurs de TH dépassant les normes algériennes et les valeurs maximales acceptées par l'OMS. La figure IV.12 indique la variation de la TH des eaux des stations étudiées.

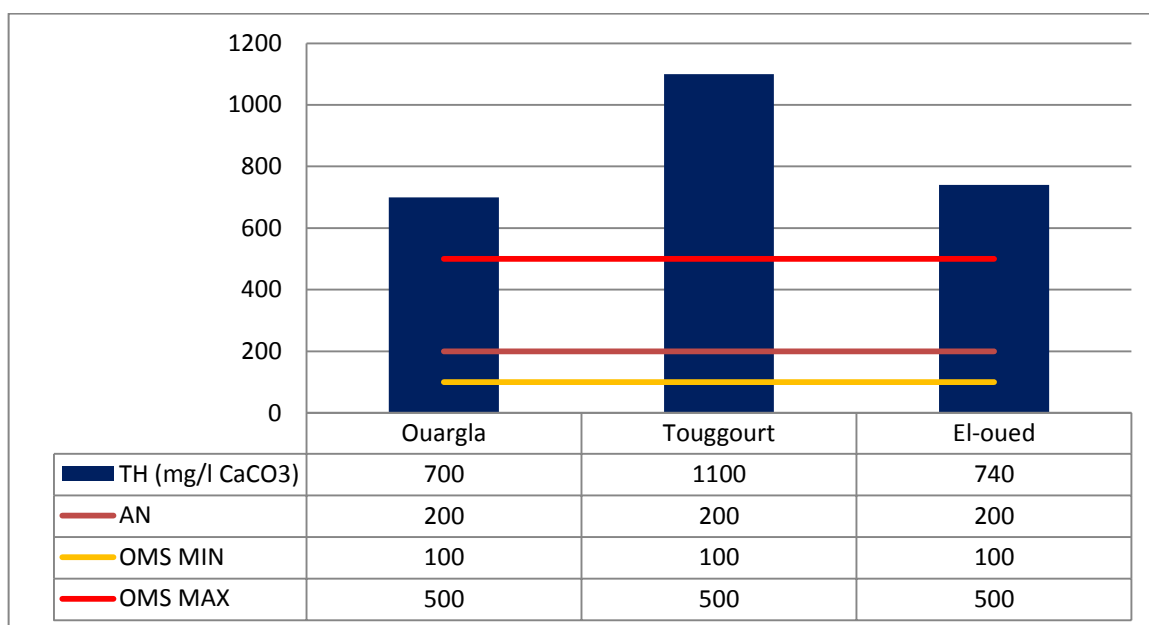


Figure IV.12. Variation de la dureté totale des eaux brutes.

IV.10.2.4. Les sels dissous totaux (TDS)

Les valeurs de TDS de l'eau brute dans les stations de déminéralisation d'El-Oued et de Touggourt dépassent la norme de l'OMS avec 1786 et 1985 mg/l respectivement. Alors que la station d'Ouargla répond à la norme de l'OMS avec une valeur de 1070 mg/l. La figure IV.13 montre la variation de TDS pour les échantillons des stations étudiées.

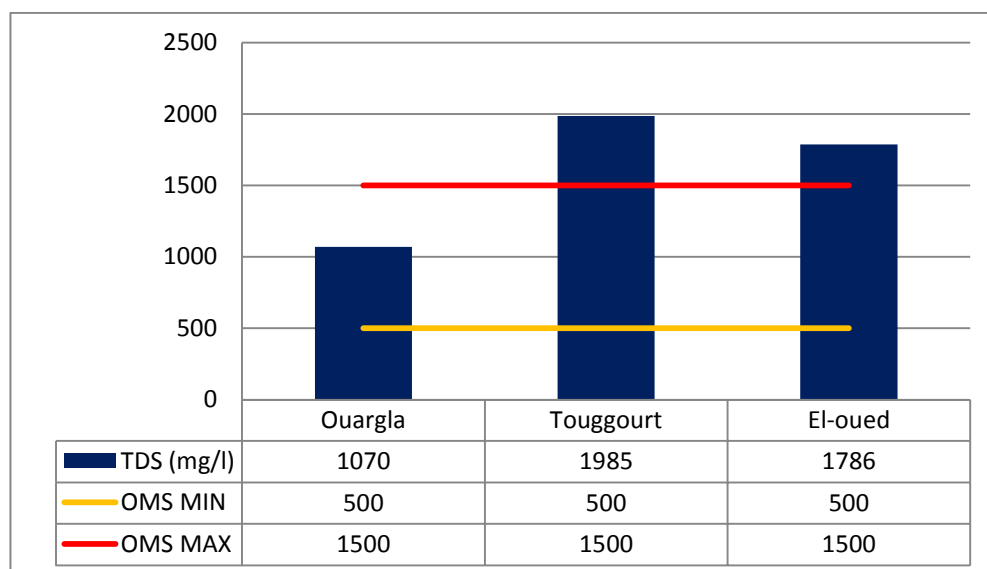


Figure IV.13. Variation des sels dissous totaux des eaux brutes.

IV.10.2.5. Cations/Anions

Les résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau brute de la station d'El Oued montrent la présence de Ca^{2+} , de Mg^{2+} , de Cl^- et de bicarbonates dans des limites acceptables selon les normes algériens et selon l'OMS. En revanche, toutes les valeurs de sodium, de potassium et de sulfate ont dépassé les teneurs maximales autorisées pour tous les échantillons d'eau brute.

L'analyse de l'eau brute de la station de Touggourt a révélé l'existence de Ca^{2+} , de Mg^{2+} et de HCO_3^- dans l'eau à des niveaux acceptables par les normes algériennes et l'OMS. Les concentrations de sodium, de potassium, de chlorure et de sulfate ont été détectées avec de hautes valeurs de 376,31 mg/l, 31 mg/l, 1410 mg/l ou 760 mg/l, respectivement.

Selon les résultats d'analyse, du calcium, du magnésium, du sodium, du chlorure, du sulfate et du bicarbonate de l'eau brute de la station d'Ouargla sont présents dans l'eau selon les normes algériennes et l'OMS. En revanche, les valeurs de potassium dépassaient le maximum autorisé dans les échantillons d'eau brute.

La variation des cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ est illustrée dans les figures IV. 14, 15, 16 et 17, respectivement. La variation dans les anions Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^- est illustrée dans les figures IV. 18, 19, 20, respectivement.

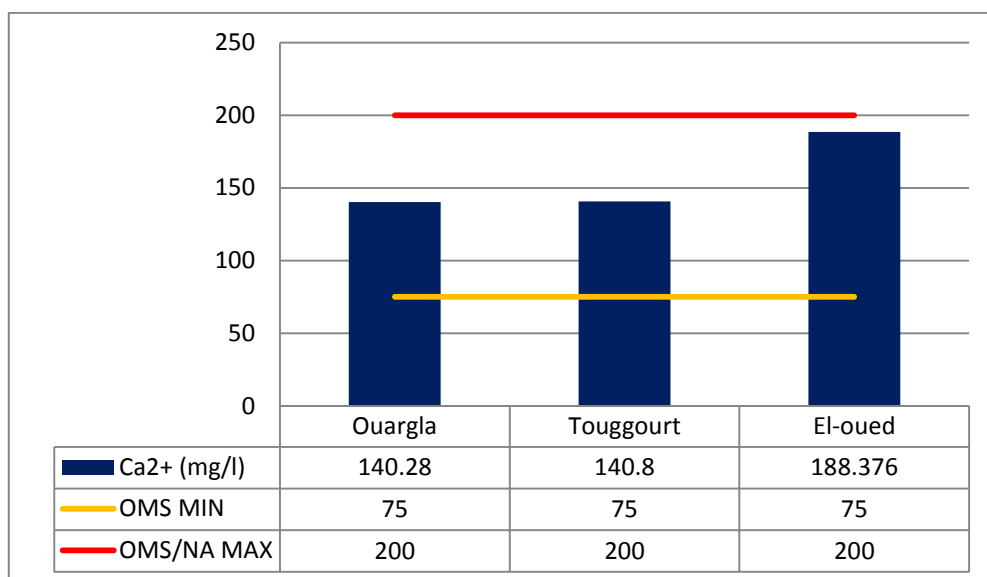


Figure IV.14. Les valeurs de calcium des eaux brutes.

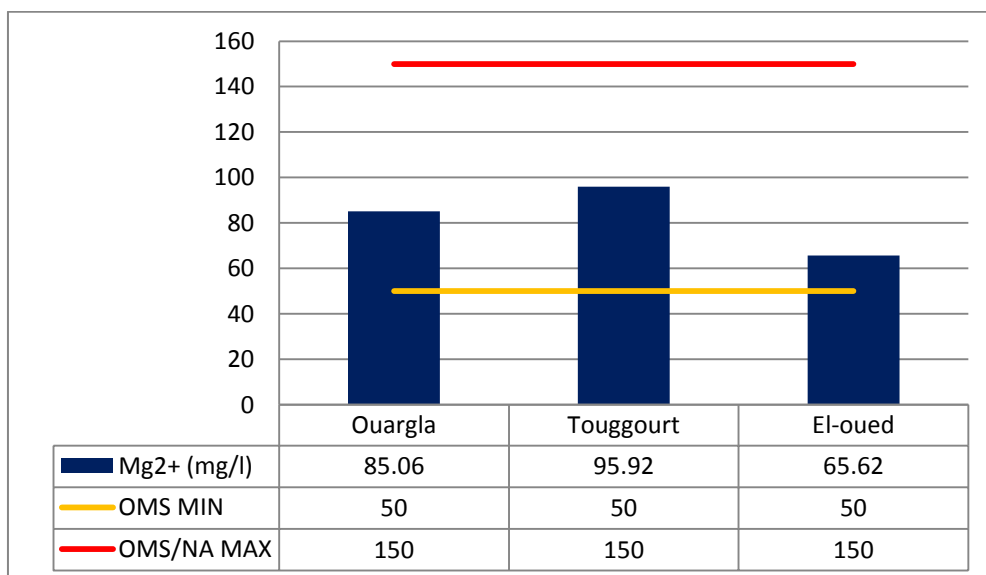


Figure IV.15. Les valeurs de magnésium des eaux brutes.

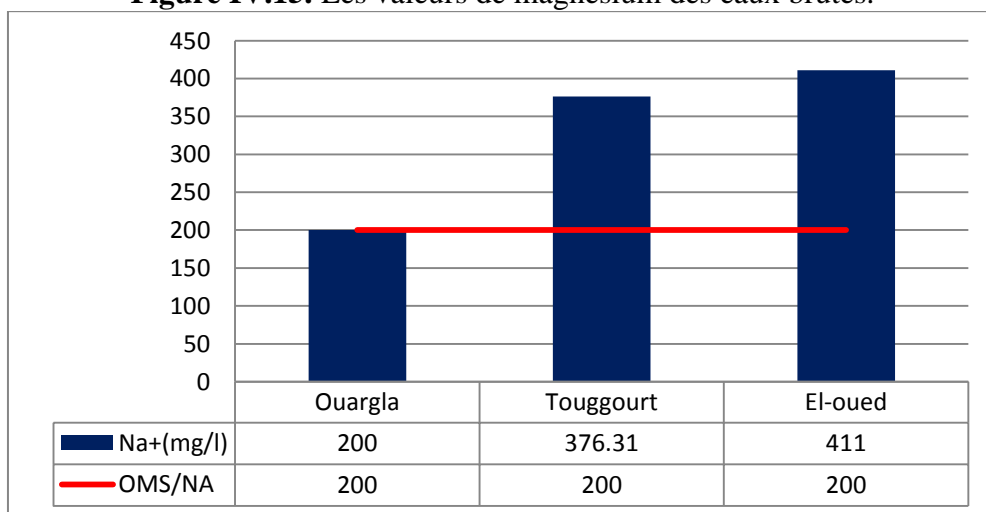


Figure IV.16. Les valeurs de sodium des eaux brutes.

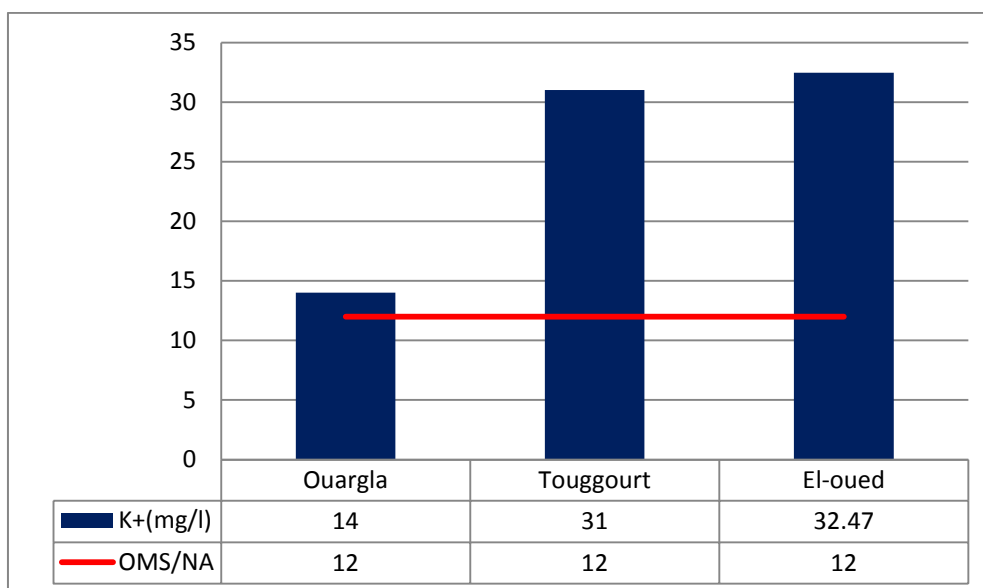


Figure IV.17. Les valeurs de potassium des eaux brutes.

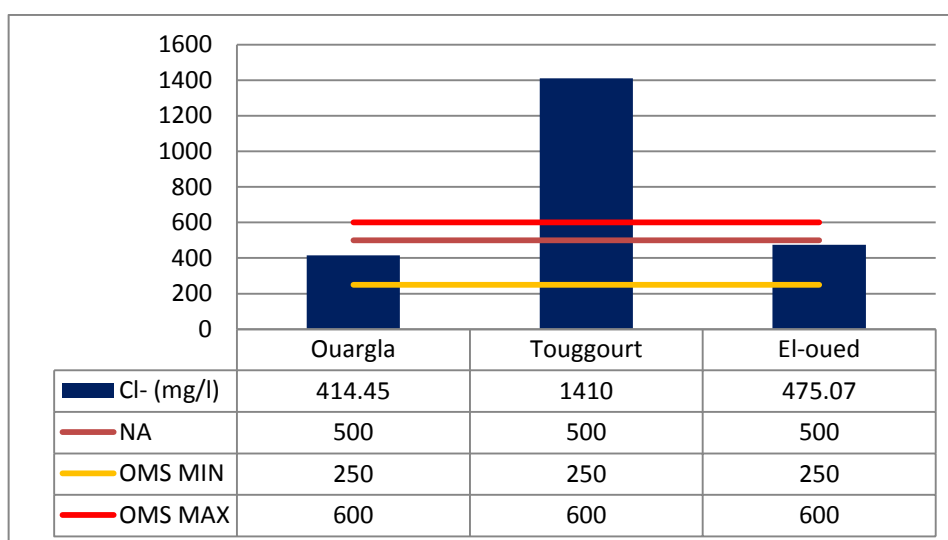


Figure IV.18. Les valeurs de chlorure des eaux brutes.

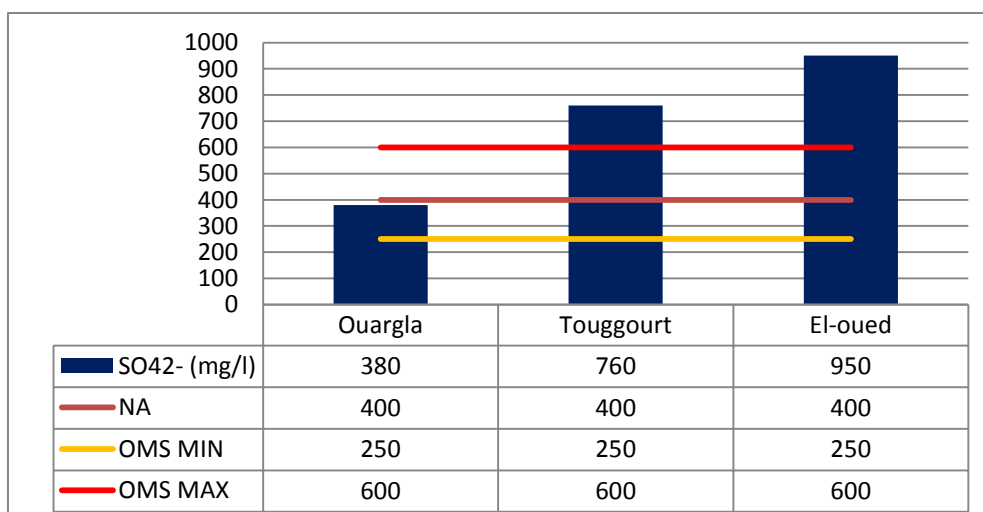


Figure IV.19. Les valeurs de sulfate des eaux brutes.

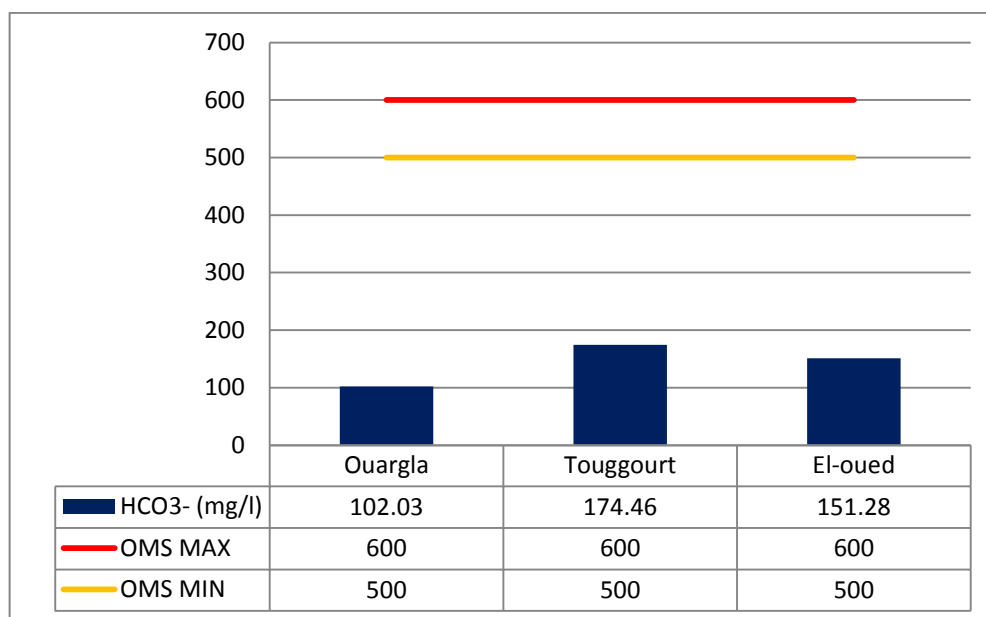


Figure IV.20. Les valeurs de bicarbonates des eaux brutes.

IV.10.2.6. Les nitrates (NO₃⁻)

Les résultats d'analyse de l'eau brute de trois stations ont montré la présence de NO₃⁻ dans l'eau à des niveaux acceptables selon les NA et l'OMS. La faible concentration de nitrates est due à l'aquifère très profond (albein) et au manque de polluants tels que les engrais chimiques pour les activités agricoles. Le NO₃⁻ est généralement considéré comme un anion mineur dans l'eau non polluée et sa concentration élevée indique une surutilisation d'engrais ou d'engrais minéraux dans l'agriculture (Nemčić-Jurec & Jazbec 2017). Variation du nitrate dans différents échantillons est présentée dans la figure IV.21.

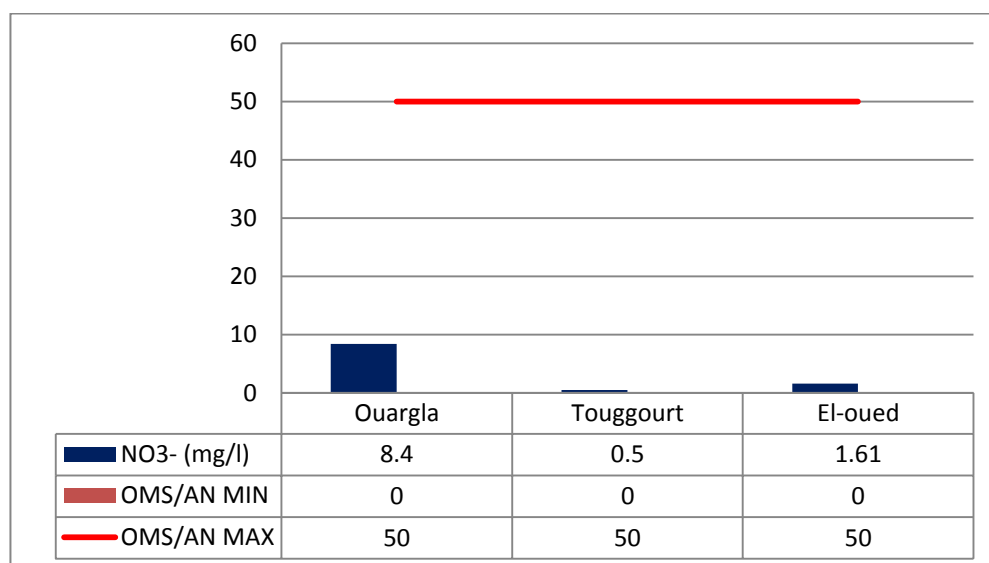


Figure IV.21. Variation de nitrates des eaux brutes.

IV.10.3. Faciès chimiques des eaux

Les échantillons d'eau sont généralement conformes aux directives. Il n'y a pas de cations prédominantes dans les échantillons des stations : d'El-Oued, d'Ouargla et de Touggourt. L'ordre décroissant des cations de l'aquifère albien pour les stations étudiées est : $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ aux stations d'El-Oued, d'Ouargla et de Touggourt. D'autre part, l'ordre décroissant des anions est : $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ pour la station d'El-Oued et $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ pour la station de Touggourt et d'Ouargla. Afin de comprendre la qualité des eaux souterraines et les voies de développement géochimique potentielles, les données chimiques pour les principaux ions sont présentées dans les diagrammes de Piper qui consistent à définir trois champs comme suit:

Premièrement, un champ central en forme de losange et deuxièmement deux champs triangulaires (cations et anions). En déposant les indicateurs dans les champs triples, les propriétés générales de l'eau sont affichées dans le champ central.

Le diagramme du traceur Piper (Figure IV.22) indique que le faciès hydrochimique des eaux souterraines de la nappe d'Albian de la station d'Ouargla est formé de : $\text{Cl}^- \text{SO}_4^{2-} \text{Ca}^{2+} \text{Mg}^{2+}$, et le faciès hydrochimique de la nappe d'albienne des stations d'El-Oued et de Touggourt est de : $\text{Cl}^- \text{Na}^+ \text{K}^+$. Catégorie de l'eau constitue la base d'un système commun de classification des eaux naturelles. La cinétique de dissolution, la lithologie et les schémas d'écoulement de l'aquifère contrôlent l'hydrochimie de tout faciès (Nemčić-Jurec et al. 2019).

Dans le triangle anionique, le chlore (Cl) était la classe dominante dans les échantillons. La salinité élevée des échantillons d'eau était due à la concentration élevée d'ions chlorure et calcium. Les échantillons présentaient des faciès $\text{Cl}^- \text{Na}^+$ et $\text{Cl}^- \text{SO}_4$ en raison de l'évaporation, qui était le principal facteur contrôlant la chimie des eaux souterraines. La forte concentration de ces éléments rendait l'eau extrêmement salée et non potable.

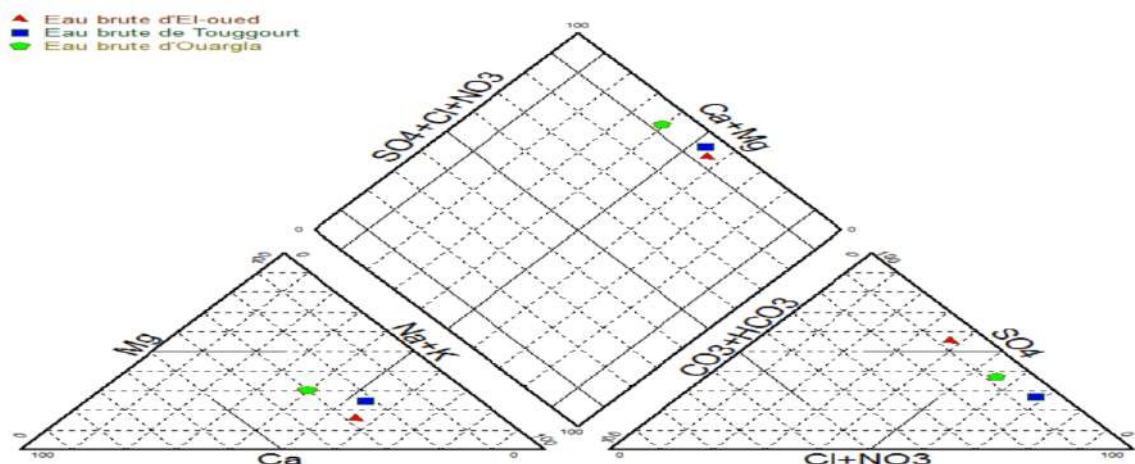


Figure IV.22. Diagramme de Piper montrant les faciès hydrogéochimiques de l'eau brute.

IV.11. Évaluation de la qualité des eaux traitées des stations de déminéralisation

IV.11.1. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux traitées

Les analyses des échantillons prélevés dans les réservoirs traités alimentant en eau les châteaux existants dans la zone d'étude d'El-Oued, d'Ouargla et de Touggourt afin déterminer la qualité physico-chimique. Le tableau IV.9 présente les valeurs d'analyse.

Tableau IV.9. Résultats de l'analyse physico-chimique de l'eau traitée.

Paramètre	Les eaux traitées			NA (2011)	OMS
	El-oued	Touggourt	Ouargla		
pH	7.22	7	8.37	6.5-9	6.5-8.5
CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	1059	654	539	2800	1500
TDS (mg/l)	678	431	269	/	500-1500
TH (mg/l CaCO_3)	340	200	120	200	100-500
Ca^{2+} (mg/l)	80.16	32	24.04	200	75-200
Mg^{2+} (mg/l)	34.02	69	14.58	150	50-150
Na^+ (mg/l)	147	135	59	200	200
K^+ (mg/l)	13	11	4	12	12
SO_4^{2-} (mg/l)	290.3	127	69	400	250-600
HCO_3^- (mg/l)	48.8	61	34.16	/	500-600
Cl^- (mg/l)	233.98	535	103.61	500	250-600
NO_3^- (mg/l)	1.35	0.25	6	0-50	0-50

IV.11.2. Interprétation des résultats

Interprétation des résultats selon le tableau IV.9:

IV.11.2.1. La conductivité électrique

Les résultats montrent que les valeurs de CE de l'eau traitée des stations de déminéralisation d'El-Oued, de Touggourt et d'Ouargla selon les normes algériennes et OMS sont 1059, 654 et 539 $\mu\text{s}/\text{cm}$ respectivement. La figure IV.23 montre la variation de la CE des échantillons étudiés.

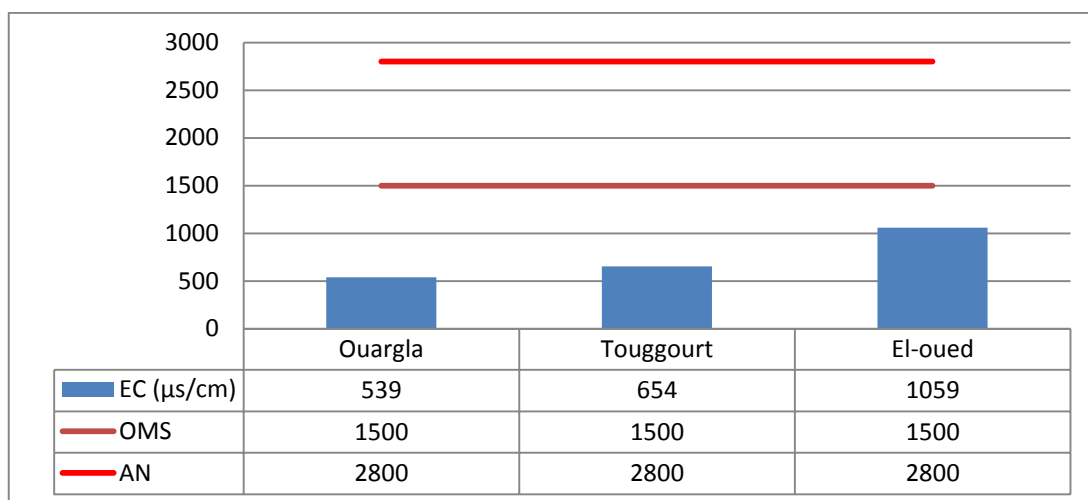


Figure IV.23. Variation de la CE de l'eau traitée.

IV.11.2.2. Potentiel hydrogène (pH)

La figure IV.24 montre la variation du pH des échantillons d'eau traitée des stations étudiées. Les trois stations donnent des valeurs de potentiel hydrogène selon les normes algériennes et OMS, avec un minimum de 7 et un maximum de 8,37.

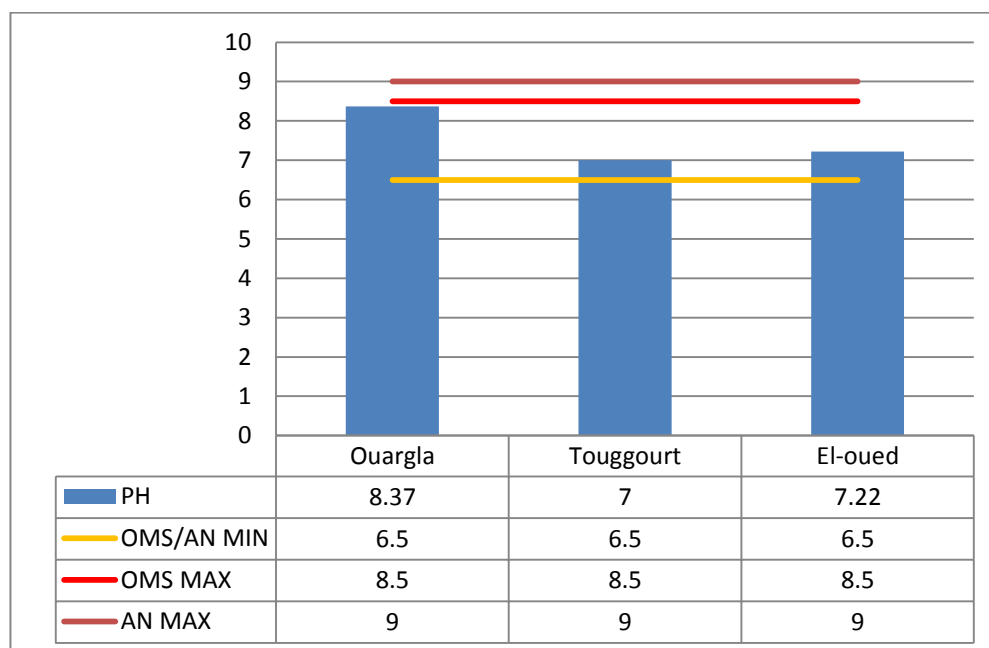


Figure IV.24. Les valeurs du pH de l'eau traitée.

IV.11.2.3. La dureté total (TH)

Les résultats montrent que les valeurs de TH de l'eau traitée des stations de déminéralisation d'El-Oued, Touggourt et Ouargla selon les normes de l'OMS 340, 200 et 120 mg/l respectivement. Les valeurs indiquent que les stations de déminéralisation de Touggourt et d'Ouargla ont des valeurs

conformes aux normes algériennes. La station d'El-Oued dépasse les valeurs maximales acceptées par les normes algériennes. La figure IV.25 montre la variation de la TH des échantillons des stations étudiées.

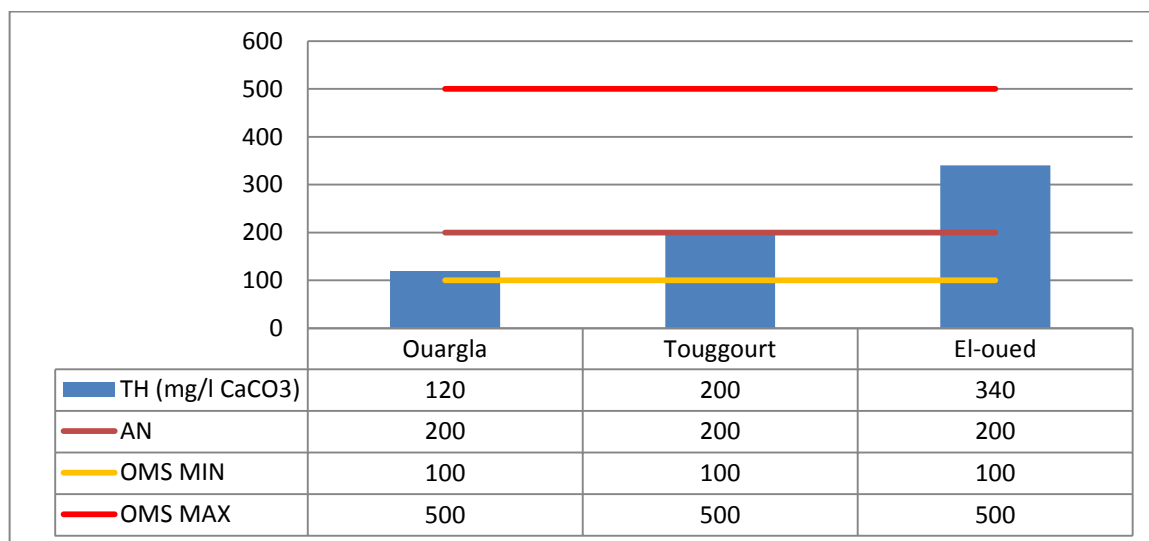


Figure IV.25. Variation de la TH de l'eau traitée.

IV.11.2.4. Les sels dissous totaux (TDS)

Les résultats montrent que la valeur de TDS de l'eau traitée de la station d'El-Oued est conforme aux normes de l'OMS avec une valeur de 678 mg/l. En revanche, la TDS de la station de Touggourt est de 431 mg/L ce qui est inférieur à la norme, et la TDS de la station d'Ouargla est de 269 mg/L, ce qui est inférieur à la norme. La figure IV.26 montre la variation TDS des échantillons d'eau traitée.

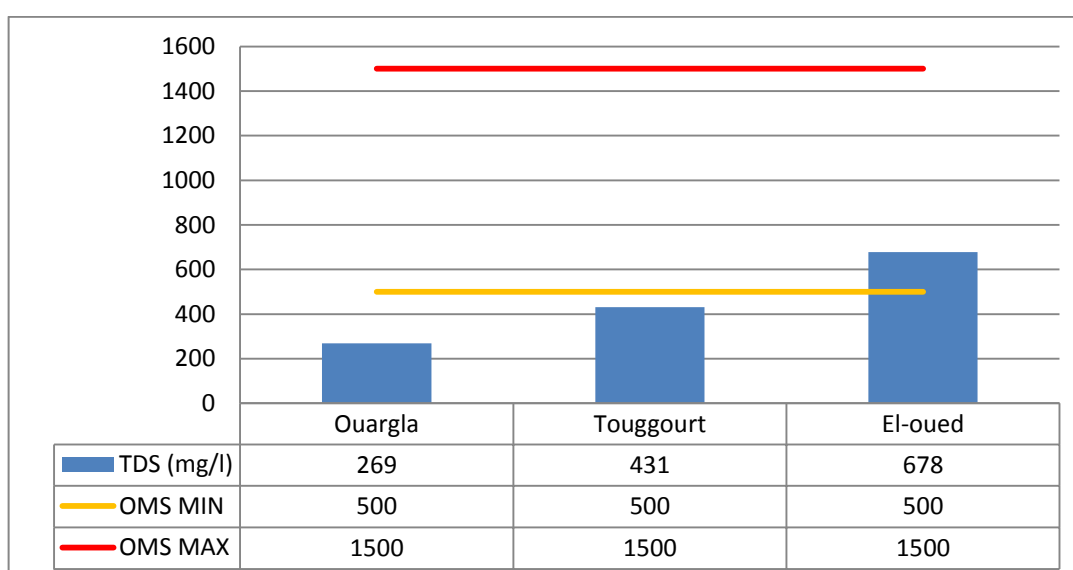


Figure IV.26. Variation des sels dissous totaux de l'eau traitée.

IV.11.2.5. Cations/Anions

L'analyse de l'eau traitée de la station d'El-Oued montre que le calcium, le sodium et le sulfate (SO_4^{2-}) sont présents dans l'eau à des niveaux acceptables conformément aux normes algériennes et l'OMS. En revanche, les taux de magnésium (Mg^{2+}), de chlorure (Cl^-) et de bicarbonate (HCO_3^-) sont en dessous des normes de l'OMS. Les valeurs de potassium (K^+) étaient en revanche supérieurs dépassaient au maximum autorisé dans les échantillons d'eau traitée.

L'étude physico-chimique de l'eau traitée de la station de Touggourt a mis en évidence que les niveaux de Mg^{2+} , K^+ , Na^+ et Cl^- dans l'eau étaient conformes aux normes algériennes et de l'OMS. Les niveaux de calcium, de sulfate et de bicarbonate sont en revanche inférieurs aux normes. Il a été observé que la quantité de chlorure dépassait les normes algériennes.

Les analyses de l'eau traitée de la station d'Ouargla ont montré la présence de sodium et de potassium dans l'eau à des niveaux acceptables selon le NA et l'OMS. En revanche, les niveaux de Ca^{2+} , de Mg^{2+} , de chlorure, de sulfate et de bicarbonate sont tous inférieurs aux normes de l'OMS.

La variation des cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ sont illustrés dans les figures IV. 27, 28, 29 et 30, respectivement, et les figures IV. 31, 32 et 33 montre la variation dans les anions Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^- , respectivement.

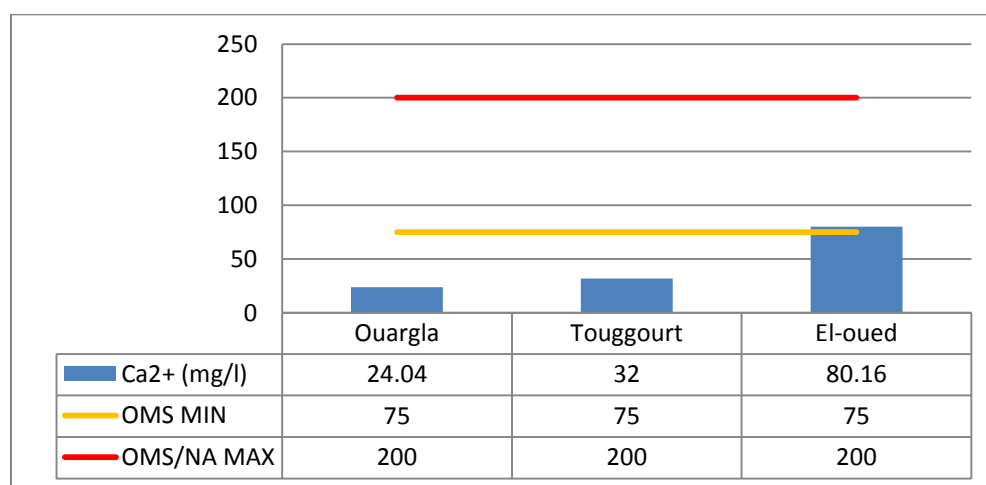


Figure IV.27. Variation du calcium dans l'eau traitée.

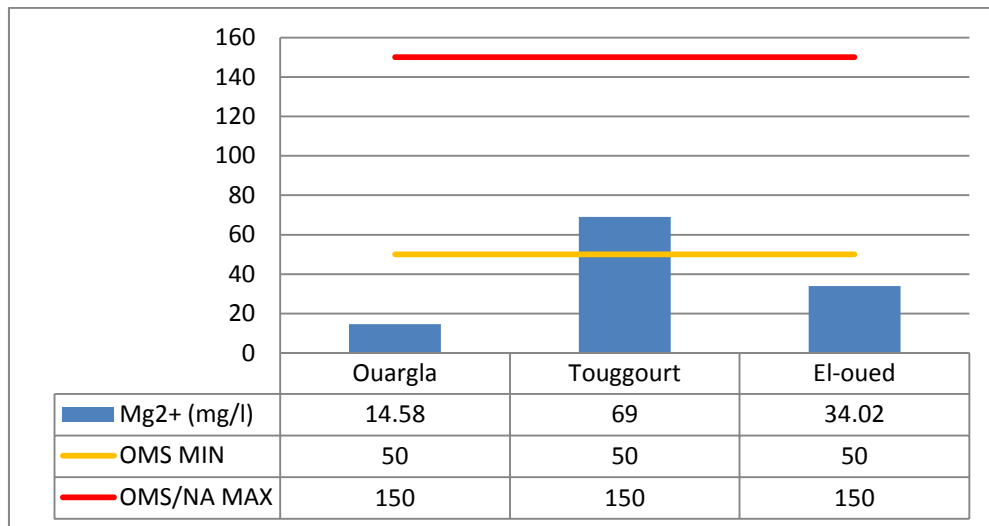


Figure IV.28. Variation du magnésium dans l'eau traitée.

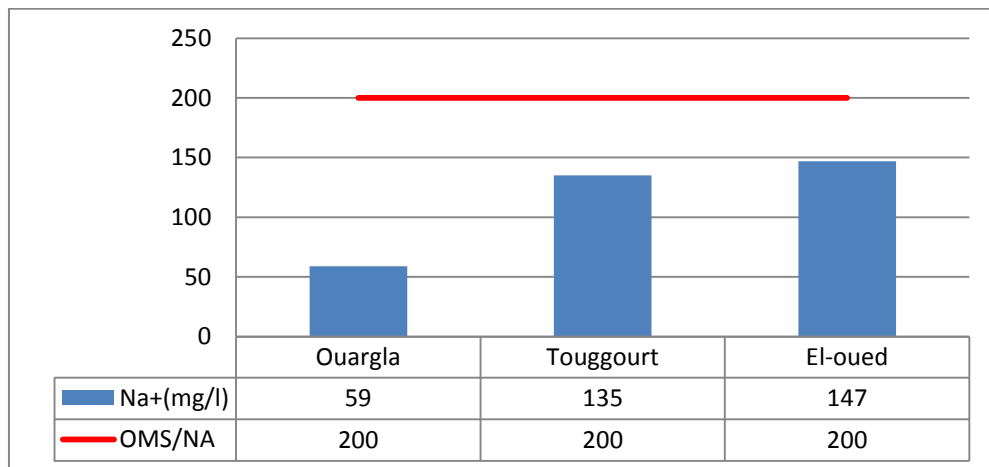


Figure IV.29. Variation du sodium dans l'eau traitée.

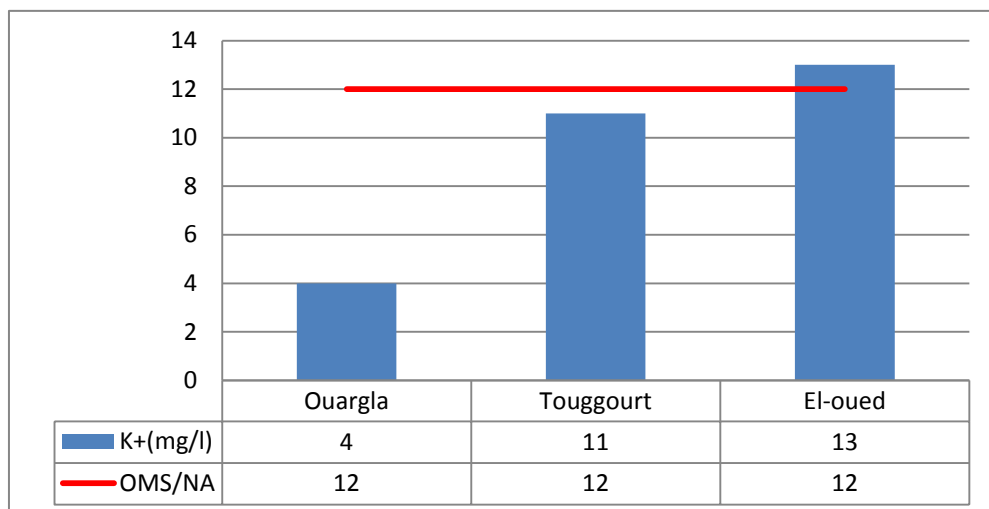


Figure IV.30. Variation du potassium dans l'eau traitée.

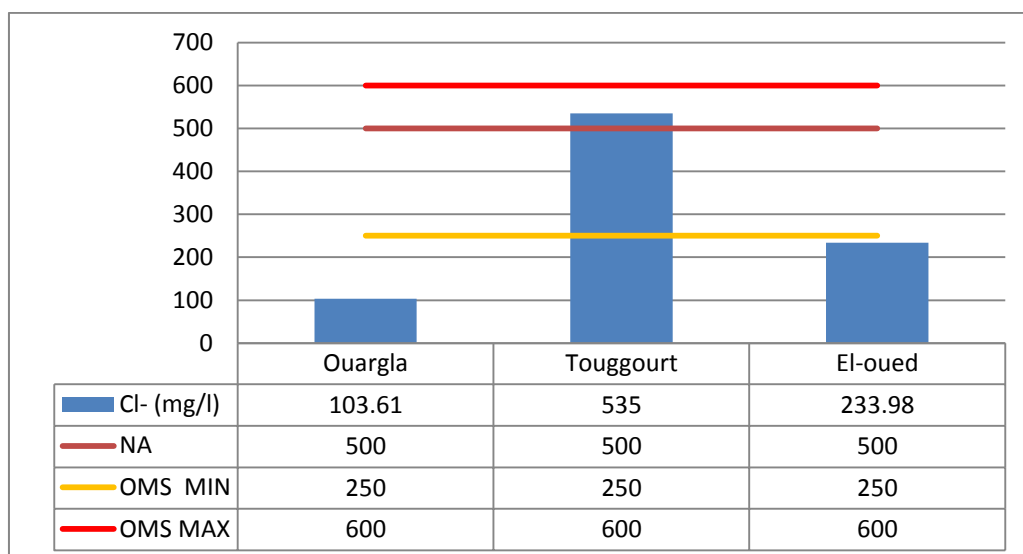


Figure IV.31. Les valeurs de chlorure dans l'eau traitée.

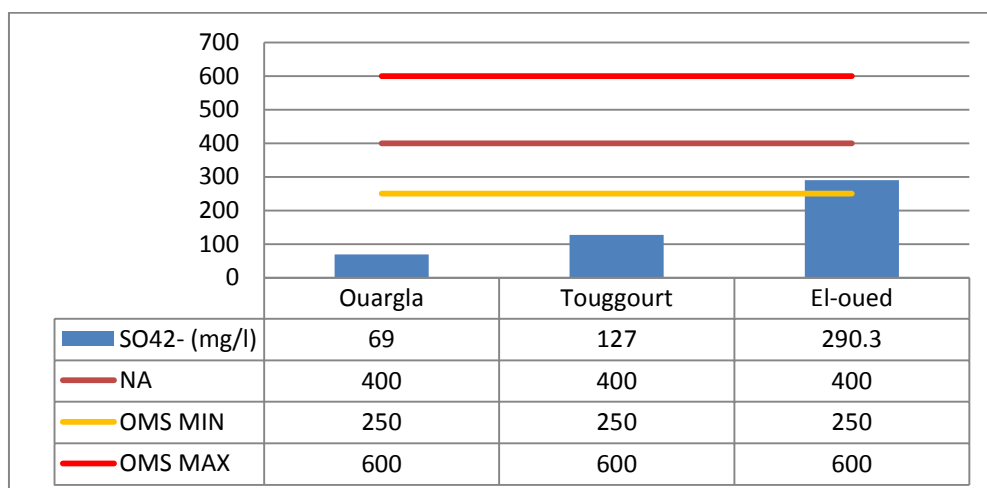


Figure IV.32. Les valeurs de sulfate dans l'eau traitée.

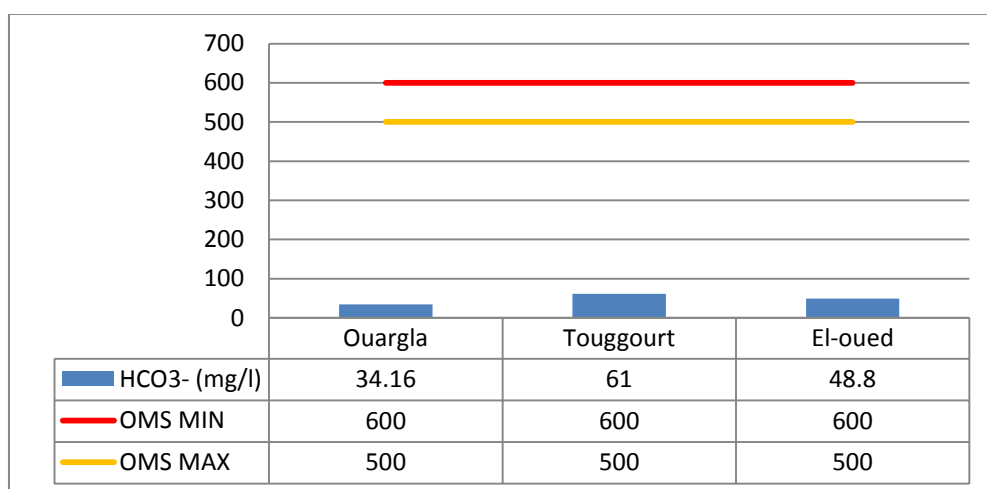


Figure IV.33. Les valeurs de bicarbonate dans l'eau traitée.

IV.11.2.6. Les nitrates (NO₃⁻)

Les résultats obtenus ont démontré que les valeurs de NO₃⁻ dans l'eau traitée dans les trois stations étaient conformes aux normes algériennes et de l'OMS, avec un minimum de 0,254 mg/l et un maximum de 6 mg/l, comme le montre la figure IV.34.

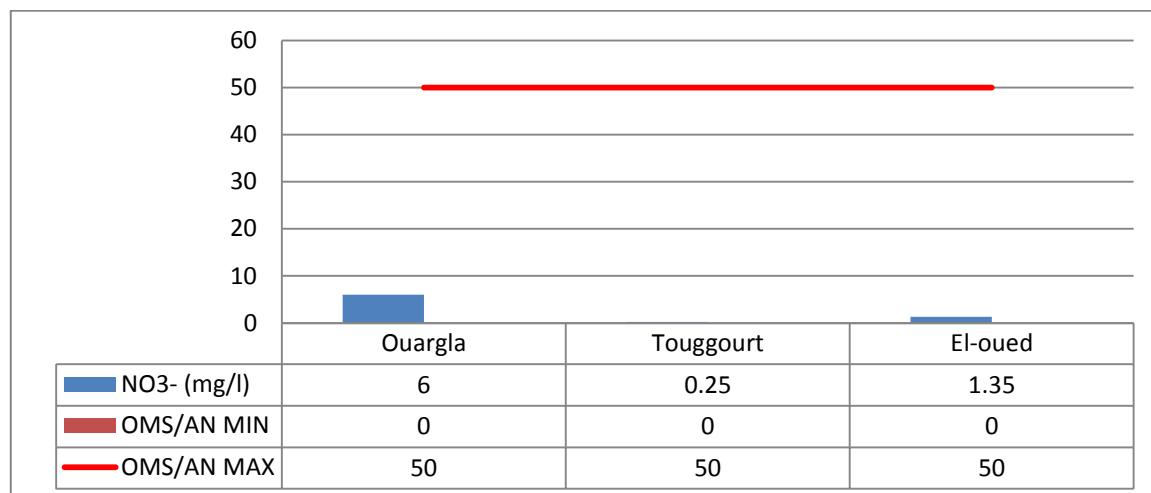


Figure IV.34. Variation du nitrate dans l'eau traitée.

IV.11.3. Calcul de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) des eaux traitées

Le tableau IV.10 résume les valeurs IQE des échantillons d'eau brute et traitée des trois stations de la zone d'étude. Les valeurs IQE révèlent que tous les échantillons d'eau brute des stations d'El-Oued et d'Ouargla sont classés comme étant pauvres pour la boisson (Classe III), avec des valeurs IQE respectives de 198,56 et 136,25. De plus, les résultats de la valeur IQE de la station Touggourt indiquent que l'échantillon d'eau brute faisait partie de la catégorie des eaux de qualité très médiocre (classe IV), avec une valeur IQE de 239,70.

La raison des valeurs élevées de l'IQE déterminées dans cette étude est les valeurs élevées de TDS, CE, TH, SO₄²⁻, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, et NO₃⁻. Des coefficients de corrélation élevés entre ces valeurs ont également été rapportés par **Aly & Alharby, 2014; WHO, 2004**. On peut en déduire de cette évaluation que l'eau brute dans la zone d'étude est souvent de qualité médiocre ou très médiocre.

D'autre part, les valeurs IQE indiquent que tous les échantillons d'eau traités dans les stations d'El-Oued et de Touggourt relèvent de la catégorie de bonne eau potable (classe II), avec des valeurs IQE 80,68 et 69,11, respectivement. De plus, les valeurs IQE de la station Ouargla montrent que l'échantillon d'eau brute appartenait à la catégorie d'excellente eau potable (Classe I), avec une valeur IQE de 40,64. La raison des faibles valeurs IQE déterminées dans cette étude est les faibles valeurs de TDS, CE, TH, SO₄²⁻, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, et NO₃⁻. De cette évaluation, on peut conclure que l'eau traitée dans les stations d'étude est généralement de bonne et excellente qualité.

Tableau IV.10. Classification de la qualité de l'eau basée sur la valeur IQE des échantillons étudiés.

Station	IQE		Description IQE	
	Eau brut	Eau traitée	Eau brut	Eau traitée
El-oued	198.56	80.68	Eau pauvre	Bonne eau
Tougourt	239.70	69.11	Eau très pauvre	Bonne eau
Ouargla	136.25	40.64	Eau pauvre	Eau excellent

IV.12. Évaluation de la qualité des eaux rejet des stations de déminéralisation

IV.12.1. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux de rejet

Des analyses ont été effectuées sur des échantillons prélevés dans les réservoirs d'eau de rejet des stations El-Oued, Ouargla et Tougourt afin d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux de rejet. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.11:

Tableau IV.11. Les valeurs des analyses physico-chimiques de rejet.

Paramètre	Les eaux de rejet			NA (2011)	OMS
	El-oued	Tougourt	Ouargla		
pH	7.56	7.8	7.86	6.5-9	6.5-8.5
CE (µs/cm)	7690	7620	6130	2800	1500
TDS (mg/l)	4922	3810	2867	/	500-1500
TH (mg/l CaCO₃)	3000	2800	1948	200	100-500
Ca²⁺ (mg/l)	1166.33	893.78	425.65	200	75-200
Mg²⁺ (mg/l)	107.71	190.62	212.81	150	50-150
Na⁺ (mg/l)	1216.98	1080.8	778.91	200	200
K⁺ (mg/l)	282.47	170	96.8	12	12
SO₄²⁻ (mg/l)	3103.19	2220	997	400	250-600
HCO₃⁻ (mg/l)	475.8	469.7	475.8	/	500-600
Cl⁻ (mg/l)	2020.82	1980	1207	500	250-600
NO₃⁻ (mg/l)	3.56	2.04	18.57	0-50	0-50

IV.12.2. Interprétation des résultats

En analysant les résultats, d'après le tableau IV.11, il est possible de constater que :

IV.12.2.1. La conductivité électrique

Selon les résultats, la valeur de CE des eaux de rejet des stations de déminéralisation d'El Oued, Touggout et Ouargla est de 7690 ; 7620 et 6130 $\mu\text{s}/\text{cm}$, ce qui est supérieur à la norme algérienne et à la norme de l'OMS. La variation de la conductivité des échantillons des stations étudiées est illustrée dans la figure IV.35.

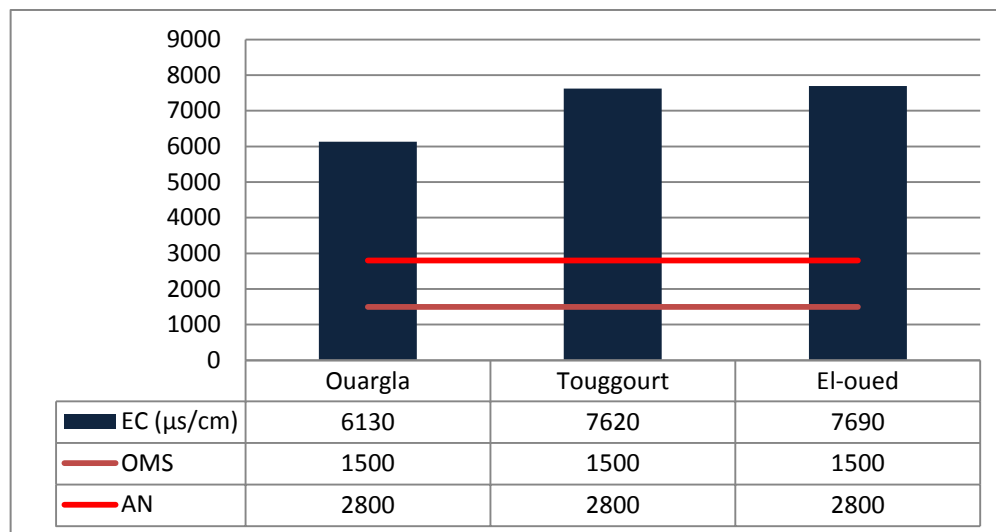


Figure IV.35. Variabilité de la conductivité électrique des eaux de rejet.

IV.12.2.2. Potentiel hydrogène (pH)

La variation des valeurs de pH des échantillons des eaux de rejet analysées est illustrée dans la figure IV.36. Les résultats de l'étude indiquent que le pH minimal est de 7,56 et le pH maximal est de 7,86 dans l'eau, ce qui est conforme aux normes algériennes et à celles de l'OMS.

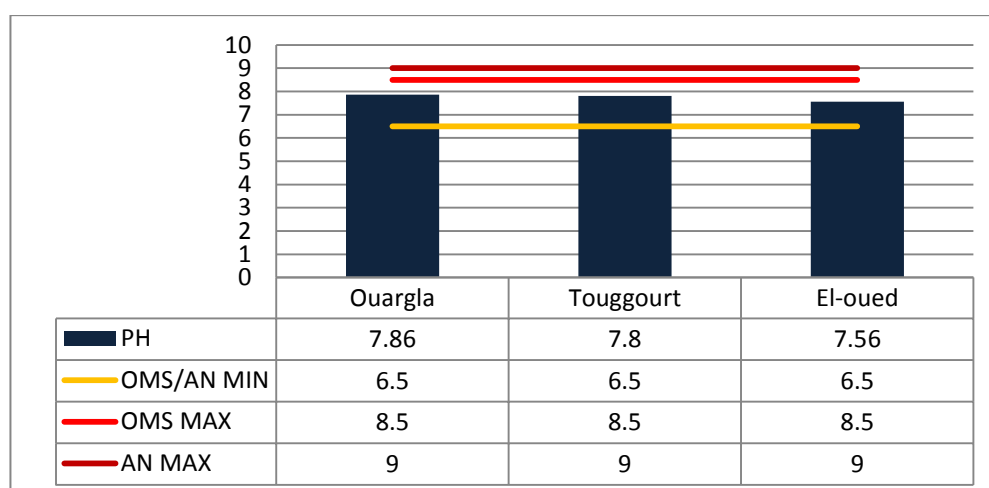


Figure IV.36. Variabilité du potentiel hydrogène des eaux de rejet.

IV.12.2.3. La dureté totale (TH)

Les résultats obtenus montrent que les valeurs de TH des eaux rejetées des stations de déminéralisation d'El-Oued, Touggourt et Ouargla dépassent les normes algériennes et l'OMS. La valeur est de 3000., 2800 ou de 1948 mg/l, respectivement. La figure IV.37 montre la variabilité de la TH des échantillons des stations étudiés.

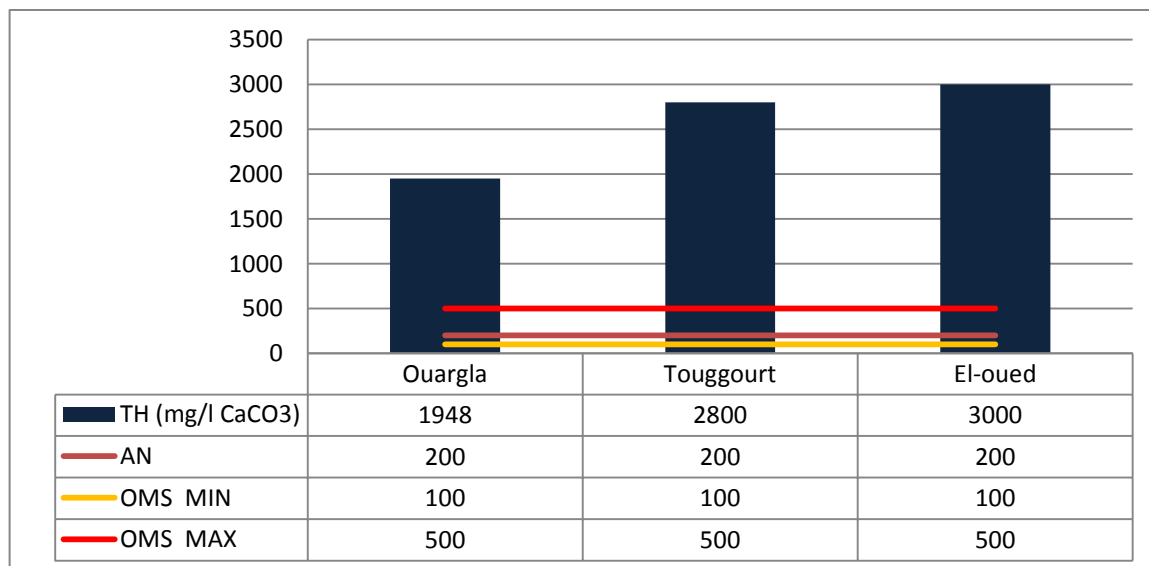


Figure IV.37. Variabilité de la dureté totale des eaux de rejet.

IV.12.2.4. Les sels dissous totaux (TDS)

Les analyses des eaux de rejet provenant de trois stations ont révélé que les niveaux de TDS dépassaient les valeurs maximales autorisées et étaient très élevés pour les échantillons de l'eau de rejet. La variation du TDS dans les échantillons des eaux rejetées est illustrée dans la figure IV.38.

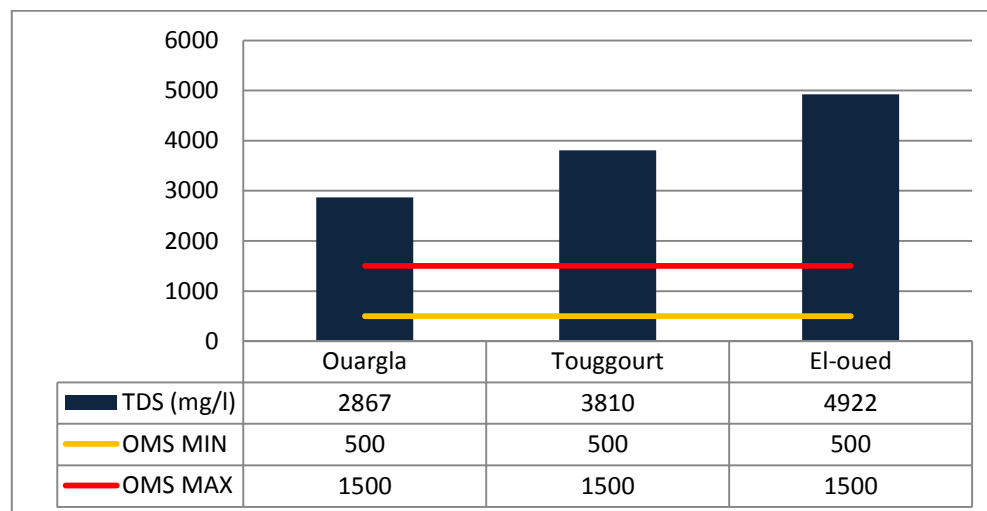


Figure IV.38. Variabilité des sels dissous totaux dans les eaux de rejet.

IV.12.2.5. Cations et Anions

Selon l'analyse des eaux rejetées des trois stations, on a constaté que ces eaux sont très salines, avec des concentrations élevées de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , chlorures et sulfates. Ce qui est en dehors de la norme algérienne et de l'OMS. Au contraire, les concentrations de bicarbonate sont inférieures aux normes de l'OMS. L'étude des eaux de rejet de la station d'El-Oued a montré qu'elles présentaient des niveaux de magnésium acceptables conformément aux normes algériennes et de l'OMS.

La variabilité dans les cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ sont montrés dans les figures IV.39, 40, 41 et 42 respectivement, et la Variabilité dans les anions Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^- sont montrés dans la figure IV.43, 44, 45 respectivement.

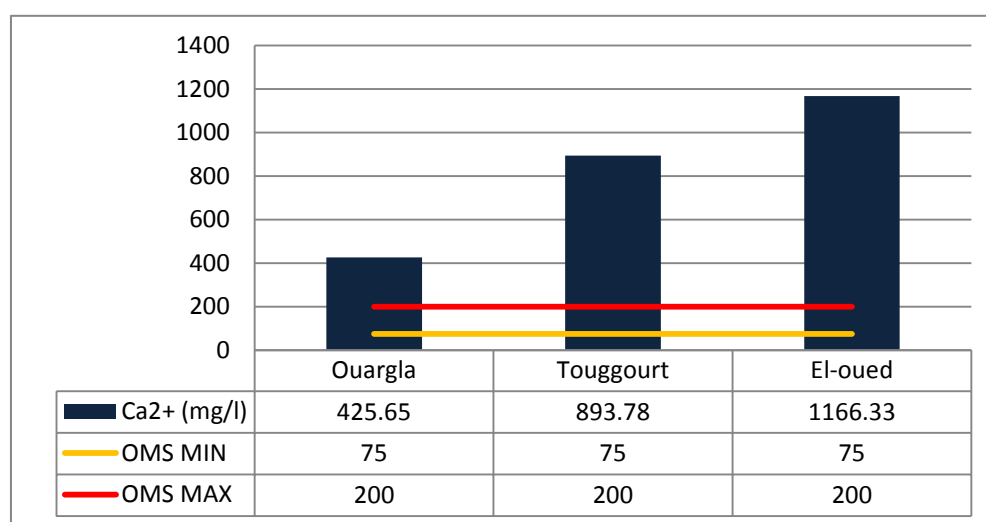


Figure IV.39. Variabilité de calcium des eaux de rejet.

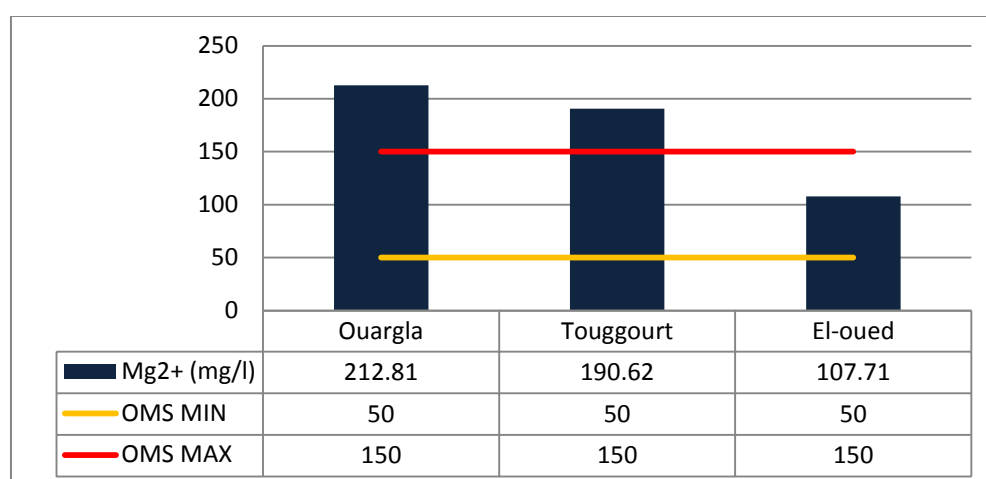


Figure IV.40. Variabilité du magnésium des eaux de rejet.

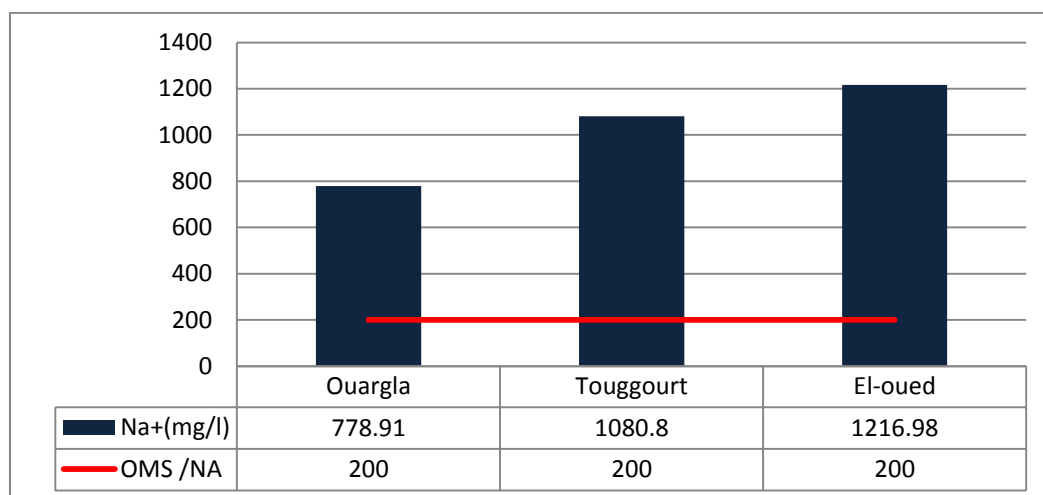


Figure IV.41. Variabilité du sodium des eaux de rejet.

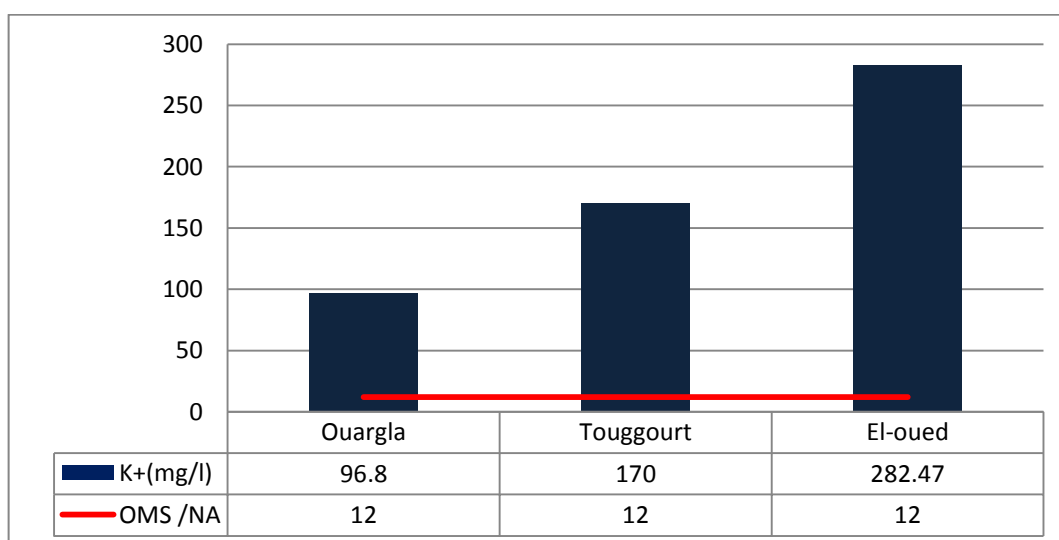


Figure IV.42. Variabilité du potassium des eaux de rejet.

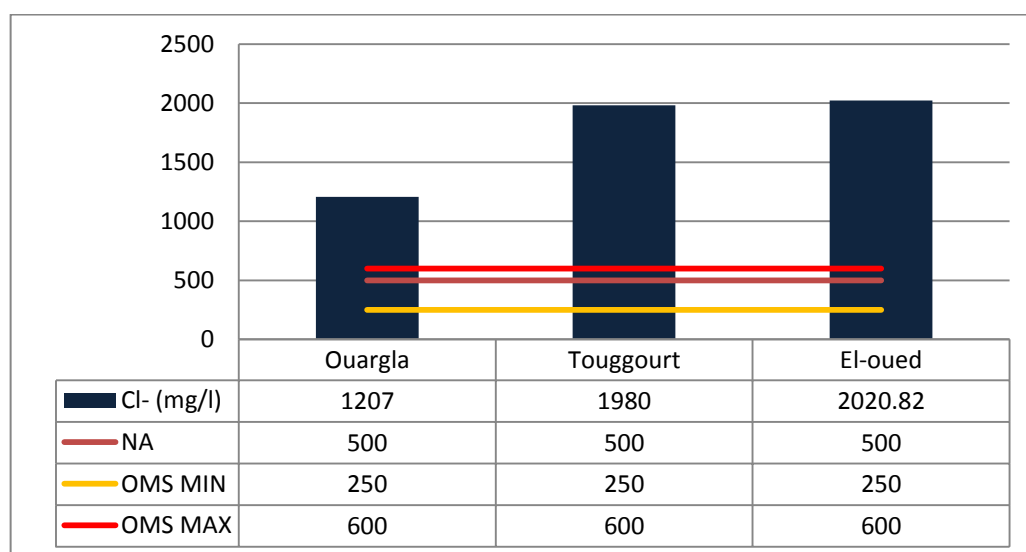


Figure IV.43. Variabilité du chlorure des eaux de rejet.

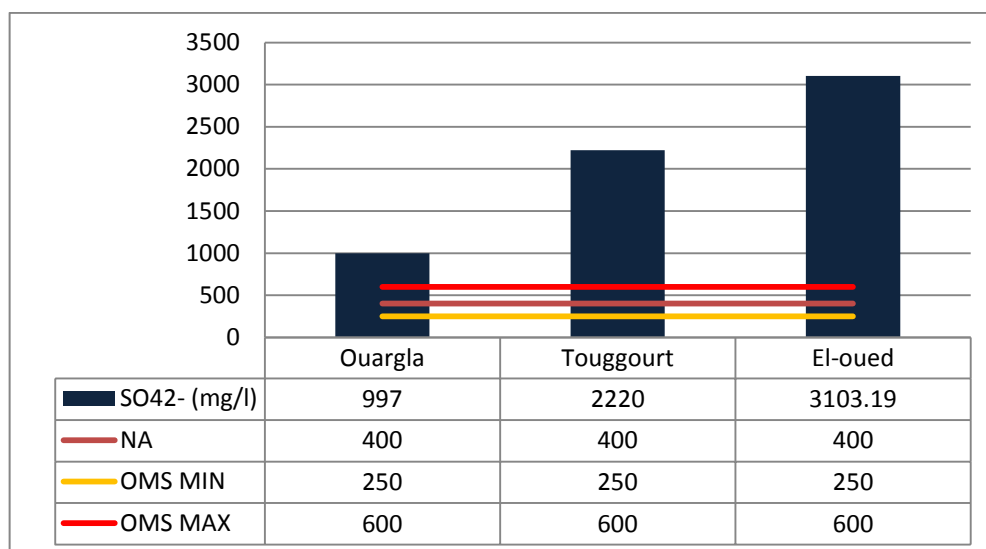


Figure IV.44. Variabilité de sulfate des eaux de rejet.

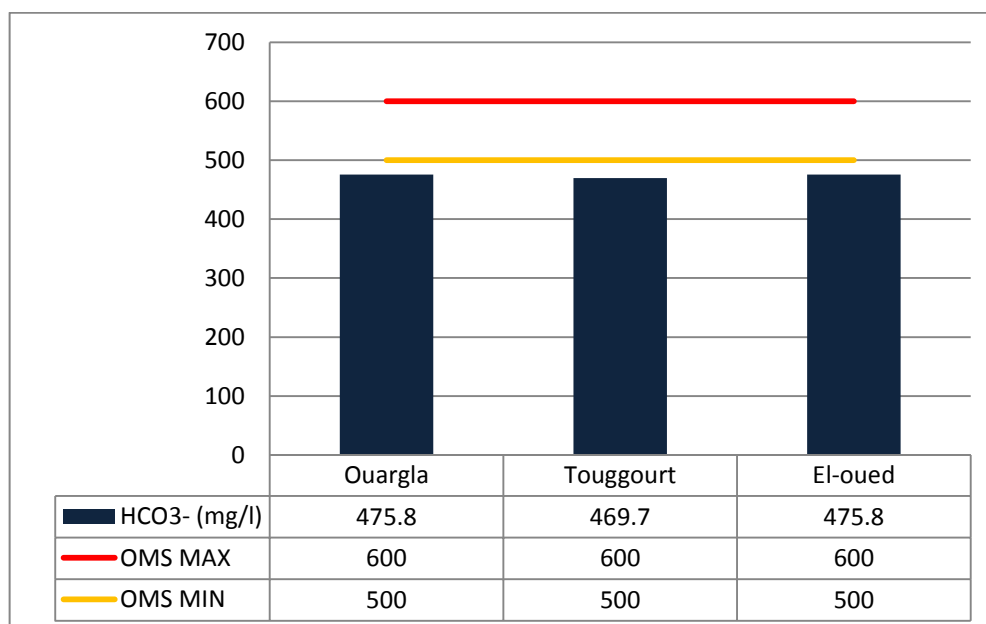


Figure IV.45. Variabilité du bicarbonates dans les eaux de rejet.

IV.12.2.6. Les nitrates (NO₃⁻)

Les résultats montrent que les eaux de rejet des trois stations présentent des niveaux acceptables de NO₃⁻ de minimum 2,04 mg/l et le maximum 18,57 mg/l selon les normes algériennes et l'OMS.

La figure IV.46 montre la variabilité du NO₃⁻ dans les échantillons des eaux de rejet.

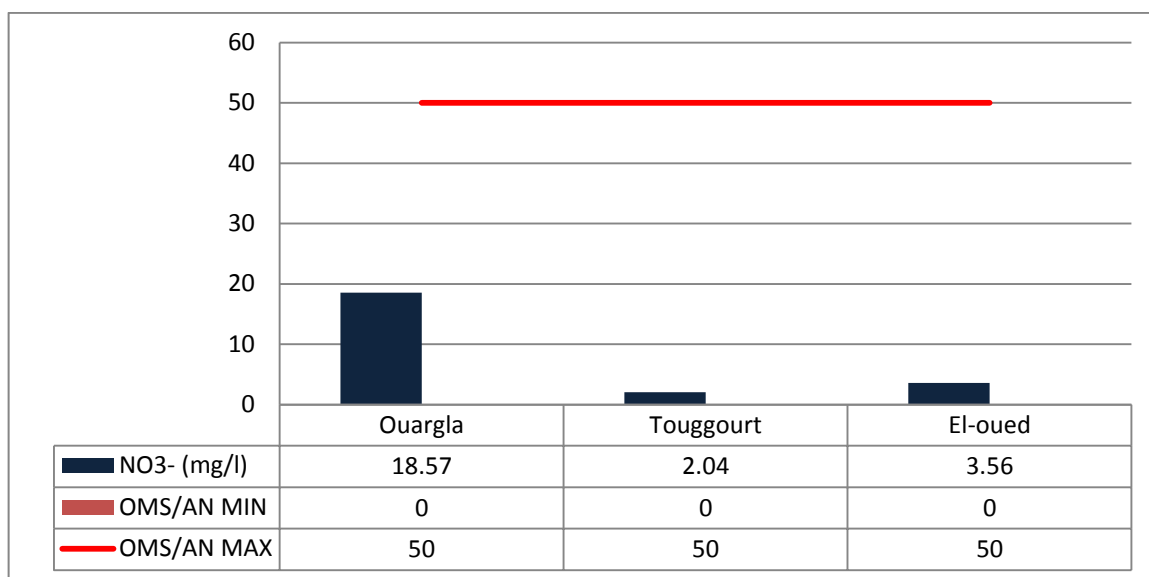


Figure IV.46. Variabilité des nitrates des eaux de rejet.

IV.12.3. Qualité de l'eau de rejet

En analysant l'eau rejetée, il est constaté que dans tous les cas, on produit de l'eau rejet concentrée, dont la composition chimique est plus concentrée que celle de l'eau brute.

La composition de l'eau rejetée dépend fortement de la qualité de l'eau d'alimentation, de la qualité de l'eau douce produite et de la technique de dessalement utilisée. Cette eau est exempte de contaminants organiques et/ou chimiques. Saturé uniquement avec des sels classiques trouvés dans les eaux naturelles. Un exemple de la quantité de substances chimiques utilisées chaque année dans les stations étudiées et de leur qualité. Cette quantité varie en fonction du mode de fonctionnement de la station et des étapes de sédimentation.

Le nettoyage et le stockage des membranes peuvent produire eau potentiellement dangereuse.

Le nettoyage des membranes dépend de la qualité de l'eau d'alimentation ainsi que du fonctionnement de la station. Pour nettoyer les membranes, on utilise habituellement des solutions alcalines avec des acides aquatiques. De plus, des solutions de conservation chimique (généralement à base de bisulfite de sodium) sont utilisées pour le stockage des membranes.

Cependant, les caractéristiques de la saumure (rejet) des stations de déminéralisation varient d'une station à l'autre. Par exemple, les stations de déminéralisation des eaux souterraines contaminées par les activités minières contenaient de fortes concentrations du calcium, du magnésium, du sodium, du potassium, du chlorure et du sulfate.

L'augmentation de la quantité de solides dissous totaux (TDS) est due à ces valeurs EC élevées dans la saumure (rejet). La saumure formée par le dessalement des eaux souterraines saumâtres est composée de calcium, de magnésium, de sodium, de potassium, de chlorures et de saumures. La présence de concentrations élevées de ces TDS entraîne une mise à l'échelle car les concentrations

de sulfate de baryum (BaSO_4), de carbonate de calcium (CaCO_3) et de sulfate de calcium (CaSO_4) ont atteint leur valeur limite de solubilité (K_{sp}). La saumure est décrite dans le tableau IV.11 et explique la variation de la qualité de l'eau. Ces différences surviennent en raison de la diversité des sources d'influents, ainsi que de la conception et des paramètres opérationnels utilisés dans les processus de traitement.

IV.13. Conclusion

Cette partie est une combinaison d'analyses physico-chimiques et de la distribution géospatiale d'échantillons d'eaux souterraines dans la région d'El-Oued, en utilisant différents logiciels et techniques SIG. Elle combine également l'analyse physico-chimique et l'évaluation de l'IQE des échantillons d'eau brute, traitée et rejetée des stations d'El-Oued, Ouargla et Touggourt.

Les résultats ont révélé que le faciès hydrochimique des deux couches d'eau souterraine dans la région d'El-Oued est comme suit: $\text{Cl}^- \text{SO}_4^{2-} \text{Ca}^{2+} \text{Mg}^{2+}$ pour la couche Albienne et de 95,84% des puits du Complexe Terminal ayant un faciès $\text{Cl}^- \text{SO}_4^{2-} \text{Ca}^{2+} \text{Mg}^{2+}$ tandis que les 4,16% restants ayant un faciès $\text{Cl}^- \text{Na}^+ \text{K}^+$. Après avoir effectué des analyses chimiques de tous les échantillons d'eau souterraine, nous avons constaté que les éléments de l'eau souterraine dans la couche de l'Albien ont des concentrations significativement plus faibles par rapport à celles de la couche du Complexe Terminal. L'aptitude de la qualité des eaux souterraines à l'usage de l'eau potable est évaluée sur la base d'une comparaison avec les normes algériennes et celles de l'OMS. La comparaison montre que les concentrations de tous les paramètres mesurés ne conviennent pas à une utilisation domestique et dépassent la valeur maximale acceptable. En outre, les résultats de l'analyse physico-chimique des échantillons d'eau souterraine des deux couches montrent que la concentration des éléments dans la couche de l'Albien est significativement inférieure à celle de la couche complexe terminale. Il est donc suggéré d'exploiter les eaux souterraines de la couche de l'Albien dans la station de déminéralisation. Les valeurs de l'IQEI pour les eaux souterraines ont montré que tous les échantillons appartenaient à la catégorie "sévèrement restreinte" et pouvaient être utilisés dans des sols à haute perméabilité. Le schéma de distribution spatiale du SAR suggère que l'ensemble de la zone d'étude dans le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal montre la présence d'une teneur en sodium variant de faible à élevée dans les eaux souterraines. Certaines corrélations significatives peuvent être identifiées, comme les corrélations entre TDS & CE (0,95), Na^+ & TDS (0,63), Na^+ & CE (0,58), TDS & SO_4^{2-} (0,71), TDS & Cl^- (0,63), etc. Cela montre le rôle important et significatif de ces facteurs dans la détermination de la charge de salinité de ces eaux. Quatre facteurs (F) ont été retenus dans l'analyse ACP, avec des valeurs propres supérieures à 1 selon la règle de Kaiser, et ils expliquent ensemble 72,74 % de la variance totale. La distribution spatiale de l'IQE a montré que la mauvaise qualité de l'eau potable était répartie dans toute la zone

d'étude de la couche CI. Elle montre également que l'ensemble de la zone d'étude située dans la couche CT présente une qualité d'eau souterraine très médiocre. Les analyses géospatiales indiquent que les eaux souterraines de la région d'El Oued dans les deux couches CT et CI sont de bonne qualité pour l'irrigation. On peut conclure que la qualité des eaux souterraines dans les deux strates étudiées est influencée par plusieurs facteurs tels que les propriétés physico-chimiques, la géologie de la roche-mère, les conditions hydrogéologiques et la profondeur de la couche d'eau souterraine.

L'adéquation de la qualité de l'eau brute et traitée à la consommation humaine est évaluée en comparant ses niveaux avec les normes algériennes ainsi que les normes de référence recommandées par l'OMS. Suite à cette comparaison, les concentrations des différents paramètres de l'eau brute mesurées à la station El-Oued ont révélé des valeurs acceptables pour le calcium ($\text{Ca}^{2+}=188.37<200$ mg/l), le magnésium ($\text{Mg}^{2+}=65.62<150$ mg/l), les chlorures ($\text{Cl}^- =475.07<500;600$ mg/l) et les bicarbonates ($\text{HCO}_3^- =151.28<600$ mg/l) dans l'eau. Toutefois, selon les normes algériennes et l'OMS, les valeurs de sodium ($\text{Na}^+=411>200$ mg/l), de potassium ($\text{K}^+=32.47>12$ mg/l) et de sulfate ($\text{SO}_4^{2-}=950>400;600$ mg/l) étaient toutes supérieures au maximum autorisé pour tous les échantillons d'eau brute. L'eau brute de la station de Touggourt a révélé la présence de calcium ($\text{Ca}^{2+}=140.8<200$ mg/l), de magnésium ($\text{Mg}^{2+}=95.92<150$ mg/l) et de bicarbonate ($\text{HCO}_3^- =174.46<600$ mg/l) à des niveaux jugés acceptables selon les normes algériennes et l'OMS. Cependant, des concentrations élevées de sodium ($\text{Na}^+=376.31>200$ mg/l), de potassium ($\text{K}^+=31>12$ mg/l), de chlorure ($\text{Cl}^- =1410>500;600$ mg/l) et de sulfate ($\text{SO}_4^{2-}=760>400;600$ mg/l) ont été constatées, dépassant ainsi les seuils acceptables fixés par les normes algériennes et l'OMS. Quant à l'eau brute de la station d'Ouargla, des niveaux acceptables de calcium ($\text{Ca}^{2+}=140.28<200$ mg/l), de magnésium ($\text{Mg}^{2+}=85.06<150$ mg/l), de sodium ($\text{Na}^+=200=200$ mg/l), de chlorure ($\text{Cl}^- =414.45<500;600$ mg/l), de sulfate ($\text{SO}_4^{2-}=380<400;600$ mg/l) et de bicarbonate ($\text{HCO}_3^- =102.03<600$ mg/l) ont été observés, conformément aux normes algériennes et à celles de l'OMS en matière de santé publique. Toutefois, les valeurs de potassium ($\text{K}^+=14>12$ mg/l) ont dépassé la limite autorisée dans les échantillons d'eau brute.

Après déminéralisation de l'eau brute, en ce qui concerne l'utilisation du processus de déminéralisation des eaux souterraines par osmose inverse, nous avons observé l'efficacité de la technologie d'osmose inverse dans la déminéralisation de l'eau saumâtre, ce qui a conduit à des valeurs de salinité plus faibles et une minéralisation réduite. Après comparaison, les valeurs des paramètres de l'eau traitée à la station d'El Oued indiquent la présence de calcium ($\text{Ca}^{2+} = 80.16 < 200$ mg/l), de sodium ($\text{Na}^+ = 147 < 200$ mg/l) et de sulfate ($\text{SO}_4^{2-} = 290.3 < 400 ; 600$ mg/l) dans l'eau selon les normes algériennes et de l'OMS. En revanche, les niveaux de magnésium ($\text{Mg}^{2+} = 34.02 < 50-150$ mg/l), de chlorure ($\text{Cl}^- = 233.98 < 250-600$ mg/l) et de bicarbonate ($\text{HCO}_3^- = 48.8 <$

500-600 mg/l) sont inférieurs aux normes de l'OMS. La valeur de potassium ($K^+ = 13 > 12$ mg/l) dépasse la valeur maximale autorisée pour l'échantillon d'eau traitée.

Dans l'eau traitée à la station de Touggourt, des niveaux acceptables de magnésium ($Mg^{2+} = 69 < 150$ mg/l), de potassium ($K^+ = 11 < 12$ mg/l), de sodium ($Na^+ = 135 < 200$ mg/l), et de chlorure ($Cl^- = 535 < 600$ mg/l) étaient présents conformément aux normes algériennes et de l'OMS. En revanche, les niveaux de calcium ($Ca^{2+} = 32 < 75-200$ mg/l), de sulfate ($SO_4^{2-} = 127 < 250-600$ mg/l), et de bicarbonate ($HCO_3^- = 61 < 500-600$ mg/l) étaient inférieurs à la norme de l'OMS. Nous avons observé que le niveau de chlorure dépassait les normes algériennes.

Dans l'eau traitée à la station d'Ouargla, le sodium ($Na^+ = 59 < 200$ mg/l) et le potassium ($K^+ = 4 < 12$ mg/l) ont été trouvés présents à des niveaux acceptables selon les normes algériennes et de l'OMS. En revanche, les niveaux de calcium ($Ca^{2+} = 24.04 < 75-200$ mg/l), de magnésium ($Mg^{2+} = 14.58 < 50-150$ mg/l), de chlorure ($Cl^- = 103.61 < 250-600$ mg/l), de sulfate ($SO_4^{2-} = 69 < 250-600$ mg/l), et de bicarbonate ($HCO_3^- = 34.16 < 500-600$ mg/l) sont tous inférieurs aux normes de l'OMS. Tous les paramètres physico-chimiques étant conformes aux normes algériennes, l'eau traitée dans toutes les stations de déminéralisation est potable.

La potabilité de l'eau brute et traitée est évaluée à l'aide de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE). Dans cette étude, les IQE ont été calculés pour évaluer la pertinence de l'eau brute et traitée pour l'eau potable aux stations de déminéralisation d'El Oued, Ouargla et Touggourt dans la région du Sahara septentrional en Algérie. Après analyse de différents paramètres physico-chimiques, la fourchette d'IQE indique que tous les échantillons d'eau brute des stations d'El Oued et d'Ouargla ($100.1 < IQE < 198.56$; $136.25 < IQE < 200$) entrent dans la catégorie «Eau pauvre» (Classe III). De plus, la valeur IQE de la station de Touggourt ($200.1 < IQE < 239.70 < 300$) montre que l'échantillon d'eau brute est de très mauvaise qualité pour la consommation (Classe IV). L'IQE élevé dans cette zone d'étude est principalement dû aux niveaux élevés de solides dissous totaux, de conductivité, de dureté totale, de calcium, de magnésium, de sulfate, de chlorure et de nitrate dans l'eau.

D'autre part, les valeurs de l'IQE indiquent que tous les échantillons d'eau traitée aux stations d'El-Oued et de Touggourt ($50.1 < IQE < 80.68$; $69.11 < IQE < 100$) sont classés dans la catégorie « eau de bonne qualité potable » (classe II). De plus, les valeurs de l'IQE de la station d'Ouargla ($40.64 < IQE < 50$) indiquent que tous les échantillons d'eau traitée sont classés dans la catégorie d'excellente qualité potable (Classe I). La raison des faibles valeurs de l'IQE déterminées dans cette étude est attribuée aux faibles valeurs de TDS, CE, TH, SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} et NO_3^- .

L'analyse des eaux de rejet des trois stations a montré que la salinité des eaux de rejet était très élevée. Les concentrations des paramètres d'eau de rejet mesurées à la station El-Oued, Touggourt et Ouargla respectivement sont les suivantes : le calcium ($Ca^{2+}=1166.33$; 893.78 et

425.65 mg/l, supérieur à 200 mg/l), le magnésium (Mg^{2+} =190.62 et 212.81 mg/l, supérieur à 150 mg/l), le sodium (Na^+ =1216.98; 1080.8 et 778.91 mg/l, supérieur à 200 mg/l), le potassium (K^+ =282.47; 170 et 96.8 mg/l, supérieur à 12 mg/l), les chlorures (Cl^- =2020.82; 1980 et 1207 mg/l, supérieur à 500;600 mg/l), les sulfates (SO_4^{2-} =3103.19; 2220 et 997 mg/l, supérieur à 400;600 mg/l) et les bicarbonates (HCO_3^- =475.8; 469.7 et 475.8 mg/l, inférieur à 600 mg/l) dans l'eau. Tous les paramètres physico-chimiques dépassent les normes algériennes et de l'OMS à un taux très élevé, sauf le bicarbonate et le magnésium à la station d'El-Oued. Produisant dans tous les cas des eaux de rejet concentrées avec des concentrations deux à quatre fois supérieures à celles de l'eau d'alimentation. L'osmose inverse produit des rejets de saumure avec une salinité jusqu'à deux à quatre fois supérieure à celle des eaux souterraines. Cette augmentation de la salinité entraîne une augmentation de la densité de la saumure. Les constituants des eaux de rejet dépendent fortement de la qualité de l'eau d'alimentation, de la qualité de l'eau douce produite et de la technique de dessalement utilisée.

Chapitre V

Etude de la possibilité de la réutilisation des eaux de rejet

V.1. Introduction

L'un des principaux problèmes à résoudre est celui de la réutilisation des saumures rejetées des stations de déminéralisation, car nous observons que chaque jour une grande quantité de saumure est rejetée dans la mer ou dans l'environnement, ce qui entraîne des dommages importants à l'environnement à l'avenir. L'eau récupérée est une source d'eau fiable qui est utilisée dans le cadre d'une politique durable de l'eau. L'intégration de la réutilisation de l'eau dans la planification et le développement des ressources mondiales en eau est de plus en plus importante, notamment dans le domaine de l'agriculture et de l'irrigation paysagère.

Il est important d'avoir une réglementation sur la réutilisation des saumures. Cela aide à préserver la santé publique, à l'augmentation de la disponibilité de l'eau, à prévenir la pollution de l'environnement et à améliorer les politiques de préservation des ressources en eau et de la nature.

Dans ce chapitre, nous étudierons la possibilité de recourir aux eaux de rejet des stations de déminéralisation pour les réutiliser. Après que les eaux souterraines ont dilué la salinité de l'eau de rejet. On évalue la capacité du mélange d'eau à être utilisé pour l'irrigation est évaluée la base de l'indice de perméabilité (PI), de l'indice des risques liés au magnésium (MH), de l'indice de Kelly (KI), de l'indice du carbonate de sodium résiduel (RSC), du pourcentage de solubilité en sodium (Na %), du taux d'absorption de sodium (SAR) et de l'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IQEI).

V.2. Réutilisation des eaux de rejet

La réutilisation des eaux de rejet constitue un défi stratégique et socio-économique majeur. Son utilisation peut réduire la rareté de l'eau, réduire l'impact des rejets sur le milieu récepteur, limiter les prélèvements d'eau dans les zones fragiles et améliorer la préservation des ressources naturelles en réduisant les rejets dans la nature. Les eaux peuvent être réutilisées pour l'irrigation agricole, le nettoyage urbains, les espaces verts, les usages industrielles (réfrigération, protection contre les incendies), les usages récréatives, la préservation des habitats naturels et des zones humides, ainsi que pour la recharge des nappes.

La réutilisation des eaux de rejet est possible uniquement si elles ne représentent pas de danger pour l'environnement et ne représentent pas de menace pour les écosystèmes actuels (c'est-à-dire qu'elles ne causent aucun dommage aux écosystèmes, au sol ou aux cultures).

V.3. Domaines de réutilisation des eaux de rejet

Les différentes utilisations des eaux de rejet sont:

V.3.1. Réutilisation des eaux de rejet dans l'industrie

La production d'énergie occupe une place prépondérante dans l'industrie et représente le domaine qui collecte la majorité de l'eau de l'environnement. Les différentes utilisations de l'eau dans le domaine de l'énergie incluent des circuits de refroidissement fermés et ouverts, de refroidissement fermés ou ouverts, des laveries industrielles, des stations de lavage de voitures et de camions, la fabrication d'acier et de textile, l'industrie du papier, de l'électronique et des semi-conducteurs... etc.

V.3.2. Réutilisation des eaux de rejet en agriculture

La reprise de l'économie et la croissance démographique sont favorisées par la croissance et le développement du secteur agricole. Cependant, l'agriculture nécessite une grande quantité d'eau pour l'irrigation. La demande croissante de ressources en eau traditionnelles est due aux changements climatiques et à la sécheresse. La réutilisation des eaux de rejet des stations de déminéralisation en agriculture est l'une des solutions les plus essentielles pour fournir de l'eau non conventionnelle.

V.3.3. L'aquaculture

L'aquaculture est l'un des projets les plus modernes sur lesquels comptent de nombreux pays pour investir dans la pêche. Ce projet vise à exporter le produit local de l'eau, à réduire la pénurie d'aquaculture dans la mer et la nature. Elle pourrait aussi contribuer à l'avancement de l'économie et devenir une industrie en soi. Les cages flottantes sont toutes des activités aquatiques, qu'elles soient végétales ou animales dans un environnement aquatique, et elles sont soit en eau douce, soit en eau salée.

V.3.4. Recharge des nappes

Cette réutilisation a lieu principalement dans les régions arides souffrant d'assèchement des eaux souterraines et dans les zones côtières où l'eau de mer s'infiltré dans les eaux souterraines.

V.4. Domaine de réutilisation des eaux de rejet dans cette étude

Nous examinerons la possibilité de réutiliser les eaux de rejet pour l'irrigation dans la zone d'étude, qui se trouve dans une zone agricole riche en palmiers au Sahara septentrional (Algérie).

V.4.1. Avantages de la réutilisation des eaux de rejet pour l'irrigation

- L'agriculture est une particularité de la région d'étude.

- Réduit l'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation.
- Le processus de réutilisation des eaux de rejet dans l'irrigation est peu coûteux par rapport à d'autres domaines, par ex: l'industrie.
- L'utilisation des eaux de rejet protège l'environnement des dommages.

V.5. Enjeux de la réutilisation des eaux de rejet en agriculture

V.5.1. Enjeux environnementaux

Dans le domaine de l'agriculture, on utilise les eaux de rejet pour l'irrigation des cultures. Ce genre de recyclage est perçu comme un moyen efficace de gérer les ressources en eau. Un des principaux bénéfices environnementaux de l'exploitation des eaux de rejet dans l'agriculture est :

- Les eaux de rejet sont une source d'eau toujours disponible. En fait, les eaux de rejet peuvent aider à équilibrer le cycle naturel de l'eau et à protéger les ressources en eau en réduisant les rejets nocifs dans l'environnement naturel.
- Chute de pression sur les sources d'eau souterraine. Les eaux de rejet servent donc de source alternative d'irrigation.
- La réutilisation des eaux de rejet augmente la production agricole dans les régions de stress hydrique et contribue à la sécurité alimentaire.
- La prévention de la pollution de l'eau est un autre avantage associé à la réutilisation des eaux de rejet dans l'agriculture. La réduction des eaux de rejet contribue à améliorer la qualité de l'eau de la nappe phréatique.
- La préservation des réservoirs d'eau souterraine est assurée, car la réutilisation des eaux de rejet agricoles permet de remplir les nappes avec une eau de meilleure réputation.

V.5.2. Enjeux économiques

Les agriculteurs peuvent bénéficier d'un effet économique bénéfique des eaux de rejet. La réutilisation des eaux de rejet agricoles présente des avantages économiques implicites tels que :

- L'analyse des eaux rejetées destinées à la consommation humaine est une priorité primordiale. Dans certaines nations, le traitement des eaux usées permet aux gouvernements locaux de diminuer les dépenses liées à la recherche de sources d'eau par des méthodes plus onéreuses
- Les eaux de rejet peuvent réduire toutes ces dépenses et réduire les coûts d'irrigation, leur permettant ainsi de passer à une agriculture à plus forte valeur ajoutée et plus durable. Il augmentera également la superficie irriguable, offrant des avantages économiques importants aux agriculteurs.
- L'utilisation des eaux de rejet pour l'irrigation peut avoir un impact sur l'économie des agriculteurs défavorisés et prévenir l'exploitation des ressources en eau souterraine. Il est important

de souligner que le coût de l'énergie requise pour pomper les eaux souterraines peut atteindre jusqu'à 65 % du coût des opérations d'irrigation.

➤ L'utilisation des eaux de rejet dans l'agriculture permet de libérer des ressources en capital grâce au paiement d'instruments économiques par les acteurs des différents pays.

V.5.3. Enjeux sociaux

La réutilisation des eaux de rejet a révélé divers bénéfices pour la société :

- L'utilisation d'eau recyclée pour l'irrigation a un effet bénéfique sur le revenu des agriculteurs, car elle leur offre des produits agricoles à un prix plus abordable, ce qui se traduit par une diminution des prix des produits agricoles et permet à la classe fragile (à faible revenu) de se procurer différents produits agricoles.
- Le recyclage des eaux de rejet encouragera les autorités à améliorer les réglementations environnementales et à introduire de nouvelles politiques de gestion de l'eau pour protéger l'environnement et la santé publique.
- Sur la base des aspects réglementaires, la réutilisation des eaux de rejet agricoles peut aider à justifier des politiques d'investissement et des mécanismes de financement appropriés pour le contrôle et la prévention de la pollution.

V.6. Etude de la possibilité de la réutilisation des eaux de rejet de la station de déminéralisation dans région au Sahara septentrional

Étant donné la grande étendue de la zone d'étude (Sahara septentrional), nous avons examiné trois stations : El-Oued, Touggourt et Ouargla. Pour étudier la réutilisation des eaux de rejet, nous permettons de diminuer la salinité des rejets en ajoutant des eaux souterraines. Il existe deux approches possibles :

- La méthode numérique.
- La méthode de dilution de la saumure (partie expérimentale).

V.6.1. La méthode numérique

La méthode mise en œuvre suit les étapes exposées dans la Figure V.1 et décrites de manière chronologique. Une fois que les stations d'étude des zones d'El-Oued, de Touggourt et d'Ouargla ont été établies, des échantillons d'eau souterraine et de rejet saumure ont été prélevés, mis en laboratoire et des données ont été collectées. Par la suite, la salinité de la saumure a été diminuée en ajoutant de l'eau souterraine.

Nous déterminons la valeur du TDS (Total Dissout Sels) conformément aux normes d'irrigation, puis nous calculons la quantité d'eau souterraine à ajouter en utilisant l'Eq 1. Après avoir obtenu le mélange d'eau, nous estimons les paramètres physico-chimiques par l'utilisation de l'Eq 2 et au même temps recueilli les résultats. Enfin, nous calculons les différents indices de la qualité de l'eau d'irrigation et on interprète les résultats trouvés:

$$C_1 \times Q_1 + C_2 \times Q_2 = C_3 \times (Q_1 + Q_2) \longrightarrow Q_2 = \frac{(C_1 - C_3)}{(C_3 - C_2)} \times Q_1 \dots \dots \dots (1)$$

$$C_3 = \frac{C_1 \times Q_1 + C_2 \times Q_2}{(Q_1 + Q_2)} \dots \dots \dots (2)$$

- Où: C₁: valeur de la concentration des éléments dans le rejet saumure;
- Q₁: débit de rejet saumure;
- C₂: valeur de la concentration des éléments dans l'eau brute;
- Q₂: débit d'eau brute;
- C₃: valeur de la concentration des éléments à l'eau mélangée.

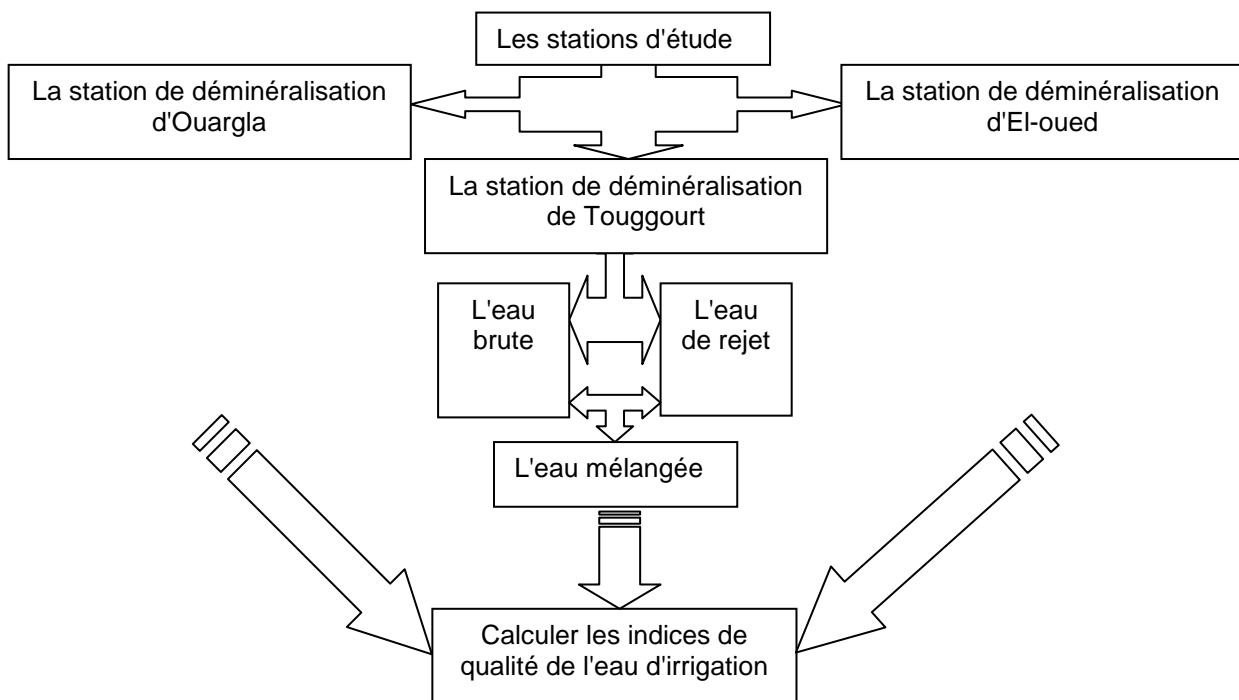


Figure V.1. Organigramme méthodologique.

V.6.1.1. La station de déminéralisation dans la zone d’Ouargla

La station émet quotidiennement une quantité de saumure de 6750 m³/j. Puisque la concentration de sels est élevée, nous combinons la saumure avec l'eau souterraine du CI afin de

diminuer la concentration de sels. La loi suivante (1) est utilisée pour déterminer la quantité d'eau souterraine CI ajoutée. La station prélève de l'eau à une vitesse de 27 000 m³/jour pendant 18.56 heures. Ensuite, nous prélevons l'eau des puits pendant 5.40 heures, ce qui nous donne un total de 7864.15 m³/jour. En combinant l'eau sortant de la station avec l'eau du puits, nous obtenons un total de 14614.2 m³/jour. Enfin, nous utilisons la loi 2 pour calculer tous les éléments dans un mélange d'eaux.

V.6.1.2. La station de déminéralisation dans la zone de Touggourt

Le niveau de saumure rejeté par la station est de 1000 m³/j chaque jour. Étant donné que le taux de sels est élevé, nous combinons la saumure avec l'eau souterraine du CI afin de diminuer le taux. La loi suivante (1) est utilisée afin de déterminer la quantité d'eau souterraine CI ajoutée. En effet, la station prélève de l'eau à une vitesse de 4000 m³/jour pendant 4,11 heures. Ensuite, nous prélevons l'eau des forages à une vitesse de 7,69 heures, ce qui nous donne un total de 7488,37 m³/jour. En combinant l'eau sortant de la station avec l'eau du puits, nous obtenons un total de 8488,37 m³/jour. Enfin, nous utilisons la loi 2 pour calculer tous les éléments dans un mélange d'eaux.

V.6.1.3. La station de déminéralisation dans la zone d'El-Oued

La station produit quotidiennement une quantité de saumure de 7500 m³/j. Puisque la concentration de sels est élevée, nous combinons la saumure avec l'eau souterraine du CI afin de diminuer la concentration de sels. La loi suivante (1) est utilisée pour déterminer la quantité d'eau souterraine CI ajoutée. La station prélève de l'eau à une vitesse de 30 000 m³/jour pendant 13,88 heures. Ensuite, nous prélevons l'eau des puits à une vitesse de 10,12 heures, ce qui nous donne 21 859,26 m³/jour. En combinant l'eau sortant de la station avec l'eau du puits, nous obtenons 29 359,26 m³/jour. Nous utilisons la loi 1. Afin de mesurer tous les composants d'un mélange d'eaux.

V.6.1.4. Résultats de mesure et d'analyse des paramètres physico-chimiques des eaux

Les résultats des calculs et des analyses physico-chimiques des différentes eaux étudiées indiquent qu'il y a une grande variation de la concentration des éléments chimiques dans l'eau, ce qui entraîne des interprétations, des classifications et des évaluations singulières pour chaque eau. Dans cette optique, afin de mieux comprendre les résultats obtenus, nous exposons d'abord les normes d'eau potable adoptées par l'OMS et les normes algériennes, puis les normes de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (OAA ou FAO). Ensuite, nous exposons les valeurs utilisées pour les calculs et les analyses physico-chimiques dans le Tableau

V.1 de chaque type d'eau. Ensuite, nous procéderons à la discussion, à l'évaluation et à la comparaison des résultats de calcul et d'analyse de l'eau mélangée, de l'eau de rejet et de l'eau brute.

Tableau V.1. Résultats de la mesure et de l'analyse de l'eau.

Paramètres	El-oued			Touggourt			Ouargla		
	Rejet	Brutes	Mélange	Rejet	Brutes	Mélange	Rejet	Brutes	Mélange
Débit (m ³ /j)	7500	21859.26	29359.26	1000	7488,37	8488,37	6750	7864.15	14614.2
Salinité (g/l)	4.3	1.5	2.21	4.3	1.6	1.91	3.3	1.07	2.09
pH	7.56	7.05	7.18	7.8	7.6	7.62	7.86	8.15	8.01
CE (µs/cm)	7690	2790	4041.73	7620	2990	3535.45	6130	2149	3987.75
TDS (mg/l)	4922	1786	2587	3810	1985	2200	2867	1070	1900
TH (mg/l CaCO₃)	3000	740	1317.33	2800	1100	1300.27	1948	700	1276.43
Ca²⁺ (mg/l)	1166.33	188.37	438.20	893.78	140.8	229.50	425.65	140.28	272.08
Mg²⁺ (mg/l)	107.71	65.62	76.37	190.62	95.92	107.07	212.81	85.06	144.06
Na⁺ (mg/l)	1216.98	411	616.89	1080.8	376.31	459.30	778.91	200	467.38
K⁺ (mg/l)	282.47	32.47	96.33	170	31	47.37	96.8	14	52.24
SO₄²⁻ (mg/l)	3103.19	950	1500.04	2220	760	861.42	997	380	664.98
HCO₃⁻ (mg/l)	475.8	151.28	234.18	469.7	174.46	209.24	475.8	102.03	274.66
Cl⁻ (mg/l)	2020.82	475.07	869.94	1980	1410	1477.15	1207	414.45	780.51
NO₃⁻ (mg/l)	3.56	1.61	2.11	2.04	0.50	0.68	18.57	8.4	13.09

V.6.1.5. Interprétation des résultats

Selon le tableau V.1, il apparaît que :

V.6.1.5.1. La salinité

La salinité de l'eau brute, des eaux de rejet et de l'eau après mélange est illustrée dans la Figure V.2. Selon les données d'analyse, l'eau brute présente une forte salinité. Les eaux de rejet présentent une salinité très élevée. La salinité de l'eau après le mélange l'eau salée avec de l'eau souterraine est réduite. La Figure V.2 présente les valeurs de la salinité des divers échantillons.

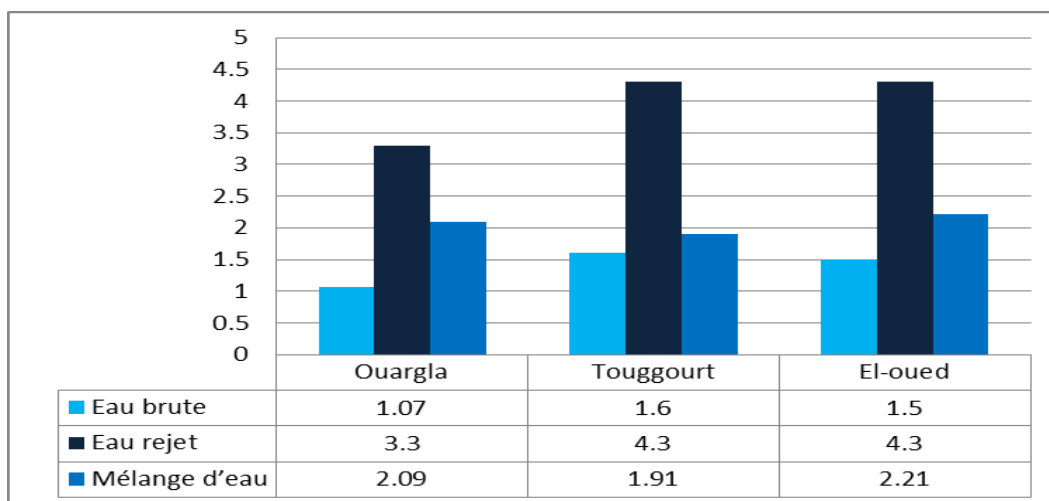


Figure V.2. Variation des valeurs de la salinité des eaux.

V.6.1.5.2. pH

Les résultats obtenus indiquent que les valeurs de pH des eaux brutes, des eaux de rejet et des eaux mitigées sont conformes aux normes d'eau potable des Nations Unies et aux normes algériennes. Le pH de l'eau mesurée était compris entre 6,5 et 8,5. Ces résultats ont été utilisés pour établir les normes de la FAO. Il a également constaté que le pH de l'eau est faiblement alcalin.

La Figure V.3 résume les valeurs du potentiel hydrogène (pH) des divers échantillons prélevés.

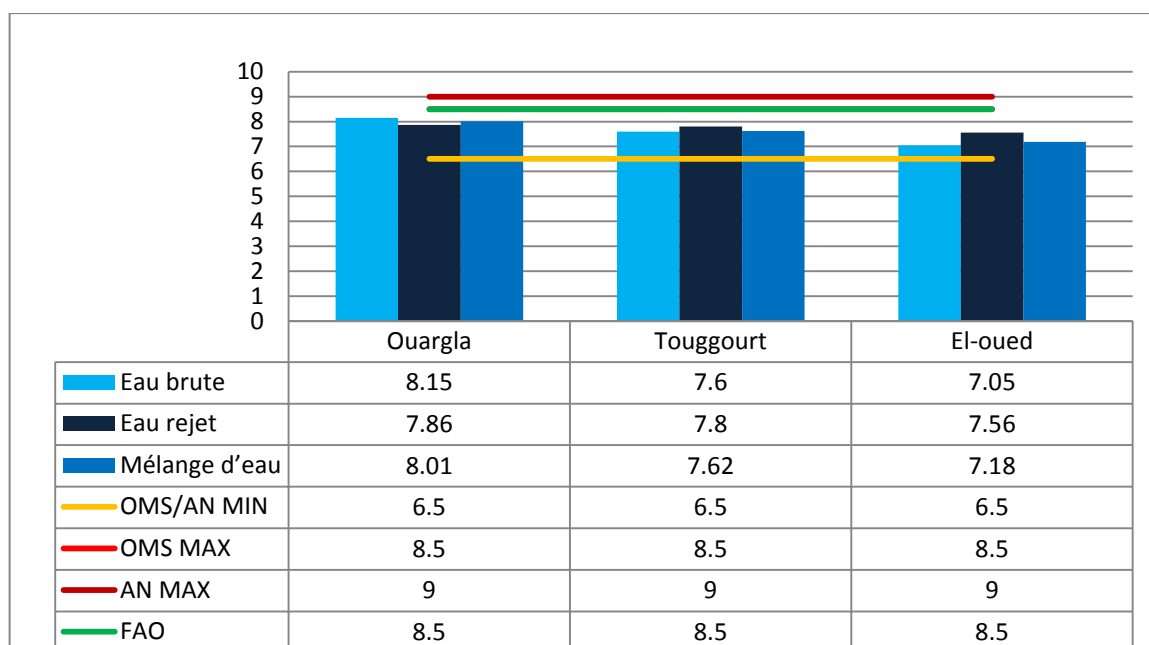


Figure V.3. Variation des valeurs de pH des eaux.

V.6.1.5.3. Conductivité électrique

La Figure V.4 illustre la fluctuation de la CE d'un échantillon d'eau analysé. L'illustration donne la disparité de la conductivité électrique entre l'eau brute, les eaux de rejet et l'eau après mélange. Les données d'analyse indiquent que la concentration en eau brute est élevée. Les eaux de rejet ont une CE très élevée. Une fois que l'eau de rejet est mélangée avec de l'eau souterraine, la conductivité de l'eau mélangée diminue, mais ses valeurs dépassent la norme d'eau potable de l'OMS et la norme algérienne. Ainsi, les analyses de la CE concernant le taux de déminéralisation de l'eau varient de 3540.4 à 4041.73 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Dans cette étude, notamment, nous avons constaté des résultats supérieurs à la recommandation de la FAO de 3000 S/cm pour les échantillons d'eau mélangée. Toutes les eaux de rejet de la zone d'étude ont des niveaux de CE supérieurs aux normes de la FAO et pour les eaux brutes de la région d'étude sont conformes aux normes de la FAO en termes de CE.

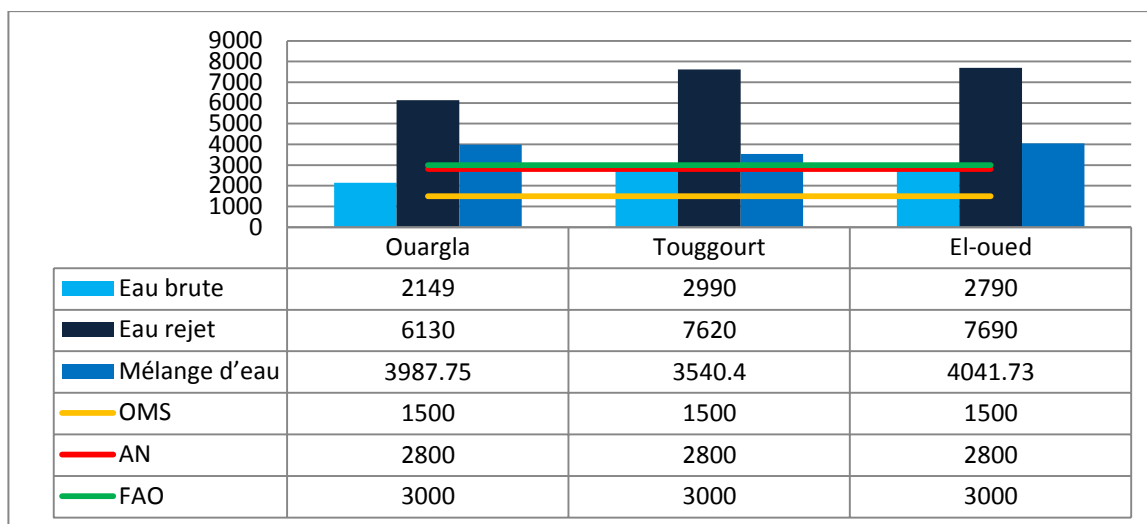


Figure V.4. Variation des valeurs de conductivité électrique des eaux.

V.6.1.5.4. Solides dissous totaux (TDS)

La figure V.5 illustre la disparité du TDS entre l'eau brute, l'eau rejet et l'eau mélangée. Selon les données d'analyse, il est observé que l'eau brute contient une quantité plus élevée de TDS. Le taux de TDS de l'eau de rejet est extrêmement élevé. Après avoir mélangé l'eau de rejet et l'eau souterraine, le taux de TDS de l'eau diminue après le mélange, mais dépasse les normes d'eau potable de l'OMS.

Les niveaux de TDS fluctuent entre 1900 et 2587 mg/L dans le mélange d'eau. On peut classer les échantillons d'eau mélangée en frais à modérément salés en fonction de la concentration en TDS. D'entre eux, Touggourt et El-oued dépassent les normes de la FAO en matière d'eau. Les eaux de rejet de toute la région d'étude dépassent les normes de la FAO. Les valeurs de TDS de toutes les eaux brutes de la région d'étude étaient conformes aux normes de la FAO.

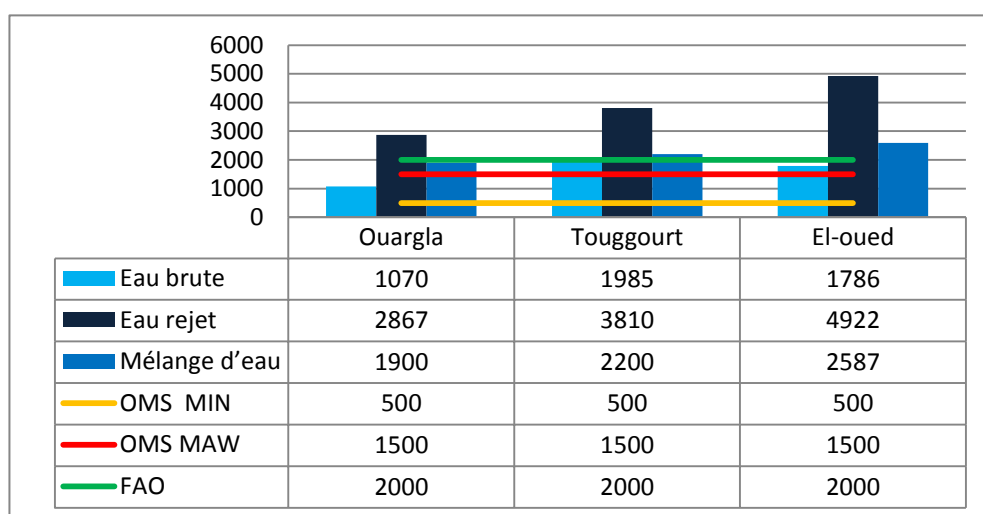


Figure V.5. Variation des valeurs TDS dans l'eau.

V.6.1.5.5. La dureté totale (TH)

Le graphique ci-dessous montre la différence de dureté totale de l'eau brute, des eaux de rejet et de l'eau mitigée. Les données d'analyse montrent que l'eau brute à une dureté totale est élevée, aisique la dureté totale de l'eau de rejet est très élevé. Après mélange de l'eau de rejet et de l'eau souterraine, la dureté totale de l'eau diminue, mais les valeurs restent supérieures aux normes de l'OMS et les normes algériennes. La figure V.6 montre la variation de la TH dans les échantillons d'eau étudiée.

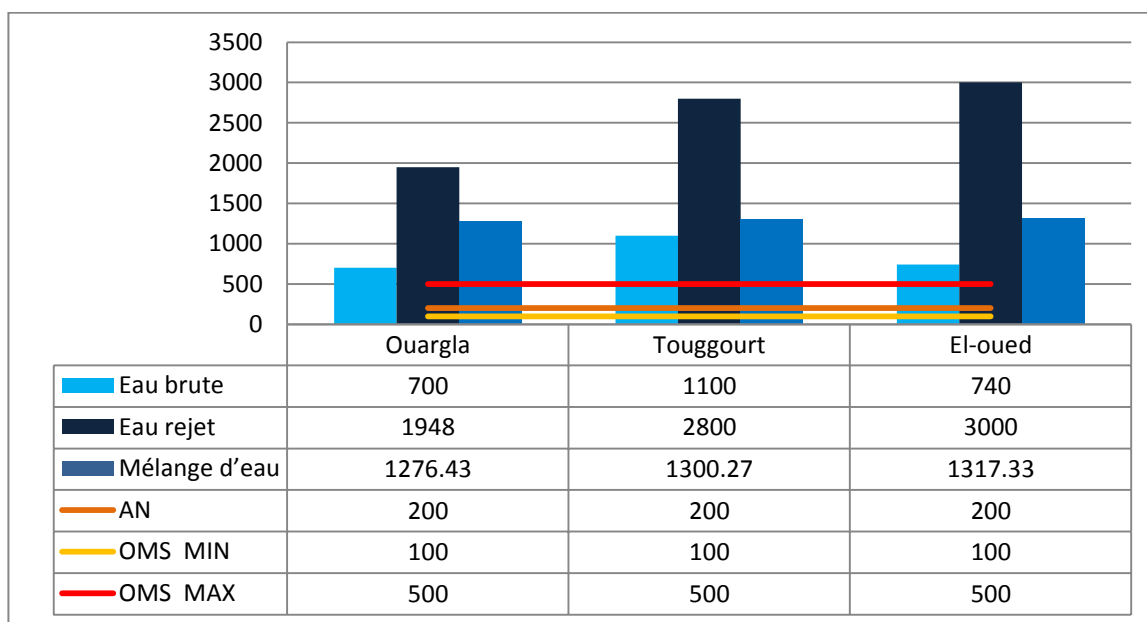


Figure V.6. Variation des valeurs de la dureté totale (TH) des eaux.

V.6.1.5.6. Calcium (Ca²⁺)

Le graphique ci-dessous montre la différence de la teneur en calcium entre l'eau brute, les eaux de rejet et l'eau mitigée. Les données analytiques montrent que l'eau brute à une teneur en calcium est élevée. Le calcium dans l'eau de rejet est très élevé. Après mélange d'eau de rejet et d'eau souterraine, calcium de l'eau diminue, mais le niveau dépasse les normes de l'OMS et les normes algériennes. La figure V.7 montre les changements de calcium dans divers échantillons des eaux étudiées.

Les niveaux de Ca²⁺ dans les échantillons d'eau mélange variaient de 229.5 à 438.2 mg/L et dans les échantillons d'eau rejet variaient de 425.65 à 1166.33 mg/L. Dans l'eau brute varie de 140.28 à 188.37 mg/L. La FAO fixe un seuil maximal acceptable de 400 mg/L pour l'eau d'irrigation.

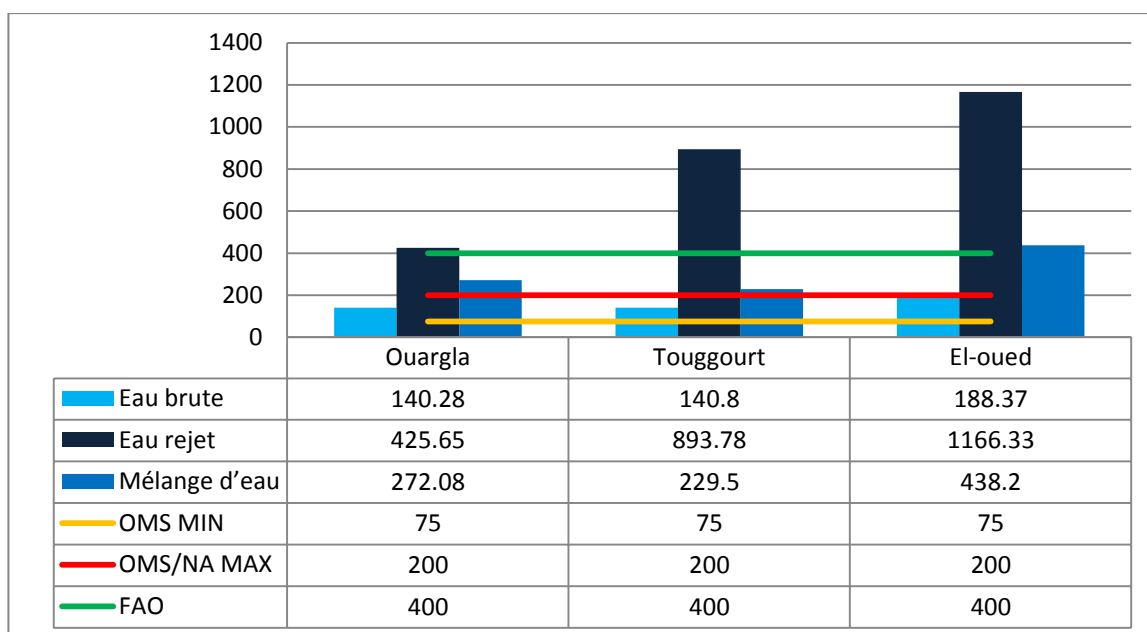


Figure V.7. Variation des valeurs de Calcium (Ca^{2+}) des eaux.

V.6.1.5.7. Magnésium (Mg^{2+})

Le graphique ci-dessous montre la différence de magnésium (Mg^{2+}) dans l'eau brute, les eaux de rejet et l'eau mitigée. L'eau brute présente une teneur élevée en magnésium. La proportion de Mg^{2+} dans les eaux de rejet est très élevée. Après avoir combiné l'eau de rejet et l'eau souterraine, la teneur en Mg^{2+} de l'eau est réduite et sa valeur est conforme aux critères de l'OMS et aux normes algériennes. La figure V.8 montre la variation de la teneur en Mg^{2+} d'échantillons provenant d'eau étudiée.

Toutes les concentrations de Mg^{2+} dans les eaux rejetées, l'eau brute et le mélange d'eau dans la région d'étude dépassent les normes de la FAO.

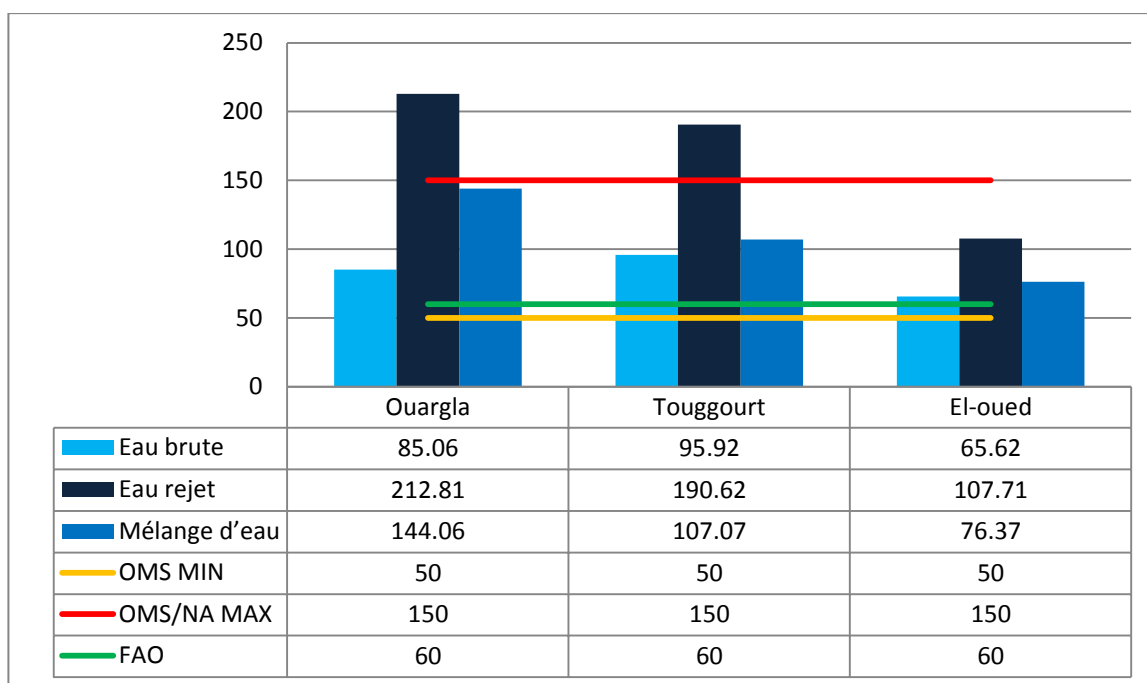


Figure V.8. Variation des valeurs de Magnésium (Mg²⁺) des eaux.

V.6.1.5.8. Sodium (Na⁺)

La figure V.9 montre la différence entre l'eau brute, les eaux de rejet et l'eau après mélange. Les données analytiques montrent que l'eau brute a une teneur en Na⁺ est élevée et l'eau rejetée a une teneur en sodium très élevée. Après mélange d'eau de rejet et d'eau souterraine, la teneur en sodium de l'eau est diminuée, mais la valeur dépasse les normes l'OMS et les normes algériennes.

La quantité de Na⁺ présente dans le mélange d'eau a fluctué entre 459.3 et 616.89 mg/L. Chaque échantillon d'eau analysé était en dessous de la limite de 919 mg/L établie par la FAO. Chaque échantillon d'eau brute analysé était en dessous de la limite de 919 mg/L établie par la FAO. D'entre eux, Touggourt et El-Oued dépassent les normes de la FAO en ce qui concerne les eaux rejetées. Les normes de la FAO sont respectées pour les eaux de rejet de la région d'Ouargla.

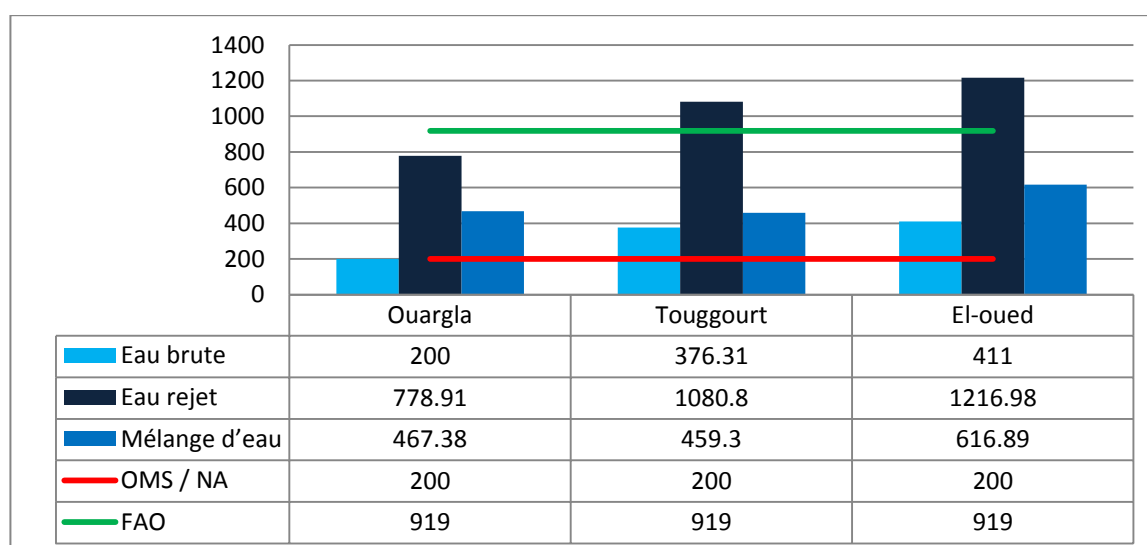


Figure V.9. Variation des valeurs de Sodium (Na⁺) des eaux.

V.6.1.5.9. Potassium (K⁺)

La Figure V.10 illustre la disparité de niveau de potassium entre l'eau brute, les eaux de rejet et l'eau mitigée. Selon les données d'analyse, on constate que l'eau brute contient une quantité importante de potassium. Les eaux de rejet contiennent une grande quantité de potassium. Lorsque l'eau de rejet et l'eau souterraine sont combinées, la quantité de potassium dans l'eau diminue, mais elle dépasse les normes de l'OMS et les normes algériennes.

Selon la norme de la FAO, la concentration maximale autorisée pour l'eau d'irrigation est de 2 mg/L. Dans la région d'étude, les concentrations de K⁺ de tous les échantillons d'eaux rejetées, d'eau brute et de mélange d'eau dépassent les critères. Les échantillons des eaux de rejet ont présenté les concentrations de potassium les plus élevées.

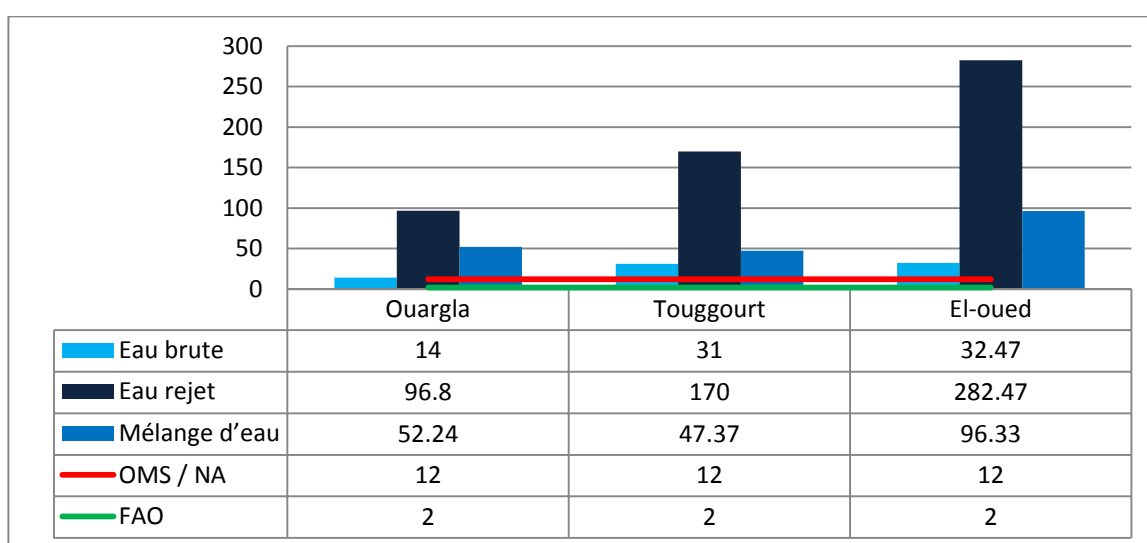


Figure V.10. Variation des valeurs de Potassium (K⁺) des eaux.

V.6.1.5.10. Sulfate (SO₄²⁻)

Les données d'analyse indiquent que l'eau brute présente une concentration élevée en sulfate par rapport aux eaux de rejet et à l'eau mélangée, comme le montre la figure V.11. Les eaux de rejet contiennent une grande quantité de sulfate. Une fois que l'eau de rejet et l'eau souterraine ont été mélangées, la quantité de sulfate dans l'eau diminue, mais elle dépasse les normes de l'OMS et les normes algériennes.

Dans cette étude, les niveaux de SO₄²⁻ conformes aux normes de la FAO variaient entre 664.98 à 861.42 mg/L dans la région d'Ouargla et Touggourt à l'exception de la station d'El-Oued.

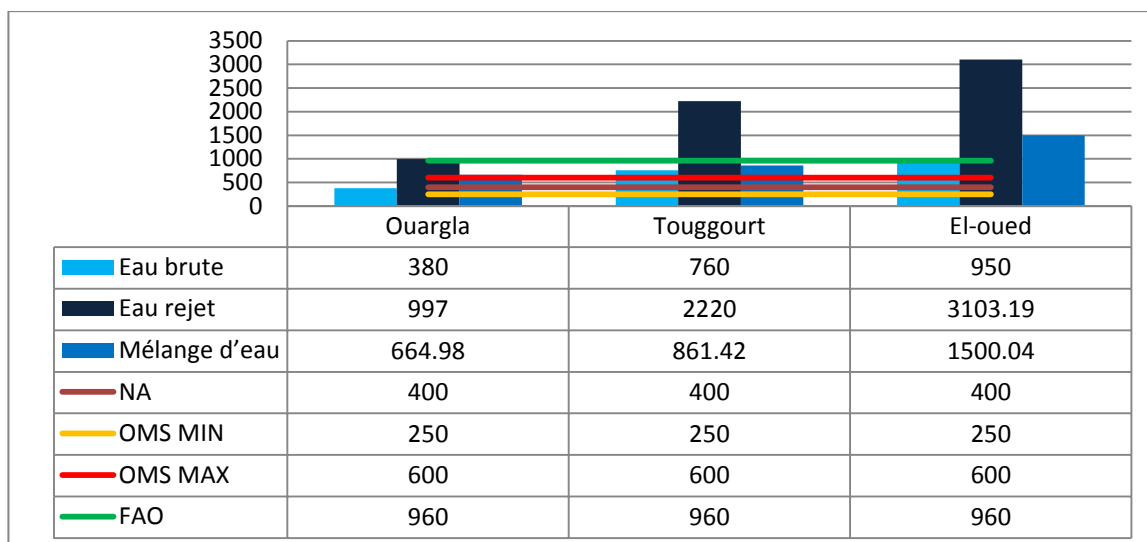


Figure V.11. Variation des valeurs de Sulfate (SO₄²⁻) des eaux.

V.6.1.5.11. Bicarbonates (HCO₃⁻)

La Figure V.12 illustre la disparité de concentration de bicarbonate dans l'eau brute, les eaux de rejet et l'eau mélangée. Les résultats de l'analyse indiquent que l'eau brute contient une forte teneur en bicarbonate. Le taux de bicarbonate présent dans les eaux de rejet est extrêmement élevé. En combinant l'eau de rejet et l'eau souterraine, les niveaux de bicarbonates de l'eau diminuent et sont inférieurs aux normes de l'OMS, tandis que cela révèle la teneur en bicarbonate des échantillons d'eaux étudiées.

Les directives de la FAO indiquent que la concentration de HCO₃⁻ doit être d'environ 610 mg/L. Néanmoins, les échantillons d'eau mélange prélevés dans la zone d'étude ont révélé des niveaux compris entre 209.24 et 274.66 mg/L, entre 102.03 et 174.46 mg/L dans l'eau brute et entre 469.7 et 475.08 mg/L dans l'eau rejet, qui se situent dans la fourchette spécifiée précédemment.

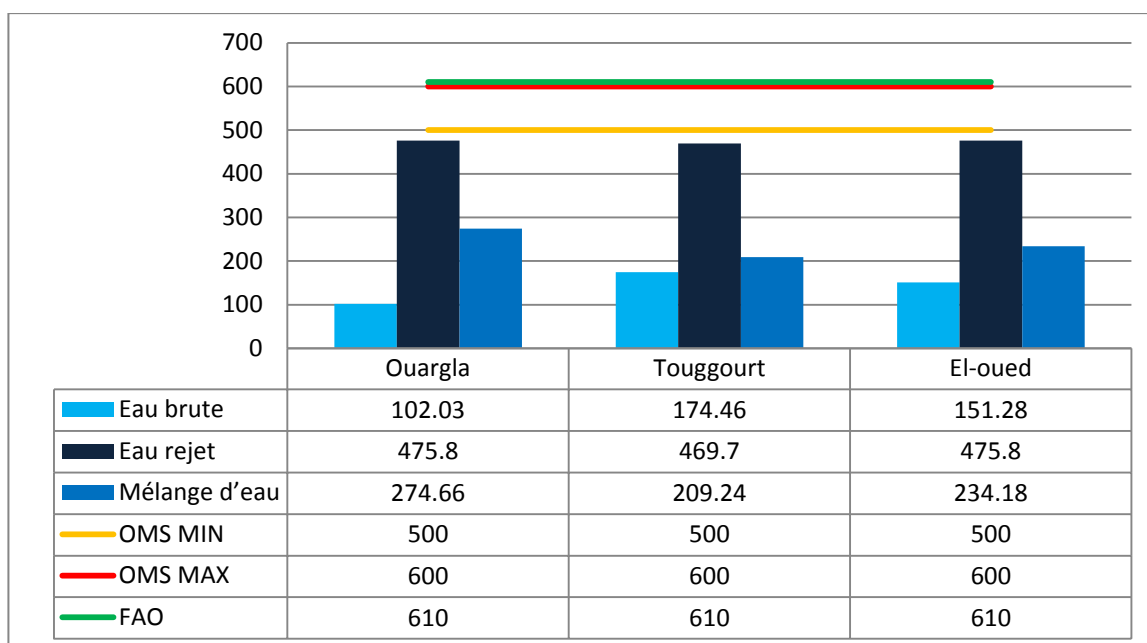


Figure V.12. Variation des valeurs de Bicarbonates (HCO₃⁻) des eaux.

V.6.1.5.12. Chlorures (Cl⁻):

La figure V.13 illustre le niveau de chlore entre l'eau brute, les eaux de rejet et l'eau mitigée. Selon les résultats d'analyse, il est observé que l'eau brute contient une quantité élevée de chlore. On observe une forte concentration de chlorure d'eau de rejet. Lorsque l'eau de rejet est mélangée avec l'eau souterraine, les niveaux de chlorures de l'eau diminuent après le mélange, mais ils dépassent les normes de l'OMS et les normes algériennes.

La concentration de Cl⁻ doit être d'environ 1036 mg/L, conformément aux recommandations de la FAO. Les échantillons d'eau brute et de mélange d'eau, collectés dans la région d'Ouargla et El-Oued, ont toutefois démontré qu'ils répondent aux critères de la FAO.

Les prélèvements d'eau brute, de l'eau rejet et de mélange d'eau effectués dans la zone de Touggourt ne respectent pas les critères de la FAO.

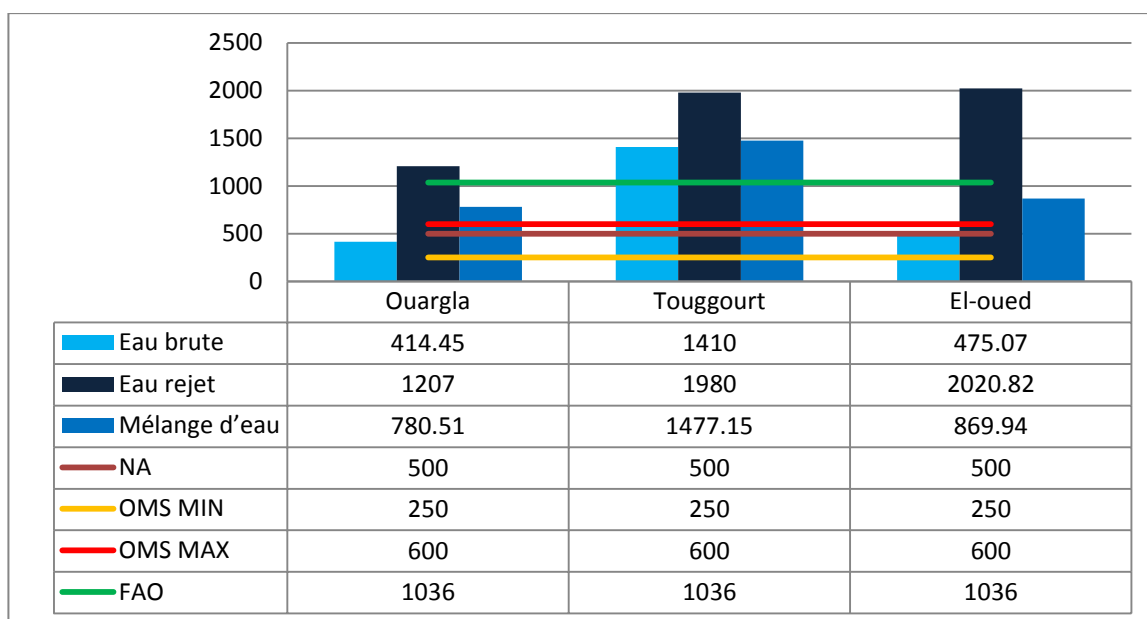


Figure V.13. Variation des valeurs de Cl⁻ des eaux.

V.6.1.5.13. Nitrate (NO₃⁻):

Le graphique ci-dessous montre la différence de concentration en NO₃⁻ dans l'eau brute, les eaux de rejet et l'eau après mélange. Les données analytiques montrent que l'eau brute a une concentration élevée en nitrate et la teneur en NO₃⁻ des eaux de rejet est très élevée. Après mélange eau de rejet et eau souterraine, la teneur en nitrate est réduite. Les valeurs trouvées sont comparables aux normes de l'OMS et les normes algériennes.

Les concentrations de NO₃⁻ étaient variables entre 0,5 et 3,56 mg/L dans les échantillons d'eau analysés dans la région d'El-Oued et Touggourt. Ces niveaux sont en dessous de la plage recommandée par la FAO (10 mg/L), mais les échantillons d'eau mélangée et l'eau rejetée dans la région d'Ouargla ne respectent pas les critères de la FAO, à l'exception de l'eau brute.

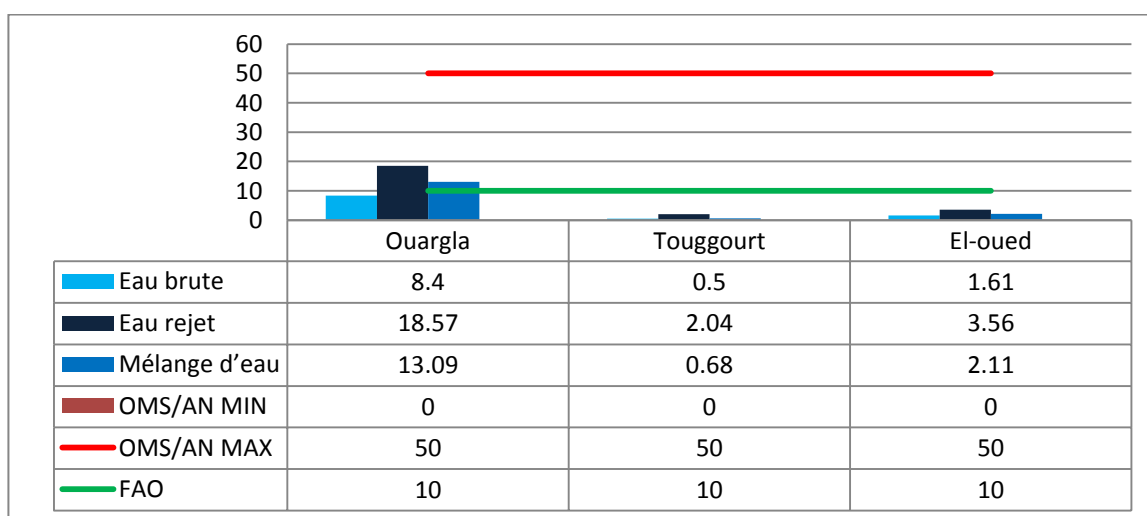


Figure V.14. Variation des valeurs des nitrates des eaux.

V.6.1.6. Calcul des indicateurs d'évaluation de la qualité de l'eau pour l'irrigation

Chaque type d'eau (eau brute, eau de rejet et eau mitigée) possède une salinité qui correspond à sa concentration totale en sels dissous. Le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, le chlorure, le sulfate et le bicarbonate sont les sels qui contribuent à la salinité de l'eau. La salinité élevée indique que l'eau renferme de nombreux ions, ce qui rend l'absorption de l'eau et des minéraux difficile pour les plantes. La présence d'une salinité excessive peut provoquer des brûlures aux racines.

Il existe deux façons de mesurer la salinité, l'une par le total des solides dissous (TDS) exprimé en mg/L et l'autre par la conductivité électrique exprimée en ms/cm. Toute l'eau utilisée pour l'irrigation contient des sels dissous. Certains sont utiles même lorsqu'ils sont très haut dans l'eau. Certains sont utiles à faible dose mais deviennent nocifs à des niveaux plus élevés, d'autres sont nocifs. Les facteurs qui déterminent la qualité de l'eau nécessaire à l'agriculture sont: la salinité de l'eau, le sodium, l'alcalinité, le pH et enfin la concentration des éléments toxiques pour les plantes.

On a évalué la qualité du mélange d'eau, d'eau brute et d'eau de rejet en comparant avec les consignes d'irrigation établies. La salinité et la teneur en sodium sont considérées comme les principaux facteurs d'évaluation de l'eau d'irrigation (**Sebei et al. 2018**). Il est essentiel de prendre en compte la qualité de l'eau d'irrigation, car elle a un impact sur les plantes et le sol. La présence d'une forte salinité de l'eau peut entraîner des modifications dans la perméabilité, la structure et l'aération du sol.

Le drainage joue un rôle crucial dans le développement des plantes. Les plantes qui bénéficient d'un bon drainage se développent favorablement, tandis que celles qui sont mal drainées se développent de manière inefficace. Afin d'évaluer la possibilité de réutilisation de l'eau mélangée dans l'irrigation, il est essentiel de prendre en compte différentes caractéristiques de l'eau d'irrigation. Pour accomplir cela, on peut prendre en compte le rapport d'absorption du sodium (SAR), l'indice de perméabilité (PI), l'indice de Kelly (KI) et le pourcentage de solubilité du sodium (SSP ou N%), le résidu de carbonate de sodium (RSC), le risque de magnésium (MH) et l'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IQEI). Le calcul et l'interprétation des indicateurs de qualité de l'eau pour l'irrigation ont été effectués. Les indices SAR, SSP, Na%, CSR, MH%, PI% et IQEI, afin de déterminer si l'eau est adaptée à l'irrigation. Les valeurs calculées des indicateurs sont indiquées dans le tableau V.5.

Tableau V.5. Les valeurs calculées des indicateurs.

Les stations	Type d'eau	SAR	PI %	SSP/Na%	KI	RSC	MH %	IQEI
El-oued	Rejet	9.12	49	44	0.78	-59.37	13	13.68
	Brutes	6.56	60	54	1.2	-12.33	36	26.12
	Mélange	7.14	54	48	0.95	-24.36	22	18.73
Touggourt	Rejet	8.55	48	43	0.77	-52.66	25	13.68
	Brutes	5.98	58	52	1.09	-12.07	52	30.84
	Mélange	6.26	55	49	0.98	-16.85	43	18.73
Ouargla	Rejet	7.68	52	46	0.87	-30.99	45	13.68
	Brutes	3.28	44	38	0.62	-12.34	49	37.98
	Mélange	5.69	50	44	0.79	-20.94	46	18.41

V.6.1.7. L'évaluation de qualité de l'eau pour d'irrigation par indicateurs d'irrigation

En comparant la qualité de l'eau aux normes d'irrigation, il est possible de déterminer si le mélange d'eau est adapté pour l'irrigation. On atteint cet objectif en calculant et en interprétant le ratio d'absorption de sodium (SAR), le RSC, le PI %, le KI, le MH %, le Na % ou le SSP et l'IQEI. Les échantillons d'eau à l'étude sont classés en fonction de divers paramètres identifiés dans les tableaux V.6.7 et 8.

Tableau V.6. Classification des échantillons d'eau étudiés selon différents paramètres pour la station d'El-Oued.

Eau \ Indice	Rejet		Brute		Mélange	
	Valeur	Classe	Valeur	Classe	Valeur	Classe
SAR	9.12	Excellente	6.56	Excellente	7.14	Excellente
PI %	49	classe II adapté	60	classe II adapté	54	classe II adapté
SSP/Na%	44	admissibles	54	admissibles	48	admissibles
KI	0.78	bonne	1.2	impropre à l'irrigation	0.95	bonne
RSC	-59.37	adaptée à	-12.33	adaptée à	-24.36	adaptée à

		l'irrigation		l'irrigation		l'irrigation
MH %	13	sûre pour l'irrigation	36	sûre pour l'irrigation	22	sûre pour l'irrigation
IQEI	13.68	Restriction sévère (RS)	26.12	Restriction sévère (RS)	18.73	Restriction sévère (RS)

Tableau V.7. Classification des échantillons d'eau étudiés selon différents paramètres pour la station de Touggourt.

Eau \ Indice	Rejet		Brute		Mélange	
	Valeur	Classe	Valeur	Classe	Valeur	Classe
SAR	8.55	Excellente	5.98	Excellente	6.26	Excellente
PI %	48	classe II adapté	58	classe II adapté	55	classe II adapté
SSP/Na%	43	admissibles	52	admissibles	49	admissibles
KI	0.77	bonne	1.09	impropre à l'irrigation	0.98	bonne
RSC	-52.66	adaptée à l'irrigation	-12.07	adaptée à l'irrigation	-16.85	adaptée à l'irrigation
MH %	25	sûre pour l'irrigation	52	n'est pas apte pour l'irrigation.	43	sûre pour l'irrigation
IQEI	13.68	Restriction sévère (RS)	30.84	Restriction sévère (RS)	18.73	Restriction sévère (RS)

Tableau V.8. Classification des échantillons d'eau étudiés selon différents paramètres pour la station d'Ouargla.

Eau \ Indice	Rejet		Brute		Mélange	
	Valeur	Classe	Valeur	Classe	Valeur	Classe
SAR	7.68	Excellente	3.28	Excellente	5.69	Excellente
PI %	52	classe II adapté	44	classe II adapté	50	classe II adapté
SSP/Na%	46	admissibles	38	bonne	44	admissibles
KI	0.87	bonne	0.62	bonne	0.79	bonne
RSC	-30.99	adaptée à l'irrigation	-12.34	adaptée à l'irrigation	-20.94	adaptée à l'irrigation

MH %	45	sûre pour l'irrigation	49	sûre pour l'irrigation	46	sûre pour l'irrigation
IQEI	13.68	Restriction sévère (RS)	37.98	Restriction sévère (RS)	18.41	Restriction sévère (RS)

D'après les résultats du calcul de l'indice de perméation (PI), les échantillons d'eau provenant des trois stations étudiées sont classés dans la classe II "**adaptée**" pour l'irrigation. D'après les valeurs de KI obtenues, tous les échantillons d'eau des trois stations étudiées étaient classés en classe I ($KI < 1$), ce qui en fait des eaux de qualité, à l'exception de l'eau brute des stations d'El-Oued et Touggourt qui est impropre à l'irrigation ($KI > 1$). D'après les valeurs de Na% obtenues, tous les échantillons d'eau provenant des trois stations étudiées sont classés 3 ($40 < Na\% < 60$) et sont appropriés pour l'irrigation, à l'exception de l'eau brute de la station Ouargla qui est acceptable pour l'irrigation ($20 < Na\% < 40$). Le diagramme de Wilcox (1955) a été utilisé pour classer les échantillons d'eau brute des stations d'El-Oued, Touggourt et Ouargla comme ayant des utilisations douteuses pour l'irrigation (**Abdelghani et al. 2001**). En revanche, les eaux de rejet et des eaux après mélange des trois stations ont été jugés inadaptes (Figure V.15).

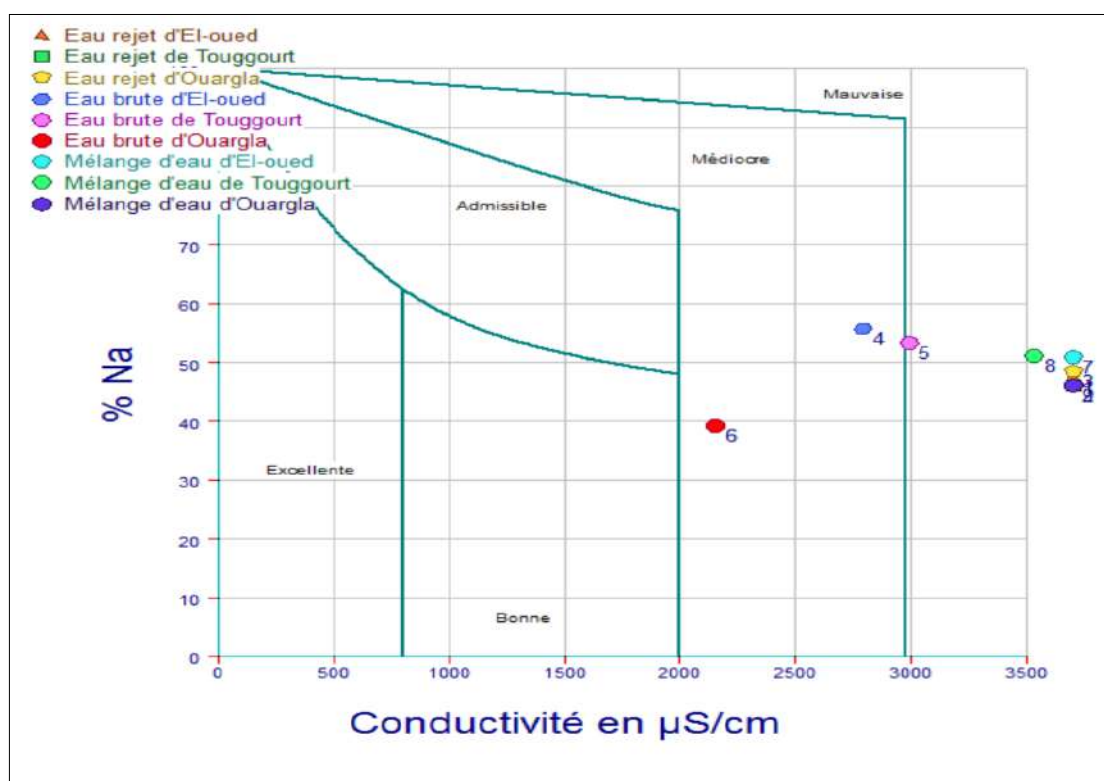


Figure V.15. Diagram de wilcox pour les trois types de l'eau.

Les échantillons d'eau des trois stations étudiées ont tous été classés dans la classe 1 (<10), ce qui les rend excellents pour l'irrigation.

Les valeurs de sodium absorption ratio (SAR) par rapport aux valeurs de conductivité électrique (EC) pour nos échantillons sont représentées par le graphique USSL (Figure V.16). D'après le schéma USSL, les stations d'El-Oued et Touggourt sont classées dans le groupe C4-S2 (très saline avec une teneur moyenne en sodium). De plus, l'eau brute de la station d'Ouargla fait partie du groupe C3-S1 (qui présente une salinité élevée avec une faible concentration sodique). Les eaux de rejet des trois stations ne sont cependant pas classées et ne conviennent pas à l'irrigation. Les eaux provenant des stations El-Oued, Touggourt et Ouargla sont classées dans le groupe C4-S2 (très saline avec une teneur moyenne en sodium). La salinité de ces échantillons d'eau brute et mélangée était élevée à très élevée et le risque alcalin était faible à modéré. D'après le schéma USSL, il est possible d'utiliser les échantillons d'eau brute et d'eau mélangée pour l'irrigation dans tous les types de sols.

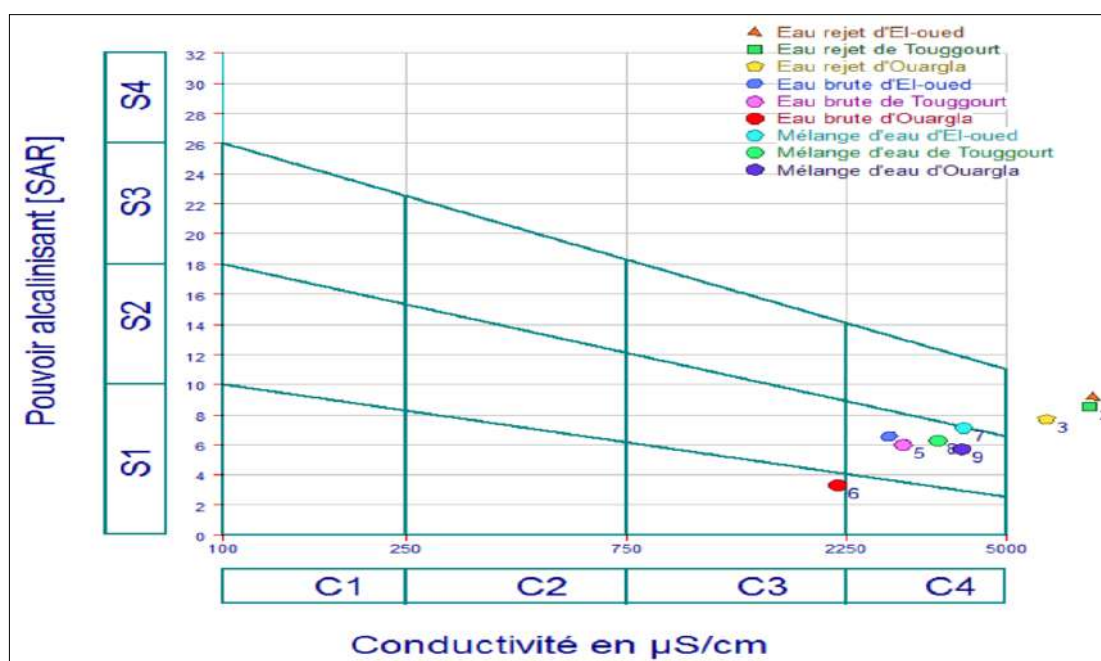


Figure V.16. Diagram USSL pour la classification de l'eau pour l'irrigation.

D'après les valeurs de RSC obtenues, tous les échantillons d'eau provenant des trois stations étudiées ont été identifiés comme étant de la classe 1 ($RSC < 1,25$), ce qui correspond à une eau appropriée pour l'agriculture. D'après les valeurs de MH obtenues, tous les échantillons d'eau des trois stations étudiées ont été classés dans la classe 2 ($MH\% < 50\%$), ce qui les rend sûrs pour l'irrigation. Cependant, l'eau brute de la station de Touggourt n'est pas homologuée pour l'irrigation ($MH\% > 50\%$). L' IQEI en fonction d'IQEI a été utilisé pour classer et définir les classes

appropriées pour les problèmes de salinité, la réduction de l'infiltration de l'eau dans le sol, ainsi que sur la toxicité des plantes. Tous les échantillons d'eau des trois stations étudiées sont classés dans la classe 5 ($0 < IQEI < 40$) selon la classification donnée par **Meireles et al. (2010)** et les valeurs IQEI obtenues. C'est une eau qui est classée « restriction sévère RS » pour l'irrigation et qui peut être utilisée sur des sols très poreux. Heureusement, le territoire étudié se trouve dans un désert à sols très sablonneux. Ainsi, il est possible d'utiliser l'eau pour l'irrigation après mélange en fonction du type de plante.

V.6.1.8. Exploitation du mélange d'eau pour l'irrigation agricole

La région d'étude étant un désert à sol très perméable (sable), il est possible d'utiliser des mélanges d'eau pour l'irrigation, mais avec des contraintes sur les types de plantes. Le mélange d'eau peut servir à l'irrigation des palmiers. Effectivement, les palmiers dattiers peuvent supporter une salinité du sol de 4 dS/m sans perdre de productivité. Les plantations de palmiers sont très répandues dans les oasis méridionales algériennes du désert du Sahara, comme El-Oued, Touggourt et Ouargla. La culture des palmiers occupe également une place importante dans la région d'étude. La station d'El-oued fournit une quantité d'eau mélangée de 29359,26 m³/jour, ce qui est assez pour arroser 679,6 hectares de palmiers.

La station de Touggourt produit un volume d'eau mélangée de 8488,37 m³/jour, ce qui permet d'arroser 196,48 hectares de palmiers. Le débit quotidien d'eau après mélange de la station d'Ouargla est de 14614.2 m³/jour, ce qui est assez pour irriguer 338,27 hectares de palmiers.

V.6.2. La méthode de dilution de la saumure (La partie expérimentale)

Suite à une diminution de la salinité de rejet saumure et à un calcul des éléments physico-chimiques du mélange d'eau en utilisant la loi des concentrations, nous avons effectué une réduction de la salinité de rejet saumure en laboratoire et analysé le mélange d'eau afin d'obtenir les éléments physico-chimiques du mélange d'eau.

V.6.2.1. Le principe d'expérience

Des prélèvements d'eau souterraine et de solution saline ont été effectués, étudiés en laboratoire et les données ont été collectées. Les échantillons d'eau salée ont été dilués par l'ajout des eaux souterraines afin de gérer leurs concentrations en sel. Les échantillons ont été dilués neuf fois et dans différentes proportions entre 0 et 100 % d'eau salée, et 100 et 0 % d'eau souterraine, par étapes de 10 % - c'est-à-dire, 1:9, 2:8, 3:7, 4:6, 5:5, 6:4, 7:3, 8:2, 9:1 (Figure V.17). Les proportions de l'eau souterraine et de l'eau salée étaient mesurées dans des récipients en verre gradués, puis les proportions étaient mélangées dans un récipient pour rendre la solution homogène. Une fois que l'eau a été obtenue, l'analyse de la saumure a été réalisée dans un laboratoire et les résultats ont été

collectés. Finalement, on effectue le calcul et la discussion des indices de qualité de l'eau d'irrigation.

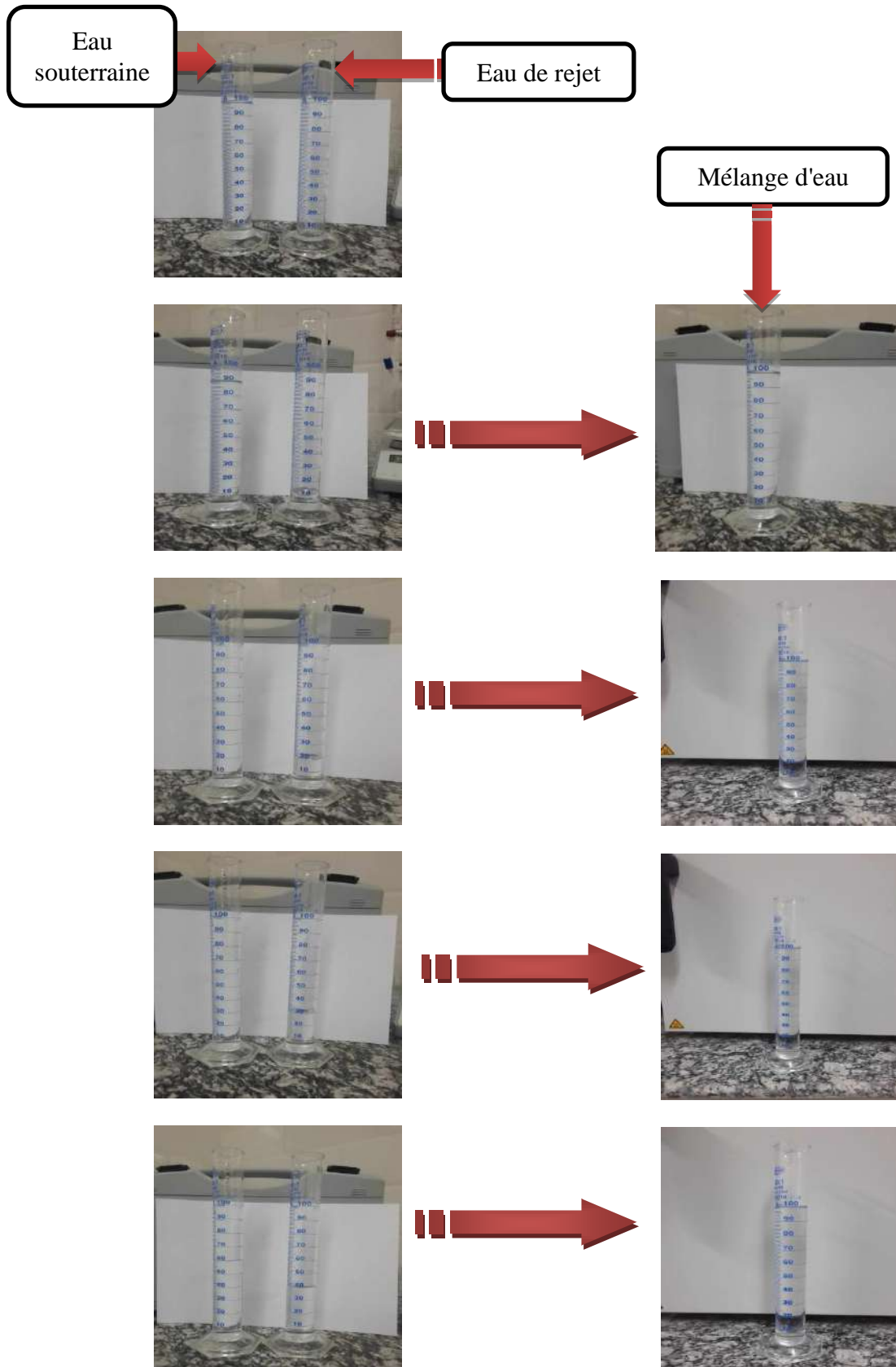






Figure V.17. Expérience de la dilution de l'eau de rejet en utilisant les eaux souterraines.

V.6.2.2. Résultats d'analyse physico-chimiques d'eau pour différents taux de dilution

Après avoir obtenu le mélange d'eau, le processus d'analyse de la saumure a été effectué dans un laboratoire et les résultats ont été recueillis dans les tableaux V.9, 10 et 11.

Tableau V.9. Résultats des analyses du mélange d'eau pour différents taux de dilution pour la station d'El-oued.

Taux de dilution (eaux souterraines : eau rejet)	pH	CE $\mu\text{s/cm}$	TDS (mg/l)	Ca^{2+} (mg/l)	Mg^{2+} (mg/l)	Na^+ (mg/l)	K^+ (mg/l)	Cl^- (mg/l)	SO_4^{2-} (mg/l)	HCO_3^- (mg/l)
Normes FAO	8.5	3000	2000	400	60	919	2	1036	960	610
10-0	7.05	2790	1786	188.2	65.61	410.78	32.37	475.06	949.92	150.71
9-1	7.06	2969.94	1901	224	67.06	440.22	41.34	531.70	1028.63	162.30
8-2	7.09	3177.09	2033	265.4	68.89	474.26	51.87	596.84	1119.84	176.33
7-3	7.11	3418.15	2188	313.4	70.95	514.05	64.35	672.95	1225.44	192.20
6-4	7.14	3702.16	2369	370.2	73.38	560.74	78.78	762.51	1350.24	211.11
5-5	7.18	4041.73	2587	438	76.30	616.63	95.94	869.77	1499.52	233.08
4-6	7.22	4454.94	2851	520.4	79.82	684.48	117	1000.05	1680.96	260.54
3-7	7.27	4968.65	3180	623	84.19	769.11	143.52	1162.18	1907.04	294.71
2-8	7.34	5624.59	3600	753.8	89.91	876.99	176.67	1368.91	2195.04	338.03
1-9	7.43	6491.35	4154	926.8	97.32	1019.58	221.13	1642.20	2575.68	395.38
0-10	7.56	7690	4922	1166.2	107.64	1216.92	282.36	2020.63	3102.72	475.32

Tableau V.10. Résultats des analyses du mélange d'eau pour différents taux de dilution pour la station de Touggourt.

Taux de dilution (eaux souterraines : eau rejet)	pH	CE $\mu\text{s/cm}$	TDS (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ³⁻ (mg/l)
Normes FAO	8.5	3000	2000	400	60	919	2	1036	960	610
10-0	7.6	2990	1985	140.8	95.86	376.28	30.81	1409.98	759.84	173.89
9-1	7.6	3057.69	2011	151.8	97.2	386.40	32.76	1418.12	780.96	178.16
8-2	7.6	3139.57	2043	165	98.90	398.82	35.1	1428.39	806.87	183.05
7-3	7.61	3240.63	2083	181.4	100.96	414.23	38.22	1440.78	838.56	189.76
6-4	7.61	3368.49	2134	202.2	103.51	433.78	42.12	1456.35	878.87	197.69
5-5	7.62	3535.45	2200	229.4	106.92	459.08	46.8	1476.88	931.68	208.67
4-6	7.63	3762.66	2289	266.4	111.65	493.80	53.81	1504.85	1003.19	222.71
3-7	7.64	4089.94	2418	319.6	118.34	543.49	63.56	1545.20	1106.4	243.45
2-8	7.66	4602.06	2620	402.8	128.79	621.46	78.78	1608.22	1268.16	276.40
1-9	7.7	5517.23	2981	551.59	147.50	760.61	106.47	1720.79	1556.63	334.98
0-10	7.8	7620	3810	893.6	190.51	1080.77	169.64	1979.92	2220	469.21

Tableau V.11. Résultats des analyses du mélange d'eau pour différents taux de dilution pour la station d'Ouargla.

Taux de dilution (eaux souterraines : eau rejet)	pH	CE $\mu\text{s/cm}$	TDS (mg/l)	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	HCO ₃ ³⁻ (mg/l)
Normes FAO	8.5	3000	2000	400	60	919	2	1036	960	610
10-0	8.15	2149	1070	140.2	85.05	199.86	13.64	414.17	379.68	101.89
9-1	8.12	2495.60	1226	165	96.10	250.24	20.67	482.85	432.96	134.23
8-2	8.09	2852.32	1387	190.6	107.52	301.99	28.08	554.01	488.64	167.79
7-3	8.07	3219.60	1553	216.8	119.31	355.34	35.88	627.28	545.28	201.96
6-4	8.04	3597.90	1724	244	131.46	410.55	43.68	702.33	604.31	237.35

5-5	8.01	3987.74	1900	272	143.97	467.13	51.87	780.21	664.31	273.96
4-6	7.98	4389.66	2081	300.79	156.85	525.55	60.06	860.22	726.72	311.79
3-7	7.95	4804.21	2268	330.4	170.1	585.81	69.03	942.70	791.04	350.84
2-8	7.92	5232.02	2461	361.2	183.82	648.14	77.61	1027.66	857.28	390.50
1-9	7.89	5673.72	2661	392.8	198.04	712.31	86.97	1115.80	925.92	431.99
0-10	7.86	6130	2867	425.6	212.74	778.78	96.72	1206.78	996.96	475.32

V.6.2.3. Interprétation des résultats

D'après les tableaux V.9;10;11, on constate que:

V.6.2.3.1. PH

Les résultats obtenus montrent que les eaux mitigées des stations ont des valeurs de pH correspond aux normes d'eau irrigation selon de la FAO. L'eau mesurée avait un pH compris entre 7,05 et 8,15. La valeur du pH a également montré que l'eau était peu alcaline.

V.6.2.3.2. Conductivité électrique

Les résultats obtenus indiquent que les eaux mélangées de la station d'El-Oued respectent les normes d'eau d'irrigation établies par la FAO avec des rapports de dilution de 9:1. Les taux de dilution restants dépassent les critères de la FAO.

En tous les rapports de dilution, les eaux mélangées de la station de Touggourt dépassent les normes d'eau d'irrigation établies par la FAO.

La station d'Ouargla a des eaux mélangées qui respectent les normes d'eau d'irrigation établies par la FAO avec des rapports de dilution de 9:1, 8:2. Les taux de dilution restants dépassent les critères de la FAO.

V.6.2.3.3. Solides dissous totaux (TDS)

Les résultats obtenus montrent que les eaux mélangées de la station d'El-Oued correspondent aux normes d'eau d'irrigation selon la FAO lorsque les rapports de dilution étaient de 9:1. Les rapports de dilution restants sont supérieurs aux normes de la FAO.

Les eaux mélangées de la station de Touggourt supérieurs aux normes d'eau d'irrigation selon la FAO en tous les rapports de dilution.

Les eaux mélangées de la station d'Ouargla correspondent aux normes d'eau d'irrigation selon la FAO lorsque les rapports de dilution étaient de 9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5. Les rapports de dilution restants sont supérieurs aux normes de la FAO.

V.6.2.3.4. Calcium (Ca^{2+})

Selon les résultats, il est démontré que les eaux mélangées de la station d'El-Oued respectent les normes d'eau irrigation établies par la FAO, avec des rapports de dilution de 9:1, 8:2, 7:3, 6:4. Les niveaux restants de dilution dépassent les normes de la FAO.

Selon la FAO, les eaux mélangées de la station de Touggourt respectent les normes d'eau irrigation avec des rapports de dilution de 9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5, 4:6, 3:7. Les niveaux restants de dilution dépassent les normes de la FAO.

Selon la FAO, les eaux mélangées de la station d'Ouargla respectent les normes d'eau irrigation en tous les rapports de dilution.

V.6.2.3.5. Magnésium (Mg^{2+})

Les résultats obtenus montrent que les eaux mélangées des stations ont des valeurs de magnésium supérieures aux normes d'eau d'irrigation selon la FAO.

V.6.2.3.6. Sodium (Na^+)

Les résultats obtenus montrent que les eaux mélangées de la station d'El-oued correspondent aux normes d'eau irrigation selon de la FAO lorsque les rapports de dilution étaient de 9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5, 4:6, 3:7, 2:8. Les rapports de dilution restants sont supérieurs aux normes de la FAO.

Les eaux mélangées de la station de Touggourt correspondent aux normes d'eau irrigation selon de la FAO en tous les rapports de dilution.

Les eaux mélangées de la station d'Ouargla correspondent aux normes d'eau irrigation selon de la FAO en tous les rapports de dilution.

V.6.2.3.7. Potassium (K^+)

Les résultats obtenus montrent que les eaux mélangées des stations ont des valeurs de potassium supérieures aux normes d'eau d'irrigation selon la FAO.

V.6.2.3.8. Chlorures (Cl^-)

Les résultats obtenus montrent que les eaux mélangées de la station d'El-Oued correspondent aux normes d'eau d'irrigation selon la FAO lorsque les rapports de dilution étaient de 9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5, 4:6. Les rapports de dilution restants sont supérieurs aux normes de la FAO.

En tous les rapports de dilution, les eaux mélangées de la station de Touggourt dépassent les normes d'eau d'irrigation établies par la FAO.

Les eaux mélangées de la station d'Ouargla correspondent aux normes d'eau d'irrigation selon la FAO lorsque les rapports de dilution étaient de 9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5, 4:6, 3:7, 2:8. Les rapports de dilution restants sont supérieurs aux normes de la FAO.

V.6.2.3.9. Sulfate (SO_4^{2-})

On constate que les eaux mélangées de la station d'El-Oued dépassent les normes d'eau d'irrigation établies par la FAO dans tous les rapports de dilution.

Selon la FAO, les eaux mélangées de la station de Touggourt respectent les normes d'eau d'irrigation avec des rapports de dilution de 9:1, 8:2, 7:3, 6:4, 5:5. Les niveaux restants de dilution dépassent les normes de la FAO.

Selon la FAO, les eaux mélangées de la station d'Ouargla respectent les normes d'eau d'irrigation en tous les rapports de dilution.

V.6.2.3.10. Bicarbonates (HCO_3^-)

Les résultats obtenus indiquent que les valeurs de bicarbonates dans les eaux mélangées des stations sont conformes aux normes d'eau d'irrigation établies par la FAO.

V.6.2.4. Résultats du calcul des indicateurs de qualité de l'eau pour différents taux de dilution

Lorsque le mélange d'eau a été obtenu, on a effectué le calcul du SAR, de RSC, PI, du MH %, du Na % et du KI pour l'eau salée après réduction de la concentration pour tous les rapports. Les résultats du calcul des indicateurs de qualité de l'eau pour différents taux de dilution sont présentés dans les tableaux V.12,13 et 14.

Tableau V.12. Résultats du calcul des indicateurs de qualité de l'eau pour différents taux de dilution cas de la station El-Oued

Taux de dilution (eaux souterraines : eau rejet)	Indicateurs						
	SAR	MH%	Na%	KI	RSC	PI	IWOI
10-0	6.54	36	54	1.2	-12.34	0.60	26.12
9-1	6.62	33.01	53.37	1.14	-14.06	0.59	26.12
8-2	6.71	29.93	52.12	1.08	-16.05	0.57	18.73
7-3	6.81	27.15	50.95	1.03	-18.36	0.56	18.73
6-4	6.95	24.60	49.82	0.99	-21.09	0.55	18.73
5-5	7.24	22.94	51.67	0.97	-23.55	0.55	18.73
4-6	7.37	20.15	50.13	0.91	-28.32	0.53	18.73

3-7	7.66	18.19	49.36	0.87	-33.25	0.52	13.68
2-8	8.03	16.41	48.61	0.84	-39.55	0.51	13.68
1-9	8.5	14.73	47.91	0.81	-47.87	0.50	13.68
0-10	9.12	13	47.24	0.78	-59.38	0.49	13.68

Tableau V.13. Résultats du calcul des indicateurs de qualité de l'eau pour différents taux de dilution cas de la station de Touggourt.

Taux de dilution (eaux souterraines : eau rejet)	Indicateurs						
	SAR	MH%	Na%	KI	RSC	PI	IWOI
10-0	5.98	52.84	53.46	1.09	-12.08	0.58	23.46
9-1	6.01	51.31	53.08	1.07	-12.67	0.58	18.73
8-2	6.05	49.66	52.67	1.05	-13.39	0.57	18.73
7-3	6.10	47.81	52.21	1.03	-14.27	0.57	18.73
6-4	6.17	45.73	51.69	1.01	-15.39	0.56	18.73
5-5	6.26	43.41	51.07	0.98	-16.85	0.55	18.73
4-6	6.39	40.82	50.37	0.95	-18.86	0.54	18.73
3-7	6.58	37.86	49.54	0.91	-21.73	0.53	18.73
2-8	6.89	34.48	48.57	0.87	-26.21	0.52	13.68
1-9	7.42	30.56	47.40	0.83	-34.23	0.50	13.68
0-10	8.55	25.97	45.96	0.77	-52.67	0.78	13.68

Tableau V.14. Résultats du calcul des indicateurs de qualité de l'eau pour différents taux de dilution cas de la station Ouargla.

Taux de dilution (eaux souterraines : eau rejet)	Indicateurs						
	SAR	MH%	Na%	KI	RSC	PI	IWOI
10-0	3.28	49.96	39.21	0.62	-12.34	0.44	37.98
9-1	3.82	48.94	41.38	0.67	-13.96	0.46	30.84
8-2	4.33	48.15	42.97	0.71	-15.63	0.48	30.84
7-3	4.80	47.53	44.2	0.74	-17.35	0.49	23.46
6-4	5.26	47	45.17	0.77	-19.13	0.49	23.46
5-5	5.69	46.56	45.95	0.79	-20.96	0.5	23.46
4-6	6.11	46.18	46.59	0.81	-22.84	0.5	13.68

3-7	6.52	45.87	47.16	0.83	-24.77	0.51	13.68
2-8	6.91	45.58	47.61	0.84	-26.79	0.51	13.68
1-9	7.3	45.35	48.01	0.86	-28.86	0.51	13.68
0-10	7.68	45.14	48.36	0.87	-31	0.52	13.68

V.6.2.5. Interprétation des résultats des analyses et calcul des indicateurs

Le tableau V.9,10 et 11 représente l'effet des propriétés chimiques sur la qualité de l'eau de rejet. La concentration en ions sodium est égale à 52.91; 46.99 et 33.86 meq/l dans l'eau de rejet dans les stations El-Oued, Touggourt et Ouargla respectivement, et à 17.86; 16.36 et 8.69 meq/l dans l'eau souterraine. Lorsque l'eau de rejet est mélangée avec l'eau souterraine, les concentrations d'ions sodium fluctuent entre 19,14 et 44,33 meq/l, tandis que les taux de dilution sont respectivement de 9:1 et de 1:9, ce qui entraîne une modification ou une réduction de la toxicité du sodium. La présence d'une forte concentration de sodium dans le sol entraîne la formation d'une croûte dans le lit de semences. Aussi, la présence d'ions calcium est très importante, car elle réduit l'effet du sodium. Après dilution de l'eau de rejet, les concentrations d'ions calcium variaient entre 11.20 et 46.34; 7.59 et 27.58; 8.25 et 19.64 meq/l sont respectivement, celles d'ions magnésium entre 5.52 et 8.01; 8 et 12.14; 7.91 et 16.30 meq/l sont respectivement, lorsque les taux de dilution étaient de 1:9 et 9:1.

Le tableau V.12,13 et 14 représente des indicateurs de la qualité de l'eau de rejet. Le SAR se situait entre 6.62 et 8.50; 6.01 et 7.42; 3.82 et 7.30 respectivement lorsque les rapports de dilution étaient de 1:9 et 9:1 et était égal à 9.12; 8.55 et 7.68 dans l'eau de rejet et à 6.54; 5.98 et à 3.28 dans l'eau souterraine non diluée. La valeur du SAR lorsque le taux de dilution était de 9:1 à 1:9, son pourcentage est devenu approprié pour l'irrigation et est classé comme faible en sodium, et peut être utilisé pour l'irrigation dans la plupart des sols qui ont quelques niveaux de sodium nuisibles.

Quand le rapport de dilution est passé de 9:1 à 1:9, le pourcentage de le PI est passé au "classe II" appropriée pour l'irrigation. Le taux de Mg% joue un rôle crucial dans la croissance des plantes, et une concentration de Mg% supérieure à 50% est considérée comme extrêmement préjudiciable pour elles. Après le mélange de l'eau de rejet et de l'eau souterraine, tous les rapports étaient inférieurs à 50 %. Dans El-Oued, Ouargla et Touggourt, les taux d'irrigation étaient de 8:8 à 1:9, ce qui est sûr pour l'irrigation. Cependant, dans Touggourt, ils étaient de 9:1 et plus de 50, ce qui ne convient pas à l'irrigation. L'eau souterraine était inférieure à 50 %, ce qui signifie que l'eau souterraine a réduit la salinité de l'eau de rejet. La valeur de Na% lorsque le taux de dilution était de 9:1 à 1:9, son pourcentage est devenu admissibles pour l'irrigation. Le taux de dilution de l'KI est passé de 6:4 à 1:9; 5:5 à 1:9 et 9:1 à 1:9 respectivement, ce qui est bénéfique pour l'irrigation. Cependant, les valeurs de 9:1 à 3:7 et 9:1 à 6:4 sont impropres à l'irrigation. Après avoir mélangé

l'eau de rejet et l'eau souterraine, tous les rapports étaient inférieurs à 1,25 et sont maintenant adaptés à l'irrigation.

L'indice de qualité de l'eau de rejet après dilution avec de l'eau souterraine était compris entre 26.12 à 13.68; 18.73 à 13.68 et 30.84 à 13.68. L'eau de cette étude est une eau de classe 5, "restriction sévère" (SR) pour l'irrigation et peut être utilisée dans des sols très perméables, selon **Meireles et al. (2010)**. Dans cette étude, l'eau de rejet après dilution avec de l'eau souterraine est adaptée à l'irrigation et a le meilleur taux de dilution, qui était de 9:1, 8:2 et 7:3.

La CE et le TDS sont utilisés pour contrôler la salinité de l'eau. Après dilution, la CE de l'eau de rejet était comprise entre 2969.94 à 6491.35; 3057.69 à 5517.23 et 2495.60 à 5673.72 $\mu\text{S}/\text{cm}$ lorsque les rapports de dilution étaient de 1:9 et 9:1, et la plage de TDS après mélange était de (1901-4154; 2011-2981 et 1226-2661) mg/l. En outre, la valeur du pH était comprise entre 7.06 - 7.43; 7.6-7.7 et 8.12-7.89.

V.6.2.6. Comparaison entre résultats expérimentaux et résultats théoriques

En comparant les tableaux V.6, 7 et 8 avec V.15, 16 et 17, les résultats obtenus par les expériences sont corrects et précis par rapport aux résultats obtenus par l'application de loi de concentration, ce qui confirme la validité de nos expériences en laboratoire.

Tableau V.15. Classification des échantillons l'eau pour différents taux de dilution cas de la station El-Oued.

Indicateurs		Taux de dilution (eaux souterraines : eau rejet)										
		10-0	9-1	8-2	7-3	6-4	5-5	4-6	3-7	2-8	1-9	0-10
SAR	Valeur	6.54	6.62	6.71	6.81	6.95	7.24	7.37	7.66	8.03	8.5	9.12
	Classe	Excellente										
MH%	Valeur	36	33.01	29.93	27.15	24.60	22.94	20.15	18.19	16.41	14.73	13
	Classe	sûre pour l'irrigation										
Na%	Valeur	54	53.37	52.12	50.95	49.82	51.67	50.13	49.36	48.61	47.91	47.24
	Classe	admissibles										
KI	Valeur	1.2	1.14	1.08	1.03	0.99	0.97	0.91	0.87	0.84	0.81	0.78
	Classe	admissibles					bonne					
RSC	Valeur	-12.34	-14.06	-16.05	-18.36	-21.09	-23.55	-28.32	-33.25	-39.55	-47.87	-59.38
	Classe	adaptée à l'irrigation										

PI	Valeur	0.60	0.59	0.57	0.56	0.55	0.55	0.53	0.52	0.51	0.50	0.49
	Classe	classe II adapté										
IWOI	Valeur	26.12	26.12	18.73	18.73	18.73	18.73	18.73	13.68	13.68	13.68	13.68
	Classe	Restriction sévère (RS)										

Tableau V.16. Classification des échantillons l'eau pour différents taux de dilution cas de la station Touggourt.

Indicateurs		Taux de dilution (eaux souterraines : eau rejet)										
		10-0	9-1	8-2	7-3	6-4	5-5	4-6	3-7	2-8	1-9	0-10
SAR	Valeur	5.98	6.01	6.05	6.10	6.17	6.26	6.39	6.58	6.89	7.42	8.55
	Classe	Excellente										
MH%	Valeur	52.84	51.31	49.66	47.81	45.73	43.41	40.82	37.86	34.48	30.56	25.97
	Classe	n'est pas adaptée		sûre pour l'irrigation								
Na%	Valeur	53.46	53.08	52.67	52.21	51.69	51.07	50.37	49.54	48.57	47.40	45.96
	Classe	admissibles										
KI	Valeur	1.09	1.07	1.05	1.03	1.01	0.98	0.95	0.91	0.87	0.83	0.77
	Classe	admissibles						bonne				
RSC	Valeur	-12.08	-12.67	-13.39	-14.27	-15.39	-16.85	-18.86	-21.73	-26.21	-34.23	-52.67
	Classe	adaptée à l'irrigation										
PI	Valeur	0.60	0.59	0.57	0.56	0.55	0.55	0.53	0.52	0.51	0.50	0.49
	Classe	classe II adapté										
IWOI	Valeur	23.46	18.73	18.73	18.73	18.73	18.73	18.73	18.73	13.68	13.68	13.68
	Classe	Restriction sévère (RS)										

Tableau V.17. Classification des échantillons l'eau pour différents taux de dilution cas de la station Ouargla.

Indicateurs		Taux de dilution (eaux souterraines : eau rejet)										
		10-0	9-1	8-2	7-3	6-4	5-5	4-6	3-7	2-8	1-9	0-10
SAR	Valeur	3.28	3.82	4.33	4.80	5.26	5.69	6.11	6.52	6.91	7.3	7.68
	Classe	Excellente										
MH%	Valeur	49.96	48.94	48.15	47.53	47	46.56	46.18	45.87	45.58	45.35	45.14

	Classe	sûre pour l'irrigation										
Na%	Valeur	39.21	41.38	42.97	44.20	45.17	45.95	46.59	47.16	47.61	48.01	48.36
	Classe	bonne		admissibles								
KI	Valeur	0.62	0.67	0.71	0.74	0.77	0.79	0.81	0.83	0.84	0.86	0.87
	Classe	bonne										
RSC	Valeur	-12.34	-13.96	-15.63	-17.35	-19.13	-20.96	-22.84	-24.77	-26.79	-28.86	-31
	Classe	adaptée à l'irrigation										
PI	Valeur	0.44	0.46	0.48	0.49	0.49	0.50	0.50	0.51	0.51	0.51	0.52
	Classe	classe II adapté										
IWOI	Valeur	37.98	30.84	30.84	23.46	23.46	23.46	13.68	13.68	13.68	13.68	13.68
	Classe	Restriction sévère (RS)										

V.7. Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer la qualité de l'eau et le potentiel de réutilisation des eaux souterraines combinées à une solution saline pour l'irrigation.

La dilution de la saumure a été effectuée en ajoutant de l'eau souterraine, en déterminant la valeur des sels dissous totaux (TDS) selon les critères d'irrigation et en calculant la quantité d'eau souterraine à ajouter en utilisant la loi de concentration pour obtenir le mélange d'eau. La valeur TDS a été changée de 4922 ; 3810 et 2867 mg/l à 2587 ; 2200 et 1900 mg/l respectivement aux stations El-Oued, Touggourt et Ouargla.

L'évaluation visait à déterminer l'aptitude de l'eau pour l'irrigation et les indicateurs de la qualité utilisés sont : le taux d'adsorption de sodium, le pourcentage de risque de magnésium, le pourcentage de sodium, la teneur résiduelle en carbonate de sodium, l'indice de perméabilité, l'indice de Kelly et l'indice d'irrigation. Les résultats indiquent que ce mélange d'eau convient à l'irrigation (El-Oued, Touggourt et Ouargla), où il a l'indice de perméabilité ($25\% < PI = 54; 55$ et $50 < 75\%$) de la classe II, "adapté" pour l'irrigation. Le pourcentage de sodium ($40\% < Na = 48; 49$ et $44 < 60\%$) de la classe III, "admissible" pour l'irrigation. SAR ($0 < SAR = 7.14; 6.26$ et $5.69 < 10$) de la classe I, ce qui suggère que l'eau présente un faible risque sodique (S1), est "excellente" pour l'irrigation. Carbonate de sodium résiduel ($RSC = -24.36; -16.85$ et $-20.94 < 1.25$) de la classe I, "adaptée" pour l'irrigation. Risque de magnésium ($MH\% = 22; 43$ et $46 < 50\%$) de la classe I, "sûre" pour l'irrigation. L'indice de Kelly ($KI = 0.95; 0.98$ et $0.79 < 1$) est une eau de bonne qualité pour l'irrigation. Le diagramme USSL a été utilisé pour évaluer le mélange d'eau à trois stations. Les résultats ont montré que les mélanges d'eau des trois stations appartenaient au groupe C4-S2

(salinité très élevée avec sodium modéré). Sur la base du diagramme USSL, l'eau mélangée est satisfaisante pour tous les types de sol.

Une fois le mélange d'eau obtenu, nous avons procédé à l'analyse de la saumure. Nous avons calculé SAR, PI, MH%, Na% et KI pour l'eau salée après réduction de la concentration pour tous les rapports. En comparant les résultats, nous avons constaté que les résultats obtenus par les expériences sont corrects et précis par rapport aux résultats obtenus par l'application de la loi de concentration, ce qui confirme la validité de nos expériences en laboratoire. Dans cette étude, l'eau de rejet après avoir été diluée avec de l'eau souterraine est appropriée pour l'irrigation, avec un taux de dilution optimal de 9:1, 8:2 et 7:3.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le but de cette étude était d'analyser l'efficacité des stations de déminéralisation des eaux souterraines au Sahara septentrional (Algérie) en utilisant la technique d'osmose inverse, ainsi que la possibilité de réutiliser les eaux de rejet de ces stations pour l'irrigation.

Notre étude théorique est organisée en deux chapitres. Chapitre I a permis de donner une synthèse bibliographique sur l'eau et l'historique du dessalement dans le monde et en Algérie, ainsi que les techniques utilisées jusqu'à présent dans ce processus, un aperçu de l'indice de qualité de l'eau (IQE) et des études antérieures dans ce domaine. Le chapitre II a permis de donner une généralité sur présentation de la zone d'étude (le Sahara septentrional) et les stations de déminéralisation dans le Sahara septentrional (Algérie). Le chapitre a permis de donner une généralité sur l'impact des rejets de saumure des stations de déminéralisation sur les milieux récepteurs.

L'étude expérimentale que nous avons réalisée a été structurée en deux chapitres. Les quatre chapitres de l'étude expérimentale que nous avons menée sont structurés comme suit : au début du chapitre IV, nous avons examiné la qualité des eaux souterraines dans la zone d'étude. Les résultats des expériences d'analyse physico-chimique ont permis de conclure : le faciès hydrochimique des deux couches d'eau souterraine dans la région El-Oued comme suit: $\text{Cl}^- \text{SO}_4^{2-} \text{Ca}^{2+} \text{Mg}^{2+}$ pour la couche albienne et 95,84% des puits terminaux du complexe avaient un faciès $\text{Cl}^- \text{SO}_4^{2-} \text{Ca}^{2+} \text{Mg}^{2+}$ tandis que les 4,16% restants avaient un faciès $\text{Cl}^- \text{Na}^+ \text{K}^+$. Nous avons constaté que les éléments de l'eau souterraine dans la couche albienne ont des concentrations significativement plus faibles (CE=2830, TDS=1811, Mg^{2+} =162.84, Na^+ =300, Cl^- =843.78 et SO_4^{2-} =660.25) par rapport à celles de la couche terminale du complexe (CE=4980, TDS=3185, Mg^{2+} =217.884, Na^+ =600, Cl^- =1340.12 et SO_4^{2-} =966.1). L'analyse révèle que les concentrations de tous les paramètres mesurés ne sont pas adaptées à une utilisation alimentaire et dépassent la valeur maximale acceptable. Dans la station de déminéralisation, il est donc proposé d'utiliser les eaux souterraines de la couche albienne. Les indices d'irrigation ont permis de constater que les eaux souterraines extraites des deux couches étaient parfaitement adaptées à l'exploitation agricole. Certaines connexions importantes peuvent être repérées, telles que les corrélations entre TDS&CE (0,95), Na^+ &TDS (0,63), Na^+ & CE (0,58), TDS& SO_4^{2-} (0,71), TDS& Cl^- (0,63),...ex. Les résultats obtenus ont révélé que le TDS et la CE sont les principaux paramètres distinctifs sur le plan F1. Bien qu'ils soient en corrélation modérée avec le SO_4^{2-} , le Cl^- et le NO_3^- . La distribution spatiale de l'IQE a montré que la mauvaise qualité de l'eau potable était répartie dans toute la zone d'étude dans la couche CI, et que la totalité de la zone d'étude située dans la couche CT présente une qualité d'eau souterraine très médiocre.

Selon les analyses géospatiales, les eaux souterraines de la région d'El-Oued dans les couches CT et CI présentent une qualité adéquate pour l'irrigation.

Ensuite, nous avons étudié dans le chapitre IV le traitement des eaux salées pour évaluer la quantité et la qualité de ces derniers et leur vitalité. Notre contribution se récapitule dans l'étude de la qualité physico-chimique de l'eau brute et de l'eau traitée au niveau de trois stations de déminéralisation (régions El-Oued, Touggourt et Ouargla) pour définir leur aptitude à la consommation humaine. Les résultats des essais d'analyses physico-chimiques des eaux brutes ont permis de faire les conclusions suivantes: une forte minéralisation de l'eau brute, cela revient à la teneur élevée en conductivité électrique (2790; 2990 et 2149 > 1500), à une dureté (740; 1100 et 700 > 500), en sodium, potassium, sulfates et en chlorures. Le bilan minéral de l'eau brute montre que les teneurs en sodium (411; 376.31 et 200 \geq 200), potassium (32.47; 31 et 14 > 12), chlorures (1410 > 600) et sulfates (950 et 760 > 600) sont supérieures aux normes algériennes et de l'OMS. Nous avons observé la gamme de l'IQE indiquant que tous les échantillons d'eau brute dans les stations El-Oued et Ouargla (100.1 < 198.56 et 136.25 < 200) tombaient dans la catégorie des eaux pauvres pour la boisson (classe III); de plus, les valeurs de l'IQE dans la station Touggourt indiquent que tous les échantillons d'eau brute (200.1 < 239.70 < 300) chutaient dans la catégorie d'eau très pauvre pour la boisson (classe IV). La valeur élevée de l'IQE dans cette zone d'étude est principalement due aux valeurs plus élevées de solides dissous totaux, de conductivité électrique, de dureté totale, de sodium, de sulfate et de chlorure dans les eaux brutes.

Le processus de déminéralisation des eaux souterraines au moyen de la technique d'osmose inverse est une solution optimale pour fournir de l'eau potable. Après la description des différentes étapes de traitement au niveau de la station de déminéralisation des eaux brutes, les résultats des analyses de l'eau traitée montrent une baisse de toutes les valeurs: un Ph qui tend vers la neutralité, une faible conductivité électrique (1059; 654 et 539 < 1500), une minéralisation très réduite, une dureté (340; 200 et 120 < 500) ainsi qu'une diminution de teneur en calcium (80.16; 32 et 24.04 < 200), sodium (147; 135 et 59 < 200), potassium (11 et 4 < 12), chlorures (233.98; 525 et 103.61 < 600), sulfates (290.3; 127 et 69 < 600) et magnésium (34.02; 69 et 14.58 < 150) par rapport aux normes algériennes et de l'OMS. Les valeurs de l'IQE indiquent que tous les échantillons d'eau traitée dans les stations El-Oued et Touggourt (50.1 < 80.68 et 69.11 < 100) tombaient dans la catégorie de bonnes eaux pour la boisson (classe II); de plus, les valeurs de l'IQE dans la station Ouargla (40.64 < 50) tombaient dans la catégorie d'eau excellente pour la boisson (classe I). Les raisons des valeurs à faible valeur de l'IQE obtenues pour cette étude sont les valeurs à faible de TDS, CE, TH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} et Cl^- .

La déminéralisation par un processus d'osmose inverse pour produire de l'eau douce et de la saumure concentrée. Nous avons commencé le chapitre IV en étudiant la qualité des eaux de rejet (la saumure concentrée). Les résultats des essais d'analyses physico-chimiques des eaux de rejet a permis de faire les conclusions suivantes: dans les trois stations El-Oued, Touggourt et Ouargla, le taux de salinité des eaux de rejet est très élevé (CE=7690, 7620 et 6130 $\mu\text{s}/\text{cm}$; TDS=4922, 3810 et 2867 mg/l; TH=3000, 2800 et 1948 mg/l; Ca^{2+} =1166.33, 893.78 et 425.65 mg/l; Mg^{2+} =107.71, 190.62 et 212.81mg/l; Na^+ =1216.98, 1080.8 et 778.91mg/l; K^+ =282.47, 170 et 96.8mg/l; So_4^{2-} =3103.19, 2220 et 997 mg/l; Cl^- =2020.82, 1980 et 1207mg/l). En conséquence, un effluent concentré avec une concentration de 2 à 4 fois plus élevée que l'eau d'alimentation. En raison de sa salinité, le rejeter au milieu récepteur peut avoir des effets négatifs sur le milieu récepteur, en particulier sur les animaux sauvages, les plantes et les humains, l'agriculture, les dunes de sable, la remontée des eaux sur le sol, la salinisation des eaux d'irrigation et la salinité du sol.

Dans le chapitre V, nous avons examiné la réutilisation des eaux de rejet pour l'irrigation, en analysant la qualité de l'eau et le potentiel de réutilisation des eaux souterraines associées à une solution saline pour l'irrigation. Le mélange d'eau a été dilué en ajoutant de l'eau souterraine en calculant la valeur des sels dissous totaux (TDS) en fonction des critères d'irrigation, puis en calculant la quantité d'eau souterraine à ajouter en utilisant la loi des concentrations. Dans les stations El-Oued, Touggourt et Ouargla, la valeur du TDS a chuté de 4922 ; 3810 et 2867 mg/l à 2587 ; 2200 et 1900 mg/l respectivement. L'objectif de l'évaluation est de déterminer la qualité de l'eau pour l'irrigation. Les indices de qualité utilisés pour l'évaluation comprenaient le taux d'adsorption du sodium, le pourcentage du rapport de risque magnésium, le pourcentage de sodium, le carbonate de sodium résiduel, l'indice de perméabilité, l'indice de Kelly et l'indice de qualité de l'eau d'irrigation.

Les résultats indiquent que le mélange d'eau convient à l'irrigation (El-Oued, Touggourt et Ouargla), où l'indice de perméabilité ($25\% < \text{PI} = 54; 55 \text{ et } 50 < 75\%$) de la classe II est "adaptée" pour l'irrigation. Le pourcentage de sodium ($40\% < \text{Na} = 48; 49 \text{ et } 44 < 60\%$) de la classe III est "admissible" pour l'irrigation. SAR ($0 < \text{SAR} = 7.14; 6.26 \text{ et } 5.69 < 10$) de la classe I ce qui suggère que l'eau présente un faible risque sodique (S1) est "excellente" pour l'irrigation. Carbonate de sodium résiduel (RSC= $-24.36; -16.85 \text{ et } -20.94 < 1.25$) de la classe I est "adaptée" pour l'irrigation. Le risque de magnésium (MH% $=22; 43 \text{ et } 46 < 50\%$) de la classe I est "sûre" pour l'irrigation. L'indice de Kelly (KI= $0.95; 0.98 \text{ et } 0.79 < 1$) est une eau de bonne qualité pour l'irrigation. Le diagramme USSL a été utilisé pour évaluer le mélange d'eau des trois stations. Les résultats ont révélé que le mélange d'eau pour les trois stations chute dans le groupe C4-S2 (salinité très élevée avec un taux de sodium moyen). D'après le schéma USSL et la comparaison des résultats avec les normes FAO, il est démontré que les échantillons d'eau après mélange sont adaptés à l'irrigation.

Après avoir diminué la quantité de salinité de rejet saumure et élaboré les caractéristiques physico-chimiques du mélange d'eau en se basant sur la loi des concentrations, nous avons effectué une réduction de la salinité de rejet saumure en laboratoire.

Les échantillons ont été dilués neuf fois et dans des proportions allant de 0 à 100 % d'eau salée et de 100 à 0 % d'eau souterraine, à 10 % par étape : 1:9, 2:8, 3:7, 4:6, 5:5, 6:4, 7:3, 8:2,9:1. Le mélange d'eau est analysé afin d'obtenir les propriétés physico-chimiques du mélange d'eau. Les indicateurs SAR, PI, MH %, Na % et KI ont été obtenus pour l'eau salée après réduction de la concentration pour tous les rapports, en comparant les résultats avec les normes FAO. L'eau de rejet après dilution combinée avec l'eau souterraine est adaptée pour l'irrigation et le meilleur taux de dilution, qui était de 9:1, 8:2 et 7:3. Les résultats obtenus par les expériences sont corrects et précis par rapport aux résultats obtenus par l'application de loi de concentration, ce qui confirme la validité de nos expériences en laboratoire.

Les résultats de la réutilisation de l'eau de rejet nous permettent de conclure que cette réutilisation permet de produire une eau non traditionnelle qui convient à l'irrigation agricole.

Dans le but d'analyser l'effet de l'eau mélangée sur les caractéristiques physico-chimiques du sol, de la zone d'étude et du sable, nous n'avons pas examiné l'effet de l'eau sur le sol en raison de sa perméabilité élevée et de sa faible salinité. Néanmoins, il est important de souligner que cette étude a principalement été réalisée afin de démontrer que la réutilisation des eaux de rejet des stations de déminéralisation est envisageable, ce qui permettrait dans une certaine mesure d'économiser les eaux souterraines pour d'autres utilisations plus exigeantes en termes de qualité, telles que les usages domestiques. Afin d'atténuer les risques pour la santé et l'environnement associés au rejet des eaux de rejet des stations de déminéralisation dans l'environnement, des études supplémentaires doivent être envisagées sur la possibilité de la réutilisation des eaux de rejet des stations de déminéralisation dans plusieurs autres domaines.

Références

Bibliographiques

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- 1- Ayers, R. S., and Westcot, D. W. "Water quality for agriculture", FAO Irrigation and Drainage Paper No. 1985. 29, Rev. 1, U. N. Food and Agriculture Organization, Rome.
- 2- Akili D. Khawaji and all. 2008. Advances in seawater desalination technologies. European desalination society and center for research and technology Hellas (CERTH), Sani resort 2008, vol.221. issues 1-3, pp 47–69.
- 3- Ayers, R. S. & Westcot, D. W. "A Qualidade da Água na Agricultura". 1999 .2ed. Campina Grande: UFPB, pp. (218). (Estudos FAO: Irrigacao e Drenagem, 29).
- 4- Abdelghani G., Jaouad G., Carmelo C.G. Hydrochimie Des Eaux, Dissolution Spécifique Et Salinité Des Cours D " Eau Dans Le Bassin De L " Oued Lebène (Prérif Central , Maroc septentrional), Papeles de Geografia. 2001. 34 143–161.
- 5- A.N.R.H .,Ressources en eau et en sols de l'Algérie, rapport. 1986.
- 6- Achour. S ., La qualité des eaux du Sahara septentrional en Algérie- Etude de l'excès en fluor, Tribune de l'eau, Cebedeau, 1990. n°6, 42 (542), 53-57.
- 7- Aly, A.A., Al-Omran, A.M., Alharby, M.M. The water quality index and hydrochemical characterization of groundwater resources in Hafar Albatin, Saudi Arabia. 2014.
- 8- ANRH., Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. 2002.
- 9- Andersen, S. M., Hertz, P. B., Holst, T., Bossi, R., & Jacobsen, C. S. (2001). Mineralisation studies of ¹⁴C-labelled metsulfuron-methyl, tribenuron-methyl, chlorsulfuron and thifensulfuron-methyl in one Danish soil and groundwater sediment profile. Chemosphere, 45(6-7), 775-782.
- 10- Abbasi, T. & Abbasi, S. A. 2012 Water Quality Indices. Elsevier Science, Burlington, MA, 375 pp.
- 11- Bouselsal, B., Saibi, H. Evaluation of groundwater quality and hydrochemical characteristics in the shallow aquifer of El-Oued region (Algerian Sahara). Groundwater for Sustainable Development. 2022. Volume 17, May, 100747.
- 12- Bouselsal, B., kherici, N., hadj-said, S., belksier, M.S., quality of the waters of the northern sahara aquifers case of the waters of the El-oued aquifers (se algerie) , International Journal for Environment & Glo bal Climate Change , 2014. Vol 2, Issue 3, 21-31.
- 13- Barkat, A., Foued, B., Oualid, B.,Tamás, M., Behnam, A., Dániel, B., Zakaria, R., György, S., Assessment of Complex Terminal Groundwater Aquifer for Different Use of Oued Souf Valley (Algeria) Using Multivariate Statistical Methods, Geostatistical Modeling, and Water Quality Index , Water, 2021. 13(11), 1609.
- 14- Baize, D., Guide des analyses courantes en pédologie, Institut national de la recherche agronomique, 1988. ISBN :2738000754, (p. 165 -170).

- 15- Brown, R.M, McClelland, N.I., Deininger, R.A.& Tozer, R.G. 1970 A-water quality index: do we dare? *Water and Sewage Works* 117 (10), 339-343.
- 16- Brika B, Abdul Aziz O, Obiyda D A, Chemical elements of brine discharge from operational Tajoura reverse osmosis desalination plant, *Desalination and Water Treatment*. January 2015, 57 (2016) 5345–5349.
- 17- Bertrand, F. 2009. Initiation au logiciel R. Master Statistique 2ème année.1-9.
- 18- Bentoutou N., Momayiz K., Najy M.,Belghyti D., Yahyaoui A., Acil G., Ech-Chafay H., Chaouch A. Hydro chemical study of the groundwater of the MAAMORA aquifer: Case of the SIDI TAIBI-Morocco. *Indian. J. Sci. Tech (IJST)* 11(20) 1-11 (2018).
- 19- Chauhan, A, Pawar, M. and Lone, S.A. Water quality status of Golden Key Lake in Clement Town, Dehradun, Uttarakhand. *J. Am. 2010. Sci.* 6(11): 459-464.
- 20- Danielopol D.L. *Eaux souterraines. La colonisation d'environnements.* 1997. 21: 55-66.
- 21- Danis P. *Dessalement de l'eau de mer, Techniques de l'ingénieur.*J2700 (Livre). Juin 2003.
- 22- Debels, P., Figueroa R., Urrutia R., Barra R. & Niell X. Evaluation of water quality in the Chillan river (central Chile) using physicochemical parameters and a modified water quality index. *Environ. Monit. Assess.* 2005. 110, 301–322.
- 23- Belhouta D, Tigrine Z, Emilian Florin Mosnegutu , Ferhat Kamel Benabdelaziz , Management of reverse osmosis concentrate by solar distillation, *Water Supply.* 2022. Vol 22 No 8, 6490.
- 24- Doneen, L.D. Notes on water quality in agriculture. Department of Water Science and Engineering, University of California, Water Science and Engineering, 1964 . 400.
- 25- Danielsson, A., Cato, I., Carman, R., & Rahm, L. (1999). Spatial clustering of metals in the sediments of the Skagerrak/Kattegat. *Applied Geochemistry*, 14(6), 689-706.
- 26- Etteieb, C. R., Cherif, S. & Tarhouni, J. Hydrochemical assessment of water quality for irrigation: a case study of the Medjerda River in Tunisia. *Appl. Water.* 2017. *Sci.* 7(1), 469–480.
- 27- Eaton. FM, "Significance of carbonates in irrigation waters," *Soil Sci*, 69, 123–134, (1950).
- 28- Fartas, F., Remini, B., Sekiou, F. & Marouf, N. The use of PCA and ANN to improve evaluation of the WQIclassic, development of a new index, and prediction of WQI, Coastel Constantinois, northern coast of eastern Algeria. *Water Supply*, 2022. 22, 8727-8749.
- 29- Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendijk, E., & Cardenas, M. B. (2015). The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature geoscience*, 9(2), 161-167.
- 30- Gholami, V., Ahmadi Jolandan M., Torkaman J. Evaluation of climate change in northern Iran during the last four centuries by using dendroclimatology. *J Nat Hazards.* 2016.
- 31- Gowd, S. S., Assessment of groundwater quality for drinking and irrigation purposes: a case study of Peddavanka watershed, Anantapur District, Andhra Pradesh, India. *Environmental Geology*, 48(6), 702-712. (2005).

- 32- Guendouz, A., Moulla, A.S., Edmunds, W.M., Zouari, K., Shand, P. & Mamou, A. Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the Complex Terminal aquifer in the Algerian Sahara. *Hydrogeol. J.*, 2003. 11: 483-495.
- 33- Hoopner, T., Widdelberg, J., Elements of environmental impact studies on coastal desalination plants, *Desalination*, 1996. 108, 11–18.
- 34- Hem, J. D. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water USGS. *Water Supply Paper*. 1985. 2254, 117–120.
- 35- Hospitalier J., Poirier R. L'eau destinée à la consommation humaine. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*. 2008. 69 : 496-505.
- 36- Horton, R. K. "An index number system for rating water quality", *Journal Water Pollution Control Federation*, No.(37), 1965. pp. 300–305.
- 37- Hakimi Y, Philippe O, Pierre D, Serge B. Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the Continental Intercalaire aquifer system: Insights from Mzab Ridge and surrounding regions, North of the Algerian Sahara, *Journal of Hydrology: Regional Studies* 34 (2021) 100791.
- 38- Jerome, C. and Pius, A. Evaluation of water quality index and its impact on the quality of life in an industrial area in Bangalore, South India", *American Journal of Scientific and Industrial Research*, 2010. Vol.(1),No.(3),pp.595-603.
- 39- Kadri, S. R., Chaouche, S. La remontée des eaux dans la région du Souf: Une menace sur un écosystème oasien. *Les Cahiers d'EMAM. Études sur le Monde Arabe et la Méditerranée*, 2018. (30).
- 40- Kakati, S.S. and Sarma H.P. Water quality index of drinking water of Lakhimpur district. *Indian J. Environ.* 2007. Prot. 27(5): 425-428.
- 41- Kelley, WP. Permissible composition and concentration of irrigation waters. *Proc Am Soc Civil Eng* 1940. 66, 607–613.
- 42- Karanth, K.R. *Ground Water Assessment Development and Management*. McGraw Hill Publishing Company Ltd., New Delhi. 1987.
- 43- Khaled H. El-Ezaby , Assessment of Drinking Water Quality From Pilot Desalination Stations in Hail City, Kingdom of Saudi Arabia, *Journal of Environmental Sciences* · January 2019.
- 44- Latteman, S., Höpner, T. *Seawater Desalination*. In: *Impacts of Brine and Chemical Discharges on the Marine Environment*. Desalination Publications, L'Aquila, Italy. 2003.
- 45- Lima, V.R.d.N.; Silva, Á.G.F.d.; Cruz, R.R.P.; Barbosa, L.d.S.; Junior, N.R.d.S.; Sales, G.N.B.; Limão, M.A.R.; Costa, F.B.d.;Souza, P.A.d.; Lopes, K.P.; et al. Nopalea Cochenillifera Biomass as Bioadsorbent in Water Purification. *Water* 2021, 13, 2012.
- 46- Le Guern. C, Lachassagne. P, Noël. Y, Persin. F, et De Buyscher. 1, Dessalement et recharge artificielle: synthèse technico-économique, *Rapport BRGM/RP-52262-FR*. 2003.

- 47- Le houerou H.N. Définition et limites bioclimatiques du Sahara. *sècheresse*, 1(4): 1990. pp. 246-259.
- 48- Moustiri. A., *Strategy and Indicators Water Sector in Algeria*, Ministry of Water Resources, Algiers, November 2011.
- 49- Maurel. A. *Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres*, 2e édition, Paris.2006.
- 50- Mohammed, M.N. "Quality assessment of Tigris river by using water quality index for irrigation purpose", *European Journal of Scientific Research*, 2011. Vol. (57), No.1, pp.15-28.
- 51- Meireles, A., Andrade, E. M., Chaves, L., Frischkorn, H. & Crisostomo, L. A. A new proposal of the classification of irrigation water. *Revista Ciência Agronômica* 2010. 41(3), 349–357.
- 52- MERCIER J, (2000), *Le grande livre de l'eau*. Edition : renaissance du livre (la).ISBN :2-8046-0341-5. P 183.
- 53- MANDRI.Y. 2011. *Étude paramétrique du procédé de dessalement de l'eau de mer par congélation sur paroi froide*.thèse de doctorat : Génie des procédés. France.
- 54- Nasri. N, Bouhlila. R, Saaltink. M.W, Gamazo P., *Modeling the Hydrogeochemical Evolution of Brine In Saline Systems: Case Study of the Sabkha of Oum El Khialate in South East Tunisia*, *Appl. Geochemistry*, 2015. 55: 160–169.
- 55- Nagaraju A, Sunil Kumar K, Thejaswi A. *Assessment of groundwater quality for irrigation: a case study from Bandalamottu lead mining area , Guntur District, Andhra Pradesh, South India*. *Appl Water* 2014. Sci 4 (4):385 – 396.
- 56- NEZLI I., *Mécanismes D'acquisition de la Salinité et de la Fluoruration Des Eaux de la Nappe Phréatique de la Basse Vallée de l'Oued Mya (Ouargla)*, Badji Mokhtar -Annaba University. 2004.
- 57- Nemčić-Jurec, J., & Jazbec, A. Point source pollution and variability of nitrate concentrations in water from shallow aquifers. *Applied Water Science*, 2017. 7(3), 1337-1348.
- 58- Nemčić-Jurec, J., Sudhir K. S., Anamarija J., Sandeep K. G., Ivan K. *Hydrochemical investigations of groundwater quality for drinking and irrigational purposes: two case studies of Koprivnica-Krizèvcı County (Croatia) and district Allahabad (India)*. *Sustain. Water Resour. Manag.* 5(2) 467-490. 2019.
- 59- Ould Baba SY, M. *Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional*. Thèse de doctorat en Géologie, Faculté des Sciences de Tunis, Tunisie. 2005.
- 60- Ouali S. *Etude géothermique du Sud de l'Algérie*. Mémoire de Magistère Spécialité : Géophysique. Uni. M^hamed Bouguerra Boumerdes. 2005. 84p.
- 61- OOS,(2003). *Système Aquifère du Sahara septentrional*. Volume 2: *Modèle Mathématique*. *Projet,SASS; Rapport interne*. Annexes.Tunis.,p. 151-229.
http://www.ossonline.org/sites/default/files/publications/OSS-SASS-resultats_1e_phase_En.pdf.

- 62- OMS, 2004. Guidelines for drinking water quality: training pack. World Health Organization, Geneva, Switzerland.
- 63- OSS (2003 a et b) : Système Aquifère du Sahara Septentrional, Rapport interne. Annexes. Tunis, Tunisie, 229p.
- 64- Panno, S.V., Hackley, K.C., Hwang, H.H., Greenberg, S., Krapac, I.G., Landsberger, S., O'Kelly, D.J. Source Identification of Sodium and Chloride Contamination in Natural Waters: Preliminary Results. In Proceedings of the 12th Annual Illinois Groundwater Consortium Symposium, Makanda, IL, USA, 22 April 2002.
- 65- Ravikumar, P., Somashekar, R.K., Angami, M., Hydrochemistry and Evaluation of Groundwater Suitability for Irrigation and Drinking Purposes in the Markandeya River Basin, Belgaum District, Karnataka State, India. *Environ. Monit. Assess.*, 2011. 173, 459–487.
- 66- Ramakrishnaiah, C. R., Sadashivaiah, C. & Ranganna, G. Assessment of water quality index for the groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India. *Egypt. J. Chem.* 2009. 6(2), 523–530.
- 67- Ramade F, dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. Ed DUNOD. France. 2002.
- 68- Raghunath, H.M. Groundwater. 2nd ed. New Delhi: Wiley Eastern Ltd., 1987. 344–369.
- 69- Richards, L. A. Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils. U.S. Department of Agriculture Hand Book, Washington, 1954. p. 60.
- 70- Singh, S., Ghosh, N. C., Gurjar, S., Krishan, G., Kumar, S. & Berwal, P. Index-based assessment of suitability of water quality for irrigation purpose under Indian conditions. *Environ. Monit. Assess.* 2018. 190(1), 29.
- 71- Strahler, A. H., & Strahler, A. N. (2006). *Physical Geography: Science and Systems of the Human Environment*. Wiley. "Glaciers and Icecaps." National Snow and Ice Data Center (NSIDC), <https://nsidc.org/cryosphere/glaciers>.
- 72- Saeedi, M., Abessi, O., Sharifi F., Meraji, H. Development of groundwater quality index. *Environ. Monit. Assess.* 2010. 163, 327–335.
- 73- Subba. Rao. N. Hydrogeology: problems with solutions. Prentice Hall of India, New Delhi. 2017.
- 74- Sebei A, Slama A and Helali M. A. Hydrochemical characterization and geospatial analysis of groundwater quality in Cap Bon region, northeastern Tunisia *Environ. Earth. Sci. (EES)* 77 (15) 1-18 (2018).
- 75- Singh SK, Srivastava PK, Pandey AC, Gautam SK Integrated assessment of groundwater influenced by a confluence river system: concurrence with remote sensing and geochemical modelling. *Water Resour Manag* (2013a) 27:4291–4313.

- 76- Singh SK, Srivastava PK, Pandey AC Fluoride contamination mapping of groundwater in Northern India integrated with geochemical indicators and GIS. *Water Sci Technol Water Supply* (2013b) 13:1513–1523.
- 77- Todd, D.K. *Groundwater hydrology*. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons Publications. 1995.
- 78- UNESCO. *Étude des ressources en eau du Sahara Septentrional: Captage et utilisation des eaux souterraines*. Plaquette 7, Unesco. 1972.
- 79- Valladares Linares R., Li Z., Sarp S., Bucs, Sz.S., Amy G., Vrouwenvelder J.S., Forward osmosis niches in seawater desalination and wastewater reuse, *water research* 66 (2014) 122 - 139.
- 80- Warda, Ch., Nacer, Kh. Hydrochemistry and geothermometry of an Albian aquifer from Oued Righ region in northeastern Algerian Sahara. *Geothermal Energy* 2014, 2:3.
- 81- Nasim J F, Mert C H, İlker P, Nalan K, Taylan Ö. Pek, Mithat Y., Evaluation of MBR treated industrial wastewater quality before and after desalination by NF and RO processes for agricultural reuse., *Journal of Water Process Engineering.*, Volume 22, April 2018, Pages 103-108.
- 82- Waugh, D. (2009). *Geography: An Integrated Approach*. Nelson Thornes. "Evaporation and the Water Cycle." U.S. Geological Survey (USGS), <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/evaporation-and-water-cycle>.
- 83- Wilcox, L. V. *Classification and use of irrigation waters*, US Department of Agriculture. 1955 Circ. 969. Washington, DC.
- 84- Yogendra, K. and Puttaiah, E.T. "Determination of water quality index and suitability of an Urban waterbody in Shimong Town, Karnataka", *The 12th World Lake Conference; Proceeding of Taal*, 2008. pp.342-346.