

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Biologiques



THESE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat en sciences biologiques

Spécialité : Ecologie saharienne et environnement

Contribution à l'étude de la problématique de gestion des excédents hydriques dans l'oasis de Ouargla. Caractérisation, impacts environnementaux et proposition d'aménagements.

Présentée et soutenue publiquement par : Mme. Soumia MERABET

Le 08 /10/ 2025

Devant le jury composé de :

Mr. BELHADJ Hamdi Aissa	Prof	Université de Ouargla	Président
Mr. IDDER Mohammed Tahar	Prof	Université de Ouargla	Directeur de thèse
Mr. BEN SALEM Sofiane	MCA	Université de Ouargla	Examineur
Mme. BEN HEDID Hadjira	MCA	Université de Ghardaia	Examinatrice
Mme. BEDDA Hafsia	MCA	ENS de Ouargla	Examinatrice
Mme. MOUANE Aicha	MCA	Université d'El Oued	Examinatrice

Année universitaire : 2025/2026

Dédicace

Ce travail est dédié à la mémoire de Sidi Tahar (Tahar Bouhnik), un enseignant du Coran qui a consacré sa vie à l'éducation dans la ville d'El Meghaier pendant plusieurs générations. C'est lui qui m'a appris à lire en premier. Le 14 février dernier, Sidi Tahar a quitté ce monde. Puisse Dieu lui offrir pardon et miséricorde.

Soumia MERABET

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur Tahar IDDER, Professeur à l'Université de Ouargla, qui m'a encadré tout au long de cette thèse et qui m'a fait partager ses brillantes intuitions. Qu'il soit aussi remercié pour sa gentillesse, sa disponibilité permanente et pour les nombreux encouragements qu'il m'a prodigués.

Je remercie Monsieur **BELHADJ Hamdi Aissa**, Professeur à l'Université de Ouargla, pour m'avoir honoré de par sa présence en présidant le jury de soutenance de mon Doctorat.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les membres de jury, composé de Monsieur **BEN SALEM Sofiane**, maître de conférence A à l'université de Ouargla, à madame **BEN HEDID Hadjira**, maître de conférence A à l'université de Ghardaia, à Madame **BEDDA Hafsia**, maître de conférence A à l'école normale supérieure de Ouargla, et à madame **MOUANE Aicha**, maître de conférence A à l'université d'El Oued pour avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers le personnel du laboratoire de l'Entreprise Nationale du Sel d'El Meghaier pour leur précieux soutien dans les analyses. Je tiens à exprimer ma gratitude toute particulière à M. Ali KHELIFA et M. Abdeslam CHETTOUH, qui gèrent la station d'épuration de Ouargla, Pour leur contribution précieuse au processus de mesurage de l'épaisseur et d'échantillonnage des boues.

Je garde en mémoire toutes les personnes du laboratoire CRSTRA-Tougourt, du Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico-chimiques de Ouargla et du laboratoire de Géologie du Sahara au Centre de Recherche Scientifique de l'Université de Ouargla.

Pour conclure, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers tous ceux et celles qui ont joué un rôle, grand ou petit, dans la réalisation de ce modeste ouvrage.

Soumia MERABET

Résumés

Résumé :

Contribution à l'étude de la problématique de gestion des excédents hydriques dans l'oasis de Ouargla. Caractérisation, impacts environnementaux et proposition d'aménagements.

Cette étude a pour objectif d'explorer plusieurs pistes de recherche se rapportant au problème de la gestion des excédents d'eau à Ouargla. Il s'agit tout d'abord d'identifier les sources sous-jacentes qui sont responsables de l'augmentation de la salinité des eaux urbaines traitées par lagunage aéré dans la station d'épuration de Ouargla. Il sera ensuite question d'évaluer la distribution, le taux d'accumulation et le potentiel de valorisation agricole des boues générées par cette station. Le risque de l'eutrophisation du milieu récepteur, recevant la totalité des eaux excédentaires urbaines et agricoles de l'oasis de Ouargla, sera également évalué. Ce travail se propose, enfin, d'étudier les fluctuations spatiotemporelles de la nappe phréatique, enregistrées au niveau de l'agglomération. Ces fluctuations sont dues à l'évacuation massive des excédents hydriques, de l'agglomération de Ouargla vers le milieu récepteur.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons effectué une série d'analyses physico-chimiques des eaux résiduaires brutes et épurées, et les résultats de ces analyses ont été interprétés grâce à l'ACP. L'évaluation de l'épaisseur des dépôts au fond des lagunes et la détermination du volume total de boue dans chaque bassin ont également été effectuées. Outre ces évaluations quantitatives, des prélèvements de boue ont été réalisés dans les bassins et une série d'analyses physico-chimiques et bactériologiques ont été menées. Des études physico-chimiques des eaux de Sebkhet Sefioune (milieu récepteur) ont été menées à travers trois campagnes de prélèvement : février, avril et août 2023. L'évaluation de l'état trophique de l'eau a été réalisée suivant le système d'évaluation du risque d'eutrophisation pour la colonne d'eau tel que défini par Ifremer (2000). Nous avons enfin comparé les cartes piézométriques de six campagnes de mesures obtenues en 1998, 2003, 2008, 2013, 2015 et 2019 afin de mesurer les fluctuations de la nappe phréatique.

Les résultats mettent en évidence que les eaux épurées produites par la STEP de Ouargla se caractérisent par une température et un pH conformes aux normes Algériennes de la réutilisation des eaux usées épurées en irrigation, tandis que les valeurs moyennes enregistrées de la conductivité électrique (15,65dS/m), le SAR (12,38) et les ions chlorure (100,20meq/l) sont largement supérieures aux valeurs limites de réutilisation des eaux usées épurées en irrigation. L'analyse statistique indique que les ions qui causent le problème de salinité des eaux incluent, principalement, le chlorure, le sodium, les sulfates, le potassium et le magnésium. En outre, il a été constaté que le canal d'assainissement urbain, alimenté par la station de refoulement de la route de Ngoussa, et qui reçoit l'eau usée provenant de quatre stations de déminéralisation, est à lui seul responsable d'une grande partie du phénomène de sur-salinisation des eaux urbaines qui arrivent à la station d'épuration. Par ailleurs, en fonction de la hauteur moyenne des boues accumulées dans les lagunes de traitement, nous avons pu conclure qu'un dragage de ces boues est nécessaire pour les bassins F2, A3 et B2 de la station de lagunage. Le taux d'accumulation annuel moyen calculé pour l'ensemble de la station d'épuration est de 30,95cm/an. Les boues produites par cette station sont sèches et peu fermentescibles une fois stockées. Elles contiennent 2,58% d'azote et 0,55% de phosphore sur matière sèche, avec de très faibles concentrations de métaux lourds. Les eaux de sebkhet Sefioune se trouvent dans un état eutrophe à hypereutrophe. Le niveau de la nappe phréatique avant et pendant les opérations d'évacuation de l'excès d'eau est resté stable, sans fluctuation notable.

Mots clés : Excédents hydriques, Lagunage aéré, Salinité des eaux, Gestion des boues, Eutrophisation. Oasis de Ouargla.

Abstract:

Contribution to the study of the issue of managing water surpluses in the Ouargla oasis: Characterization, environmental impacts, and proposed solutions.

This study aims to investigate several research avenues related to the management of excess water in Ouargla. It first seeks to identify the sources responsible for the increased salinity of urban water treated through aerated lagooning at the Ouargla wastewater treatment plant. Next, it will assess the distribution, accumulation rate, and potential agricultural valorization of the sludge generated by this facility. The study will also evaluate the risk of eutrophication in the receiving environment, which collects all excess urban and agricultural water from the Ouargla oasis. Finally, it will analyze the spatiotemporal fluctuations of the groundwater table in the urban area, which result from the massive discharge of surplus water from the Ouargla agglomeration into the receiving environment.

To achieve these objectives, we conducted a series of physicochemical analyses on both raw and treated wastewater, with the results interpreted using Principal Component Analysis (PCA). The thickness of the deposits at the bottom of the lagoons was evaluated, and the total volume of sludge in each basin was determined. In addition to these quantitative assessments, sludge samples were collected from the basins, and a series of physicochemical and bacteriological analyses were performed. Physicochemical studies of the water in Sebkhet Sefioune (the receiving environment) were carried out through three sampling campaigns: February, April, and August 2023. The trophic state of the water was assessed using the eutrophication risk evaluation system for the water column, as defined by Ifremer (2000). Finally, we compared piezometric maps from six measurement campaigns conducted in 1998, 2003, 2008, 2013, 2015, and 2019 to analyze fluctuations in the groundwater table.

The results highlight that the treated water produced by the Ouargla wastewater treatment plant (WWTP) has a temperature and pH that comply with Algerian standards for the reuse of treated wastewater in irrigation. However, the average recorded values for electrical conductivity (15.65dS/m), Sodium Adsorption Ratio (SAR) (12.38), and chloride ions (100.20 meq/L) far exceed the permissible limits for reusing treated wastewater in irrigation. Statistical analysis indicates that the ions primarily responsible for the water salinity issue include chloride, sodium, sulfates, potassium, and magnesium. Additionally, it was found that the urban sanitation channel, fed by the pumping station on the Ngoussa road and receiving wastewater from four demineralization stations, is single-handedly responsible for a significant portion of the over-salinization of urban water arriving at the treatment plant. Furthermore, based on the average height of accumulated sludge in the treatment lagoons, it was concluded that dredging is necessary for basins F2, A3, and B2 of the lagooning station. The average annual sludge accumulation rate calculated for the entire treatment plant is 30.95 cm/year. The sludge produced by this station is dry and minimally fermentable once stored, containing 2.58% nitrogen and 0.55% phosphorus on a dry matter (DM) basis, with very low concentrations of heavy metals. The waters of Sebkhet Sefioune are in a eutrophic to hypereutrophic state. The groundwater table level before and during the operations to evacuate excess water remained stable, with no notable fluctuations.

Keywords: Water surpluses, Aerated lagooning, Water salinity, Sludge management, Eutrophication, Ouargla oasis.

مساهمة في دراسة إشكالية إدارة الفائض المائي في واحة ورقلة: التوصيف، الآثار البيئية واقتراح التجهيزات.

تهدف هذه الدراسة إلى استكشاف عدة مسارات بحثية تتعلق بمشكلة إدارة الفائض المائي في ورقلة. يتعلق الأمر أولاً بتحديد المصادر الأساسية المسؤولة عن زيادة ملوحة المياه الحضرية المعالجة بواسطة أحواض الترسيب المهواة في محطة معالجة مياه الصرف الصحي بورقلة. ثم القيام بتقييم توزيع ومعدل تراكم الحمأة الناتجة عن هذه المحطة مع تحديد إمكانيات استعمالها في الزراعة كسماد. كما تم تقييم مخاطر الإثراء الغذائي في سبخة سفيون التي تمثل البيئة المستقبلية، التي تتلقى كامل الفائض المائي الحضري والزراعي لواحة ورقلة. وأخيراً، تهدف هذه الدراسة إلى دراسة التغيرات المكانية والزمانية لمستوى طبقة المياه الجوفية في مدينة ورقلة، والتي تنتج عن التصريف الضخم للفائض المائي من ورقلة نحو البيئة المستقبلية.

لتحقيق هذه الأهداف، قمنا بإجراء سلسلة من التحاليل الفيزيائية والكيميائية للمياه العادمة الخام والمعالجة، وقد تم تفسير نتائج هذه التحاليل باستخدام تحليل المكونات الرئيسية (ACP). كما تم تقييم سماكة الرواسب في قاع البحيرات الاصطناعية وتحديد الحجم الإجمالي للحمأة في كل حوض. بالإضافة إلى هذه التقييمات الكمية، تم جمع عينات من الحمأة من الأحواض وإجراء سلسلة من التحاليل الفيزيائية والكيميائية والبيكثريولوجية. كما تم إجراء دراسات فيزيائية وكيميائية لمياه سبخة سفيون (الوسط المستقبل) من خلال إجراء ثلاث حملات دراسية، في فبراير وأبريل وأغسطس 2023. تم تقييم الحالة الغذائية للمياه وفقاً لنظام تقييم مخاطر الإثراء الغذائي لعمود الماء كما حدده معهد Ifremer (2000). وأخيراً، قمنا بمقارنة الخرائط البيئومترية لست حملات قياس تم الحصول عليها في أعوام 1998 و 2003 و 2008 و 2013 و 2015 و 2019 لقياس تغيرات منسوب المياه الجوفية.

تُظهر النتائج أن المياه المعالجة الناتجة عن محطة معالجة مياه الصرف الصحي في ورقلة تتميز بدرجة حرارة ورقم هيدروجيني (pH) يتوافقان مع المعايير الجزائرية لإعادة استخدام المياه المعالجة في الري. ومع ذلك، فإن القيم المتوسطة المسجلة للتوصيل الكهربائي (15.65 ديسيمنس/متر)، ونسبة إدمصاص الصوديوم SAR (12.38)، وأيونات الكلوريد (100.20 ميلي مكافئ/لتر) تتجاوز بكثير الحدود المسموح بها لإعادة استخدام المياه المعالجة في الري. تشير التحليلات الإحصائية إلى أن الأيونات المسؤولة بشكل رئيسي عن مشكلة ملوحة المياه تشمل الكلوريد، الصوديوم، الكبريتات، البوتاسيوم، والمغنيسيوم. بالإضافة إلى ذلك، تبين أن قناة الصرف الصحي الحضري، التي تغذيها محطة طريق نفوسة التي تستقبل مياه الصرف من أربع محطات لإزالة الأملاح، تتحمل وحدها مسؤولية جزء كبير من التملح الزائد للمياه الحضرية التي تصل إلى محطة المعالجة. علاوة على ذلك، بناءً على متوسط ارتفاع الحمأة المتراكمة في بحيرات المعالجة، تم استنتاج أنه من الضروري إزالة الحمأة المتراكمة في الأحواض F2 و A3 و B2. وأن معدل التراكم السنوي المتوسط للحمأة للمحطة بأكملها هو 30.95 سم/سنة. الحمأة الناتجة عن هذه المحطة جافة وقليلة التخمر بمجرد تخزينها، وتحتوي على 2.58% من النيتروجين و 0.55% للمادة الجافة، مع تركيزات منخفضة جداً من المعادن الثقيلة. كمت تبين أن مياه سبخة سفيون ذات حالة غذائية زائدة إلى مفرطة وأن مستوى المياه الجوفية ظل مستقرًا قبل وأثناء عمليات تصريف المياه الزائدة، دون تسجيل تغييرات ملحوظة.

الكلمات المفتاحية: الفائض المائي، الترسيب المهوى، ملوحة المياه، إدارة الحمأة، الإثراء الغذائي، واحة ورقلة.

Table des matières

Dédicace.....	I
Remerciements	II
Liste des tableaux	VI
Liste des figures	VII
Liste des annexes	IX
Liste des abréviations.....	X
Introduction.....	1

Partie Théorique

Chapitre I. Salinité des eaux usées épurées

1. Salinité des eaux	4
2. Source de salinité des eaux usées	4
2.1. Usage domestique	4
2.2. Activités industrielles.....	5
3. Procédés de traitement des eaux usées	5
3.1. Prétraitements.....	5
3. 2. Traitement primaire:.....	5
3. 3. Traitements secondaires (Traitement biologique).....	5
3. 4. Traitements tertiaires	6
4. Impacts de la salinité des eaux usées épurées	6
4. 1. Réutilisation des eaux usées urbaines	6
4. 2. Rejet des eaux usées épurées dans la nature	7
5. Gestion de la salinité des eaux usées épurées	7
5. 1. Mesures de prévention	7
5. 2. Techniques spécifiques pour réduire la salinité	8
5. 2. 1. Osmose inverse	8
5. 2. 2. Nanofiltration	8
5. 2. 3. Ultrafiltration	8
5. 2. 4. Microfiltration tangentielle	9

Chapitre II. Gestion des boues résiduaires urbaines

1. Origine des boues	10
2. Composition des boues.....	10
3. Gestion des boues	11
3. 1. Curage des bassins d'épuration.....	11
3. 2. Procédés du traitement	11
3. 2. 1. Epaississement des boues.....	12
3. 2. 2. Stabilisation biologique des boues épaissies	12
3. 2. 3. Déshydratation des boues.....	12
3. 2. 4. Stabilisation chimique des boues déshydratées	12
3. 2. 5. Séchage des boues.....	12
3. 2. 6. Compostage.....	13
3. 2. 7. Oxydation thermique.....	13
4. Valorisation et élimination	13
4. 1 Valorisation organique.....	13
4. 2 Valorisation énergétique	14
4. 3 Stockage en Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND).....	14

Chapitre III. Eutrophisation

1. Définition.....	15
2. Causes de l'eutrophisation et les facteurs favorisants	15
3. Mécanisme de l'eutrophisation	16
4. Statuts trophiques des lacs	17
4.1. Lac oligotrophe	17
4.2. Lac mésotrophe.....	17
4.3. Lac eutrophe.....	17
5. Conséquences de l'eutrophisation.....	17
5. 1 Conséquences écologiques.....	17
5. 1. 1 Atterrissement accéléré des zones humides	17
5. 1. 2 Perte de biodiversité.....	18
5. 2 Conséquences sanitaires.....	18
5. 3 Conséquences économiques	18

Chapitre IV. Problématique des excédents hydriques dans l'oasis de Ouargla

1. Situation géographique de l'Oasis de Ouargla	20
2. Excédents hydriques dans l'oasis de Ouargla.....	20
3. Facteurs locaux des excédents hydriques.....	21
3.1 Facteurs naturels	21
3.1.1 Géomorphologie favorable à la stagnation des eaux.....	21
3.1.2 Topographie entravant l'évacuation des eaux de drainage et d'assainissement....	22
3.1.3. Caractères géologiques et pédologiques favorisant à la remontée des eaux.....	22
3. 1. 4 Nappe phréatique proche de la surface du sol	23
3. 1. 5. Conditions climatiques extrêmes :.....	24
3. 2 Facteurs anthropiques.....	28
3.2.1 Surexploitation des ressources en eau	28
3. 2. 2 Absence d'un système efficace de drainage et d'évacuation	32
4. Impacts des excédents hydriques	33
4. 1 Remonté des eaux de la nappe phréatique	34
4. 2 Sur-salinisation des sols.....	34
5. Mesures prises pour gérer les excédents hydriques	34

Partie Pratique

Chapitre I. Matériel et méthodes

1. Suivi du processus de traitement des eaux usées	35
1. 1 Présentation du site expérimental	35
1. 2 Identification de l'origine de la salinité des eaux usées épurées	37
1. 2. 1 Echantillonnage des eaux	37
1. 2. 2 Caractérisation physico-chimique des eaux	39
1. 2. 3 Etude statistique.....	40
1. 3 Analyse des taux d'accumulation des boues résiduaire et de la possibilité de leur valorisation agricole.....	40
1. 3. 1 Mesure de l'épaisseur et de l'accumulation des sédiments	40
1. 3. 2 Échantillonnage et caractérisation physico- chimique des sédiments.....	41
2. Analyse physico-chimique et risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux usées de la cuvette de Ouargla	44
2. 1 Présentation du lac étudié.....	44

2. 2 Biodiversité à Sebkhet Sefioune	45
2. 3 Démarche de l'étude	45
2. 3. 1 Echantillonnage de l'eau	47
2. 3. 2 Analyses des paramètres physico-chimiques	47
2. 4 Etat trophique de Sebkhet Safioune	49
2. 5 Évaluation de la variation spatiotemporelle de la couverture végétale	49
3. Suivi de remontée de la nappe phréatique	50
Chapitre II Origine de la salinité des eaux usées épurées	
1. Qualité physico-chimiques des eaux épurées	51
2. Résultats de l'analyse en composant principale (ACP)	53
3. Discussion.	55
Chapitre III.. Taux d'accumulation des boues résiduairees et la possibilité de leur valorisation agricole	
1. Accumulation de la boue.....	58
2. Production des boues	61
3. Caractérisation des sédiments.....	63
3. 1 Caractérisation physicochimique	63
3. 2 Caractérisation bactériologique	65
3. 3 Etude économique.....	66
4. Discussion.	67
Chapitre IV. Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux épurées (Sebkhet Safioune)	
1. Qualité physicochimique de l'eau	69
2. Eutrophisation	75
3. Variation spatiotemporelle de la surface aquatique et du recouvrement végétal	77
4. Discussion.....	79
Chapitre V. Effet des travaux d'évacuation sur le niveau de la nappe phréatique	
Conclusion.....	87
Références bibliographiques.....	90
Annexes.....	101

Liste des tableaux

Tableau 1. Paramètres météorologiques de la station de Ouargla durant (2010 -2019)...	24
Tableau 2. Stations de refoulement concernées par le traitement et les canaux.	37
Tableau 3. Grille d'évaluation du risque d'eutrophisation (Ifremer, 2000).	49
Tableau 4. Résultats des paramètres physico-chimiques des eaux épurées étudiées.	51
Tableau 5. Production de boue dans chaque bassin.	62
Tableau 6. Caractéristiques physicochimiques de la boue dans les bassins A3, B2 et F2.....	64
Tableau 7. Teneur en éléments traces métalliques dans la boue du bassin B2.....	65
Tableau 8. Résultats des analyses bactériologiques de la boue dans les bassins A3, B2 et F2.....	65
Tableau 9. Aspect financier.....	67
Tableau 10. Diagnostic de la station 01.	76
Tableau 11. Diagnostic de la station 02.	76
Tableau 12 : Diagnostic de la station 03.	77

Liste des figures

Figure 1. Situation géographique de l'oasis de Ouargla.....	20
Figure 2. Schéma géomorphologique de la vallée de Ouargla (Bonard et Gardel, 2003).....	22
Figure 3. Diagramme Ombrothermique de Ouargla.....	26
Figure 4. Climagramme d'Emberger de Ouargla.	27
Figure 5. Localisation du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) (Sahel, 2003)(OSS, 2003).....	29
Figure 6. Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrional (UNESCO, 1972).	30
Figure 7. Forages du Moi-pliocène de la cuvette de Ouargla.....	31
Figure 8. Forages du Sénonien de la cuvette de Ouargla.	31
Figure 9. Population de la cuvette de Ouargla.	32
Figure 10. Taux de couverture des réseaux d'assainissement.	33
Figure 11. Nouveau schéma de gestion des excédents hydriques dans l'oasis de Ouargla, d'après Lager (2003).	35
Figure 12. Situation du périmètre d'étude.	36
Figure 13. Schéma de principe de la station de lagunage de Ouargla.	36
Figure 14. Canaux de collecte des eaux usées.....	37
Figure 15. Bassin de collecte des eaux usées (Entrée).	38
Figure 16. Bassin de sortie des eaux épurées (Sortie).	38
Figure 17. Schéma hydraulique de l'évacuation des eaux usées dans la cuvette de Ouargla (Bonard & Gardel, 2005).....	38
Figure18. Mesure de l'épaisseur des sédiments.....	41
Figure 19. Prélèvement de la boue.....	42
Figure 20. Station 01.	46
Figure 21. Station 02.....	46
Figure 22. Station 03.	47
Figure 23. Salinité (en résidu sec) des eaux du Complexe Terminal dans l'oasis de Ouargla.....	53
Figure 24. Cercle de corrélation de l'analyse en composant principale (ACP) sur la matrice standardisée des données (Dim 1 vs Dim2).	54
Figure 25. Analyse en composant principale (ACP) sur la matrice standardisée des données ; A : Plan factoriel (Dim 1 vs Dim2) selon le facteur "Canal".	55
Figure 26. Distribution spatiale des sédiments au niveau des deux bassins du 1er étage du lagunage aéré ; A2 et A3.	58

Figure 27. Distribution spatiale des sédiments au niveau des deux bassins du 2ème étage de lagunage aéré ; B1 et B2.....	59
Figure 28. Distribution spatiale des sédiments au niveau des deux bassins de finition ; F1 et F2.....	60
Figure 29. Distribution latérale des teneurs en matière sèche (MS) et en matières volatiles en suspension (MVS) dans les bassins A3, B2 et F2.	64
Figure 30. Variation spatiotemporelle de la température des eaux de Sebkhet Safioune.	69
Figure 31. Variation spatiotemporelle du pH des eaux de Sebkhet safioune.....	70
Figure 32. Variation spatiotemporelle de la conductivité électrique des eaux de Sebkhet Safioune.....	71
Figure 33. Variation spatiotemporelle de la teneur en oxygène dissous des eaux de Sebkhet Safioune.....	Er
reur ! Signet non défini.	
Figure 34. Variation spatiotemporelle des solides totaux dissous des eaux du Sebkhet Safioune.....	72
Figure 35. Variation spatiotemporelle des matières en suspensions dans les eaux de Sebkhet Safioune.....	73
Figure 36. Variations spatiotemporelles de la teneur des nutriments dans les eaux de Sebkhet Safioune.....	75
Figure 37. Indice de végétation ajusté au sol (SAVI) de Sebkhet Safioune en 1990.....	78
Figure 38. Indice de végétation ajusté au sol (SAVI) de Sebkhet Safioune en 2015.....	78
Figure 39. Indice de végétation ajusté au sol (SAVI) de Sebkhet Safioune en 2023.....	79
Figure 40. Niveau piézométrique de la nappe phréatique en 1998.	82
Figure 41. Niveau piézométrique de la nappe phréatique en 2003.	82
Figure 42. Niveau piézométrique de la nappe phréatique en 2008.	83
Figure 43. Niveau piézométrique de la nappe phréatique en 2013.	83
Figure 44. Niveau piézométrique de la nappe phréatique en 2015.	84
Figure 45. Niveau piézométrique de la nappe phréatique en 2019.	84

Liste des annexes

Annexe 1. Liste des forages de la vallée de Ouargla.

Annexe 2. Population de la wilaya de Ouargla.

Annexe 3. Campagnes piézométriques de la nappe phréatique de Ouargla dans: 1998, 2003, 2008, 2013, 2015 et 2019.

Annexe 4. Bilan de l'auto-surveillance des eaux de la STEP de Ouargla en 2017.

Liste des abréviations

ADE : Algérienne Des Eaux.

ANARH : Agence National des Ressources Hydriques.

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.

IANOR : Institut Algérien de Normalisation.

ONA : Office National d'Assainissement.

STEP : Station d'Épuration.

Introduction

L'oasis de Ouargla est l'une des plus grandes oasis algériennes, localisée dans les dépressions de l'Erg oriental, où l'eau est extraite de la nappe phréatique et des autres nappes plus profondes (Continental Intercalaire et Complexe Terminal) par des puits et des forages (Zella & Smadhi, 2006). Au fil du temps, l'augmentation de la demande en eau dans cette oasis a mené à une dépendance croissante à l'extraction des ressources en eau de ces aquifères. Toutefois, l'augmentation considérable des débits utilisés a engendré d'importants gaspillages, révélant des volumes non négligeables d'eaux excédentaires qui ont provoqué la remontée des niveaux piézométriques de la nappe phréatique (Idder, 2007).

Afin de lutter contre le problème de la remontée de cette nappe et ses conséquences sur l'environnement, les pouvoirs publics ont mis en place à Ouargla un nouveau système de gestion des eaux usées urbaines et agricoles, comprenant une station d'épuration par lagunage aéré (Idder et *al.*, 2014). Ce système a prévu l'acheminement, de façon séparée et gravitaire, des eaux urbaines épurées et des eaux de drainage agricole vers un exutoire, nommé Sebkhet Safioune, qui est situé à une quarantaine de kilomètres au nord de l'agglomération. Ce schéma de gestion des eaux résiduaires permet également la réutilisation des eaux traitées et l'épandage des boues en secteur agricole, en amont, tout en favorisant la création d'une zone humide riche en biodiversité animale et végétale en aval (Bonard et Gardel, 2003).

Compte tenu de ses conséquences sur l'agriculture, les infrastructures urbaines et l'environnement, le phénomène de la remontée des eaux a fait l'objet, depuis plusieurs décennies, d'études par un grand nombre de chercheurs et d'institutions dans une approche multidisciplinaire englobant l'hydrologie, l'écologie, la géologie, le génie civil et l'urbanisme. Depuis l'étude menée par Dutil et Samie en 1960, qui constitue l'une des premières tentatives pour quantifier les apports d'eau dans la région, les déséquilibres hydriques contribuant à la remontée de la nappe phréatique ont été mis en évidence. Au cours des années 1970-1980, des études hydrogéologiques détaillées ont été menées, comme celle de Castany (1982), qui a analysé le bassin sédimentaire du Sahara septentrional et a décrit les aquifères profonds ainsi que leur relation avec la nappe phréatique de surface. L'étude de Idder (1998), menée dans les années 90, quant à elle, s'est intéressée surtout aux causes, aux conséquences et aux solutions à adopter vis-à-vis du problèmes des excédents hydriques. Depuis les années 2000, on observe une diversification dans les recherches, englobant des méthodes géochimiques environnementales, la question de la pollution et des suggestions d'aménagement. Ces recherches sont illustrées, notamment, par les travaux de Bonnard et Gardel (2003) et Djidel (2008). Après 2010, des études récentes ont commencé à privilégier des solutions pratiques et l'emploi d'eaux usées traitées, on peut notamment citer l'étude de Ounoki et Achour réalisée en 2014 et celle de Negais en 2024.

Comme l'indiquent les recherches menées par Nader (2014) et Ngais et *al.* (2021), les eaux usées traitées par la station d'épuration de Ouargla présentent une mauvaise qualité en raison d'une salinité excessive qui nuit au sol et à la nappe phréatique. Cela pose un obstacle majeur à leur réemploi en agriculture, qui est l'un des buts principaux de la mise en place de cette station d'épuration. Il est donc nécessaire de mener des explorations scientifiques afin d'identifier les raisons de l'augmentation cette salinité, avec l'objectif de la diminuer et d'en tirer profit dans le domaine agricole.

D'autre part, selon les responsables de la station d'épuration de Ouargla, aucun bilan n'a été effectué, jusqu'à présent, en ce qui concerne l'étude du volume, de la qualité et de la gestion globale des boues résiduelles qui se sont accumulées dans les lagunes d'épuration, et ce depuis la date de mise en service de cette station d'épuration en 2008. Il est donc absolument nécessaire de mener des études pour analyser la problématique de gestion des boues générées par cette station d'épuration.

En outre, l'étude réalisée par Nader (2014) à Sebkhet Safioune, milieu récepteur des excédents hydriques de la cuvette de Ouargla, a montré que le rejet des eaux usées épurées et des eaux de drainage agricole a entraîné des changements écologiques importants : création d'un plan d'eau d'environ 600 ha, accompagnée de l'installation d'une flore et d'une avifaune. Cette étude a aussi mis en évidence une pollution carbonée, azotée et phosphorée des eaux. Par conséquent, ce milieu récepteur est devenu un écosystème aquatique très susceptible à l'eutrophisation.

Compte tenu des éléments indiqués, l'objectif de cette thèse sera d'explorer les sources sous-jacentes qui ont conduit à la sur-salinisation de l'eau traitée par la station d'épuration des eaux usées de Ouargla. Le deuxième objectif sera d'évaluer la distribution, le taux d'accumulation et le potentiel de valorisation agricole des boues générées par cette station. Le troisième objectif sera enfin d'évaluer le risque d'eutrophisation du milieu récepteur collectant la totalité des eaux excédentaires de l'oasis de Ouargla (eaux usées épurées et eaux de drainage agricole). De plus, cette recherche aura pour objectif complémentaire de déterminer comment les opérations d'évacuation des eaux excédentaires ont affecté la fluctuation temporelle du niveau de la nappe phréatique au niveau de l'oasis. Cela offrira des stratégies de gestion qui correspondent aux réalités des conditions locales.

Plus globalement, cette étude vise à enrichir les connaissances scientifiques sur la problématique de gestion des excédents d'eau en milieu saharien, afin de faciliter la prise de décisions environnementales intégrées, à une époque où le développement durable est devenu un enjeu prioritaire à l'échelle mondiale.

Afin d'atteindre ces objectifs, nous avons organisé notre manuscrit en une partie bibliographique et une partie expérimentale. La section bibliographique portera un intérêt particulier à la salinité des eaux usées traitées, ses origines et ses remèdes, ainsi qu'à la gestion des boues résiduelles. Le processus d'eutrophisation, ainsi que les notions associées à la gestion de l'excès d'eau dans la cuvette de Ouargla y seront également abordés. La partie expérimentale présentera d'abord le matériel et la méthodologie de travail adoptée et ensuite les résultats obtenus et leur discussion.

Une conclusion est présentée à la fin du manuscrit pour récapituler les principaux résultats obtenus.

Partie Théorique

Chapitre I.

Salinité des eaux usées épurées

Les eaux usées sont les eaux rejetées par les collectivités, les industries et les particuliers, qui sont acheminées par les égouts en station d'épuration afin d'être traitées. Après traitement, on les appelle des eaux usées épurées (Boutin et *al.*, 2009). D'après les différentes phases de traitement mentionnées par Aussel et *al.* (2004), Xanthoulis et *al.* (2005) et Talaboulma (2018), ce procédé a pour objectif d'éradiquer les polluants organiques, chimiques et microbiologiques. Cependant, la totalité des sels dissous qui contribuent à la salinité n'est généralement pas éliminée. L'administration de la salinité des eaux usées purifiées est un défi majeur, notamment pour la réutilisation agricole.

1. Salinité des eaux

La salinité est la quantité de sels dissous (minéralisation) dans l'eau. Elle est calculée à partir de la mesure de la conductivité de l'eau - soit la capacité de l'eau à conduire un courant électrique - en tenant compte notamment de la température et de la pression (GIP, 2021).

La teneur totale en sels de l'eau résiduaire dépasse celle de l'eau potable d'environ 200 mg/L, à moins que les eaux saumâtres ne pénètrent dans les canalisations d'assainissement ou lors de la collecte des eaux industrielles.

Parmi les éléments contribuant à la salinité des eaux usées réutilisées, on peut mentionner le sodium et le chlore qui contribuent principalement à la salinisation du sol, tandis que le bore joue un rôle plus modeste (Boutin et *al.*, 2009)

2. Source de salinité des eaux usées

D'après Rejsek (2002), les eaux résiduaires arrivant à la station d'épuration se composent de diverses sortes d'eau : domestiques, pluviales, industrielles et les matières de vidange. Par conséquent, ces catégories peuvent provoquer une hausse du volume de sels dissous dans les effluents. Selon les informations fournies par le même document, la salinité des eaux résiduaires pourrait provenir de:

2.1. Usage domestique

Parmi les principaux polluants apportés par l'usage domestique des eaux, les polluants salins (chlorure de sodium de régénération des résines échangeuses d'ions des adoucisseurs d'eau, des fers à repasser ou des lave-vaisselle) et tensioactifs (borates, polyphosphates des détergents) (Gilli et *al.*, 2008).

Dans les régions arides et semi-arides l'eau usée traitée peut avoir une concentration élevée en Cl et Na à cause du contenu relativement élevé en ces éléments dans les eaux domestiques (FAO, 2003).

2.2. Activités industrielles

La composition des eaux usées résiduelles varie en fonction de l'industrie localisée, qui peut se situer dans le domaine minéral en fonction des opérations de l'entreprise (Rejsek, 2002). Selon Fabregas (2021), le secteur du textile produit des eaux usées contenant une grande quantité de chlore et de salinité.

3. Procédés de traitement des eaux usées

Le processus de traitement des eaux usées se déroule en plusieurs étapes successives. Si les méthodes varient légèrement selon les stations d'épuration, selon l'année de mise en service, la sensibilité du milieu récepteur ou les contraintes liées à l'installation de l'usine, les principes généraux d'épuration restent inchangés et les installations sont disposées dans un ordre qui ne change guère (Marcel et Pastor, 2013).

Ces grandes étapes comprennent le prétraitement, les traitements primaire, secondaire et tertiaire. Chaque étape conduit à une diminution de la teneur en un ou plusieurs composants (Rabah, 2018).

3.1. Prétraitements : En tête d'une station d'épuration, ils ont pour but de retenir les matières séparables par des procédés simples : les matières volumineuses au moyen de grilles, les sables dans des dessaleurs, les produits moins denses que l'eau et les matières flottantes les plus grossières par des installations de dégraissage. Ces procédés facilitent les opérations ultérieures telles que pompage, digestion, traitements mécaniques des boues, au cours desquelles on peut craindre l'engorgement et l'abrasion des appareils (Xantholis et *al.*, 2005; Marcel et Pastor, 2013).

3. 2. Traitement primaire: La décantation primaire se produit généralement dans des bassins de forme cylindrique, cependant, il y a de multiples sortes de décanteurs. Elle aide à éliminer environ 70 % des substances minérales et organiques suspendues qui se déposent ou fondent dans le bassin, formant les boues qualifiées de « primaires ».

L'ajout de produits chimiques (comme le sulfate d'alumine, le chlorure ferrique, les agents de coagulation, etc.) pourrait augmenter les résultats de la décantation. Cette méthode, appelée « floculation », permet de capter 90% des matières en suspension (Aussel et *al.*, 2004).

3. 3. Traitements secondaires (Traitement biologique): Ils ont pour fonction d'éliminer les matières dissoutes, c'est-à-dire les composés organiques ou minéraux solubles dans l'eau. Ils sont basés sur des mécanismes biologiques développés par certains micro-organismes. Ces derniers assurent notamment la dégradation de la matière organique en matière minérale, assimilable par

les végétaux (Marcel et Pastor, 2013). Parmi les traitements biologiques principalement rencontrés, on peut citer les procédés à boues activées (BA), les lits bactériens (LB), les biofiltres (BF), le lagunage naturel (LN) puis les bioréacteurs à membranes (BAM) (Boutin et *al.*, 2009).

3. 4. Traitements tertiaires: Un traitement plus poussé peut être requis lorsque les eaux traitées sont rejetées dans une zone sensible ou destinées à un usage particulier : zone de baignade, zone conchylicole, prise d'eau pour l'adduction d'eau potable à proximité, irrigation agricole, besoins urbains (arrosage, fontaines publiques), usage industriel (refroidissement). On parle alors de "recyclage de l'eau" ou de "réutilisation des eaux usées épurées". Ces techniques sont notamment utilisées dans les régions du monde où il existe de fortes pénuries d'eau (Marcel et Pastor, 2013).

Les traitement tertiaires facilitent la suppression des substances en suspension et dissoutes restants, y compris les pathogènes et des nutriments comme le nitrate et le phosphore, dans le but de clarifier l'effluent final (Xantholis et *al.*, 2005).

Les méthodes utilisées, généralement issues des procédés de potabilisation, peuvent être d'ordre physique (comme le tamisage, la microfiltration, l'adsorption sur le charbon actif et le rayonnement UV), chimiques (comme le chlore, l'ozone, la chaux et la floculation) ou biologiques comme le lavage, les boues activées et les rejets dans le sol (Marcel et Pastor, 2013).

D'après ce qui a déjà été souligné, il est possible de conclure que la suppression des sels présents dans l'eau se fait habituellement par le biais du traitement primaire de l'eau usée, suivi de celui tertiaire. Si le traitement primaire n'est pas efficace et qu'il n'y a pas de traitement tertiaire, l'eau qui en découle pourrait être salée.

4. Impacts de la salinité des eaux usées épurées

Les sels présents dans les eaux usées purifiées peuvent engendrer des effets néfastes lorsqu'elles sont réemployées ou rejetées dans le milieu naturel.

4. 1. Réutilisation des eaux usées urbaines

L'idée de réutiliser les eaux usées est d'extraire ces dernières suite à un traitement pour les réutiliser. Ainsi, ce recyclage assure deux buts d'économie des ressources en eau : il contribue non seulement à la réutilisation des ressources en amont, mais également à la réduction du volume des déchets pollués. Cependant, l'intérêt est restreint lorsqu'il n'existe pas de tension quantitative concernant le stock d'eau dans le domaine concerné (Benoit et *al.*, 2011).

L'évaluation de la quantité et du genre de sels est essentielle pour déterminer si l'eau usée traitée est appropriée pour l'irrigation. Des problèmes possibles peuvent être associés à la quantité totale de sels, au genre de sel ou à une surconcentration d'un ou plusieurs facteurs (FAO, 2003).

L'augmentation de la salinité des sols pourrait constituer le principal impact défavorable sur l'environnement lié à l'exploitation agricole des eaux résiduelles. En effet, si cette salinisation n'est pas contrôlée, elle peut conduire à une réduction de la productivité sur le long terme. La productivité du sol peut en être affectée de quatre manières différentes :

- Elle modifie la pression osmotique au niveau de la zone des racines en raison de la forte concentration de sel.
- Elle entraîne une toxicité ionique spécifique (ions sodium, bore ou chlorure).
- Elle peut perturber l'absorption par les végétaux des nutriments essentiels (potassium et nitrates, par exemple), en raison de l'antagonisme avec les ions sodium, chlorure et sulfates.
- Elle peut détruire la structure du sol en provoquant sa dispersion et le bouchage des pores.

À long terme, l'utilisation d'eaux usées accroît toujours la salinité des sols et des eaux souterraines (OMS, 2012).

4. 2. Rejet des eaux usées épurées dans la nature

D'après ONEMA (2020), les eaux purifiées sont généralement évacuées vers l'environnement naturel une fois le traitement secondaire terminé, sans qu'un traitement supplémentaire soit nécessaire, ce qui met en danger le milieu récepteur.

Quand les eaux usées épurées salées sont réintroduites dans les lacs et les rivières, leur concentration en sels peut causer une contamination des cours d'eau de surface ainsi que des eaux souterraines, pouvant parfois restreindre l'usage de l'eau.

Des concentrations de sels très élevées provoquent des effets laxatifs sur les consommateurs et corrodent les équipements de distribution de l'eau (OMS, 2012).

5. Gestion de la salinité des eaux usées épurées

Pour gérer la salinité des eaux usées épurées, il est nécessaire d'adopter une approche intégrée comprenant des mesures préventives et des solutions techniques.

5. 1. Mesures de prévention

Ceci est réalisé en respectant les directives indiquées par la (OMS, 2012) pour réduire quelques-uns des impacts sur l'environnement liés aux eaux usées épurées salées ;

- Éviter d'employer de l'eau contenant 500 à 2000 mg/l de matières solides dissoutes totales (MDT) présentant une conductivité électrique de 0,8 à 2,3 dS/m, en fonction du type de sol et du drainage du terrain.
- Réduire l'utilisation de sels en amont et leurs rejets dans les eaux usées.

5. 2. Techniques spécifiques pour réduire la salinité

Pour diverses applications, telles que la purification de l'eau, le dessalement et la gestion des eaux usées, les techniques séparatives à membranes sont couramment employées dans le domaine du traitement des eaux. Les méthodes de séparation par membranes fréquemment employées dans le processus d'épuration des eaux sont (Berland et Juery, 2002) :

5. 2. 1. Osmose inverse

L'osmose inverse utilise des membranes denses qui laissent passer l'eau et arrêtent tous les sels. Cette technique est utilisée pour : le dessalement des eaux de mer ; le dessalement des eaux saumâtres ; la production d'eau ultra pure ...

Le phénomène d'osmose est un phénomène qui tend à équilibrer la concentration en solutés de part et d'autre d'une membrane semi-perméable. Il est un phénomène naturel courant, notamment à travers les membranes cellulaires (Berland et Juery, 2002).

Avec l'osmose inverse, même les matières dissoutes comme les ions peuvent être extraites de l'eau. Cela permet de produire de l'eau ultra-pure dont l'utilisation est requise dans de nombreux processus industriels sensibles dont notamment l'industrie pharmaceutique (GUNT, 2024).

5. 2. 2. Nanofiltration

Cette technique se situe entre l'osmose inverse et l'ultrafiltration. Elle permet la séparation de composants ayant une taille en solution voisine de celle du nanomètre d'où son nom. Les sels ionisés monovalents et les composés organiques non ionisés de masse molaire inférieure à environ 200 – 250 g/mol ne sont pas retenus par ce type de membrane. Les sels ionisés multivalents (calcium, magnésium, aluminium, sulfates...) et les composés organiques non ionisés de masse molaire supérieure à environ 250 g/mol sont, par contre, fortement retenus (Berland et Juery, 2002).

5. 2. 3. Ultrafiltration

L'ultrafiltration utilise des membranes microporeuses dont les diamètres de pores sont compris entre 1 et 100 nm. De telles membranes laissent passer les petites molécules (eau, sels) et arrêtent les molécules de masse molaire élevée (polymères, protéines, colloïdes).

Pour cette raison, cette technique est utilisée pour l'élimination de macrosolutés présents dans les effluents ou dans l'eau à usage domestique, industriel (électronique) ou médical (Berland et Juery, 2002).

5. 2. 4. Microfiltration tangentielle

Ce procédé de séparation solide-liquide met en œuvre des membranes dont les diamètres de pores sont compris entre 0,1 et 10 μm . Il permet donc la rétention des particules en suspension, des bactéries et indirectement des colloïdes et de certains ions après fixation de ces derniers sur de plus grosses particules obtenues par complexation, précipitation ou floculation. Théoriquement, la différence entre ultrafiltration et microfiltration est très nette (Berland et Juery, 2002).

Chapitre II.
Gestion des boues résiduaires
urbaines

1. Origine des boues

On achemine les eaux usées issues de nos cuisines, salles de bains et toilettes, ainsi que les boues de fosses toutes-eaux domestiques, vers une station d'épuration. Après avoir été traitée, l'eau épurée est évacuée vers le milieu naturel (FNAD, 2021). La collecte et le traitement des eaux usées produisent différents sous-produits : les produits de curage des réseaux, les produits de vidange des installations autonomes, les refus de prétraitement (refus de dégrillage, sables, graisses) et les boues des stations d'épuration.

Les boues provenant des stations d'épuration sont les sous-produits les plus courants et inévitables de l'assainissement des eaux usées (Déléry et Bonnard, 2007).

D'après FNAD (2021), la formation de la boue lors de l'épuration des eaux résiduaires est due à la séparation des éléments qui peuvent polluer le milieu naturel de l'eau transportant les polluants. Les eaux résiduaires contiennent des déchets grossiers séparables sous l'action des forces de gravité lorsqu'on les laisse séjourner dans un bassin calme. Ces phénomènes de décantation donnent naissance à des résidus dont certains sont évacués séparément (sables, graisses) et dont la majorité sont des composants inertes des boues. Les polluants plus dispersés dans l'eau ne peuvent suivre ce schéma simple. Les techniques d'épuration permettent de transformer ces matières en un nouveau produit séparable de l'eau, là encore par voies de décantation. Plus précisément, la charge polluante à traiter est transformée en bactéries agglomérées par les produits d'excrétion de leur métabolisme. L'activité épuratrice augmente naturellement la concentration des boues dans les ouvrages de traitement.

2. Composition des boues

En ce qui concerne les éléments constitutifs des boues, il s'agit principalement de particules solides qui ne sont pas retenues par les pré-traitements et les procédés de traitement de l'eau (dégradation et dissolution des polluants de l'eau) (AMORCE, 2012). Ces boues contiennent des substances organiques non dégradées, des minéraux, des micro-organismes et de l'eau (environ 99%). (FNAD, 2021; AMORCE, 2012).

La composition des boues urbaines est influencée par l'origine et la composition des apports dans les réseaux de collecte d'eaux usées, d'une part (Strub, 2012), et d'autre part par le type de traitement des eaux usées de la station dont elles proviennent (AMORCE, 2012).

Cependant, elles partagent des caractéristiques similaires : elles renferment toutes de l'azote, du phosphore et de la matière organique (FNAD, 2021; AMORCE, 2012), ce qui en fait des éléments ayant une valeur agronomique qui justifie leur utilisation comme matières fertilisantes ou comme combustible dans les unités de génération ou de cogénération de thermies (Strub, 2012).

Elles peuvent aussi contenir des substances indésirables telles que des Eléments Traces Métalliques (ETM), des Composés Traces Organiques (CTO), des micro-organismes pathogènes et des composés pharmaceutiques (AMORCE, 2012).

Il faut donc adapter le traitement des boues dans les STEP en fonction de leurs caractéristiques (quantité, composition, pH, humidité) et du mode d'élimination ou de valorisation choisi. Les conditions économiques locales du moment doivent également être prises en compte (AMORCE, 2012).

3. Gestion des boues

Les différents systèmes d'assainissement exigent que la quantité de boue dans l'installation reste inférieure à un seuil recommandé. Il est donc nécessaire d'assurer le soutirage des boues en surplus (Cerra et *al.*, 2014). Avant d'être éliminées, ces boues sont soumises à un traitement approprié en fonction de leur nature et de leur destination (Rejsek, 2002). Par conséquent, la gestion des boues résiduaires inclut :

3. 1. Curage des bassins d'épuration

Le curage des boues des lagunes est une étape indispensable pour maintenir un bon niveau d'épuration des eaux usées avant rejet au milieu récepteur. Il s'agit d'une opération importante et contraignante d'un point de vue technique, réglementaire et budgétaire. C'est pourquoi il est primordial que, d'une part, elle soit bien anticipée et, d'autre part, réalisée par un personnel spécialisé (Carpier et *al.*, 2013).

3. 2. Procédés du traitement

La transformation des boues se déroule en plusieurs étapes, avec des buts classés en trois catégories :

- Garantir la durabilité de l'exploitation des boues conformément aux normes et à son développement ;
- Prévenir tout problème sur le réseau d'eau (retour en tête chargé, septique, etc.) ;
- Réduire les dépenses opérationnelles (réactifs de conditionnement, transport, etc.).

En fonction de la filière eau, nous disposerons de boues primaires, biologiques et tertiaires (Behra, 2013).

D'après ce dernier document, avant d'entamer les étapes de traitement choisies, les boues subissent un conditionnement chimique qui implique d'injecter initialement un réactif (comme un polymère, un coagulant ou du lait de chaux). Cela favorise la libération de l'eau libre présente dans la partie solide de la boue (la matière sèche).

En ce qui concerne les différentes étapes de traitement de la boue, Rjsek (2002) mentionne deux phases :

3. 2. 1. Epaissement des boues

C'est une concentration de la boue produite par décantation, suivie d'un processus de déshydratation visant à éliminer un volume plus important d'eau associée aux MES, que ce soit par filtres presse ou de centrifugation. Le but de cette étape est de diminuer le volume de boue (Rejsek, 2002).

3. 2. 2. Stabilisation biologique des boues épaissies

Peut être réalisée de manière biologique grâce aux bactéries contenues dans les boues en aérobiose ou en anaérobiose. Elle peut être également réalisée chimiquement par ajout de chaux qui entraîne une augmentation du pH (jusqu'à pH 11) empêchant tout développement bactérien. L'objectif de cette étape est de diminuer le potentiel de fermentation en réduisant le pourcentage de substances organiques susceptibles de se fermenter dans le milieu naturel sous l'influence des microorganismes (Rejsek, 2002).

Outre ces étapes, Behra (2013) ont inclus les étapes suivantes :

3. 2. 3. Déshydratation des boues

Grâce à la déshydratation, on obtient une boue plus ou moins peltable et de volume diminué (avec une siccité supérieure aux boues épaissies) provenant de boues liquides qui ont traversé un processus d'épaississement. On distingue la déshydratation mécanique par le biais de filtre à bandes presseuses, de centrifugeuse et de filtre presse à plateaux (Behra, 2013).

3. 2. 4. Stabilisation chimique des boues déshydratées

Une stabilisation chimique des boues, suite à une déshydratation par l'ajout de chaux vive, est recherchée si l'on désire un amendement calcique pour la mise en valeur agricole ou pour garantir une hygiénisation grâce à un stockage prolongé au pH supérieur à 11,5 (Behra, 2013).

3. 2. 5. Séchage des boues

On cherchera à sécher les boues suite à la déshydratation pour obtenir une siccité accrue (plus de 60%), diminuer significativement les dangers liés aux nuisances olfactives, réduire les frais de transport ou potentiellement faciliter une étape finale de valorisation par oxydation thermique (incinération) ou gazéification (la matière organique présente dans la boue sèche qui se décompose en gaz combustible exploitable). On distinguera le séchage, qu'il soit sans ou avec une source de chaleur externe (Behra, 2013).

3. 2. 6. Compostage

Selon (SMRA, 2018), il s'agit d'un processus naturel de décomposition des matières organiques fermentables qui se produit au sein du sol sur une période prolongée. L'objectif du procédé est de stimuler ce processus biologique. Le compostage est actuellement une méthode traditionnelle pour traiter et stabiliser nos boues de station d'épuration.

Le compostage des boues nécessite l'apport d'un substrat carboné ayant un double rôle de structurant et de texturant (augmentation de la porosité pour permettre la circulation d'air et la rétention de l'humidité) (Behra, 2013). Il présente plusieurs avantages (AMORCE, 2012) :

- réduction du volume des boues et de leur teneur en eau ;
- réduction des odeurs;
- meilleure maniabilité (meilleure structure que les boues non compostées) ;
- stabilisation et hygiénisation naturelles sans additifs chimiques.

3. 2. 7. Oxydation thermique

Cela implique la transformation de la matière organique en dioxyde de carbone, sels minéraux et eau à des températures élevées. Les diverses méthodes d'oxydation thermique des boues comprennent l'incinération dans un four spécifique, la co-incinération avec les ordures ménagères et l'oxydation par voie humide (OVH) (Behra, 2013).

4. Valorisation et élimination

Les principales filières de valorisation des boues sont :

4. 1. Valorisation organique

La valorisation agronomique peut se réaliser par l'épandage direct (avec ou sans pré-méthanisation) ou suite au compostage :

L'épandage de boues offre des bénéfices en agronomie : les boues de STEP contiennent une grande quantité d'éléments fertilisants (N et P). En effet, dans les boues liquides, la majorité de l'azote est présent sous forme d'ammonium qui est aisément assimilable par les plantes. L'azote, sous sa forme organique dans les boues pâteuses et solides, sera accessible sur le long terme. En outre, la quantité de phosphore introduite par les boues est considérable, presque identique à celle des fertilisants chimiques.

Malgré les intérêts qu'elle présente, cette valorisation comporte des contraintes. Le grand public l'accepte plutôt mal en raison de la présence d'éléments traces métalliques, de composés traces organiques et de micro-organismes pathogènes dans les boues (AMORCE, 2012).

Comme mentionné auparavant, le compostage est initialement une méthode de stabilisation des matières organiques, puis une méthode de valorisation organique qui génère un compost soumis aux mêmes restrictions réglementaires que l'épandage agricole.

Toutefois, le compostage a un intérêt agronomique accru (une importante quantité d'humus contenant des éléments fertilisants).

La valorisation agricole après compostage est garantie en raison de la qualité du produit final, qui, s'il est commercialisé, peut garantir la rentabilité de l'opération (AMORCE, 2012).

4. 2. Valorisation énergétique

Il existe néanmoins d'autres méthodes de recyclage possibles, telles que la génération d'énergie thermique et/ou électrique grâce à la digestion anaérobie (également appelée « méthanisation ») ou encore leur application en tant que matériau constructif sous forme de technosables.

La méthanisation est une technique qui convertit la matière organique présente dans les boues en biogaz et en un résidu connu sous le nom de digestat. Selon le type d'intrants et les capacités de chauffage du digesteur, cette transformation effectuée par des bactéries sans oxygène (anaérobie) se produit soit à une température inférieure à 35 °C (digestion mésophile), soit à une température supérieure à 50°C (thermophile). Le biogaz généré par la digestion des boues peut servir de source de chaleur, d'électricité ou de fusion des deux « cogénération ». En ce qui concerne le digestat, on le valorise généralement lors de l'épandage agricole.

Il est essentiel d'effectuer une purification du biogaz avant son incorporation dans le réseau de gaz naturel, qui implique la séparation du dioxyde de carbone et d'autres impuretés afin de ne récupérer et valoriser que le biométhane (Belon, 2020).

4. 3. Stockage en Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux (ISDND)

Cette méthode d'élimination présente le bénéfice d'une possible valorisation du biogaz généré par la fermentation anaérobie des boues dans l'ISDND.

Bien qu'il soit impératif de déshydrater à 30% et qu'il existe une réglementation plus rigoureuse sur l'enfouissement, cette méthode demeure un mode d'élimination abordable. Cependant, le coût de l'évacuation pourrait s'intensifier considérablement lorsqu'il faudra stabiliser entièrement les boues afin de pouvoir les conserver. La distance entre la station de traitement des déchets et l'ISDND influence également le coût (AMORCE, 2012).

Chapitre III.
Eutrophisation

1. Définition

L'eutrophisation des écosystèmes aquatiques est une succession de processus biologiques enclenchés en réponse à un apport excessif de nutriments. Elle se traduit par des réponses complexes de l'ensemble des écosystèmes aquatiques d'eau douce, saumâtre ou salée. Elle peut être progressive ou brutale. Les effets les plus notables sont des proliférations de producteurs primaires (plantes aquatiques, algues, cyanobactéries), des phénomènes de toxicité ou d'anoxie (absence d'oxygène), des pertes de biodiversité (Pinay et *al.*, 2017).

D'après Deslonchamps et *al.* (2021), l'eutrophisation est un processus naturel qui affecte les écosystèmes aquatiques, mais qui peut être accéléré par des apports d'origine anthropique.

2. Causes de l'eutrophisation et les facteurs favorisant

Selon Volterra et Boualam (2003), La principale cause d'eutrophisation est l'apport massif de nutriments dans une masse d'eau tandis que le confinement des masses d'eau (temps de renouvellement) est la première condition favorisant le développement de cette dernière.

Toutefois, comme le soulignent Galvez-Cloutier et *al.* (2002), les caractéristiques du plan d'eau peuvent en accentuer ou en atténuer les effets d'eutrophisation.

. ***Enrichissement de l'eau par les nutriments*** ; peut être d'origine naturelle, mais il est souvent accentué significativement par les activités humaines. C'est un phénomène ubiquitaire. Il y a trois voies principales permettant l'apport de nutriments d'origine humaine : le ruissellement, l'érosion et la percolation en provenance de zones agricoles fertilisées, les rejets d'eaux résiduelles urbaines, et les rejets industriels. Le dépôt atmosphérique d'azote (venant de l'élevage animal et des gaz de combustion) peut également être important (Volterra et Boualam, 2003).

. ***Confinement des masses d'eau*** ; peut se produire de manière physique, comme dans un lac ou une rivière au débit suffisamment bas pour qu'elle opère « en piston » (les eaux situées en amont ne se mélangent pas avec les eaux situées en aval), ou dans une perspective dynamique (Volterra et Boualam, 2003).

. ***Facteurs favorisant le développement de l'eutrophisation*** ; La stratification thermique des eaux stagnantes (tels que les lacs et les bassins), la température de l'eau et l'intensité de la lumière jouent un rôle sur le développement des algues. L'augmentation de la luminosité et de la température durant le printemps et l'été expliquent pourquoi l'eutrophisation est un phénomène éminemment saisonnier. La pénétration de la lumière dans l'eau est affectée par l'eutrophisation. En effet, le développement des algues et autres végétaux génère un effet d'ombre qui réduit la

photosynthèse dans les couches profondes, aussi la croissance des herbes aquatiques et des algues du fond s'en trouve limitée (Volterra et Boualam, 2003).

3. Mécanisme de l'eutrophisation

Le mécanisme général est commun aux écosystèmes d'eau douce et marins : l'augmentation des nutriments entraîne une forte augmentation de la productivité primaire, la zone de production primaire se concentre vers la surface de la colonne d'eau sur une épaisseur de plus en plus faible, la pénétration de la lumière diminuant par auto-ombrage à mesure que la biomasse produite augmente.

Les réponses engendrées par une perturbation seront dans un premier temps détectables au niveau physiologique/ biochimique d'un individu, puis au niveau morphologique ou comportemental, et enfin aux niveaux des populations et des communautés.

Au niveau des communautés, une augmentation des apports nutritifs va se traduire par une succession de différents groupes fonctionnels de producteurs primaires et des changements dans la structure et le fonctionnement des communautés, allant jusqu'à une perte significative de biodiversité des écosystèmes aquatiques.

Les efflorescences de microalgues nuisibles ; on distingue des proliférations d'espèces produisant des toxines affectant l'homme ou d'autres communautés d'organismes de l'écosystème et des proliférations causant des nuisances en raison de leur forte biomasse générant des anoxies ou des dommages mécaniques.

Lors d'efflorescences massives, de microphytes comme de macrophytes, la dégradation des fortes biomasses générées induit un appauvrissement en oxygène du milieu, jusqu'à de possibles hypoxies ou anoxies. En absence d'oxygène libre dissous, certains micro-organismes hétérotrophes sont capables d'utiliser l'oxygène présent dans la molécule de nitrate (NO_3) pour oxyder les matières organiques (dénitrification). Lorsque tous les nitrates sont consommés (réduits), différents micro-organismes sont capables d'utiliser l'oxygène présent dans les oxydes de manganèse (MnO_3), les oxydes de fer (FeO_3), et les sulfates (SO_4). Finalement, lorsque tous ces oxydants sont réduits, les micro-organismes méthanogènes sont capables de dégrader les matières organiques en méthane (CH_4). Ces réactions d'oxydoréduction produisent du gaz carbonique (CO_2), de l'hydrogène sulfuré (H_2S) ou du méthane (CH_4) émis dans l'eau puis l'atmosphère.

L'émission des gaz toxiques H_2S et CH_4 dans les eaux entraîne la mort de la plupart des organismes pluricellulaires fixés au substrat en quelques minutes, aboutissant à des « zones mortes » temporaires ou permanentes. Les espèces mobiles et notamment les herbivores quittent le milieu s'ils le peuvent, amplifiant la production de biomasse végétale par absence de régulation « *top down* ».

Ainsi, les mécanismes de base de l'eutrophisation sont communs à tous les milieux aquatiques. Ils revêtent cependant des expressions et des dynamiques variées suivant les écosystèmes, leur localisation et les espèces présentes (Pinay *et al.*, 2017).

4. Statuts trophiques des lacs

D'après Planas *et al.* (2014), l'eutrophisation d'un lac est son passage du statut de lac oligotrophe ou mésotrophe à celui de lac eutrophe, par un enrichissement du lac en nutriments.

4.1. Lac oligotrophe

Ce lac est généralement peu affecté par les actions humaines, très dépourvu de nutriments et faiblement productif (Planas *et al.*, 2014). Il constitue un jeune lac, se distinguant par des eaux transparentes, une profondeur habituellement importante et la présence d'oxygène dissous dans toute sa masse (Richer-Bond et Genest, 2013).

4.2. Lac mésotrophe

Un stade transitoire entre les stades oligotrophe et eutrophe, habituellement marqué par une faible quantité d'oxygène dissous, une augmentation des composants organiques et une réduction de la clarté de l'eau (Richer-Bond et Genest, 2013).

4.3. Lac eutrophe

Lac dont la productivité est élevée ; généralement peu profond, peu ou très peu transparent et riche en substances nutritives avec des déficits fréquents en oxygène dissous dans la saison chaude (Richer-Bond et Genest, 2013). Ceci se produit quand les apports très importants de phosphore provenant des activités humaines s'accumulent dans les sédiments au fil des ans. Le phosphore n'est plus un élément limitant, les algues peuvent proliférer et, en croissance épidémique, former des efflorescences. Même quand les sources externes de phosphore sont contrôlées, le phosphore accumulé dans les sédiments peut mettre plusieurs années à diminuer (Planas *et al.*, 2014).

5. Conséquences de l'eutrophisation

Les effets de l'eutrophisation sur les écosystèmes aquatiques, les activités humaines et la santé sont multiples. On peut classer ces impacts en trois catégories majeures : les aspects écologiques, sanitaires et économiques.

5. 1. Conséquences écologiques

5. 1. 1. Atterrissement accéléré des zones humides

Le comblement des zones humides est une procédure naturelle. D'un côté, la perturbation de l'équilibre trophique, et de l'autre côté, une surabondance de substances suspendues provoquent

un comblement accéléré. Il est clair que les milieux fermés comme les marais, les lagunes, les étangs et les gravières de faible profondeur sont plus vulnérables au comblement que d'autres sortes de zones humides (CNRS et CERR, 2000).

5. 1. 2. Perte de biodiversité

L'eutrophisation entraîne la disparition des espèces vivantes vulnérables et une diminution de la diversité écologique du milieu (CNRS et CERR, 2000). Cette disparition est due d'une part à la perte d'oxygène de l'eau, et d'autre part à la prolifération d'algues nuisibles microscopiques qui produisent des substances nocives appelées biotoxines comme les phytotoxines, susceptibles de causer la mort d'autres espèces aquatiques comme les poissons (Faurie, 2011).

5. 2. Conséquences sanitaires

La santé des populations exposées, qu'elles soient animales ou humaines, peut être affectée de diverses façons par un milieu eutrophe ; l'utilisation de l'eau douce provenant des zones eutrophes pour la production d'eau destinée à la consommation humaine engendre des dangers spécifiques pour la santé, la santé des animaux qui consomment des eaux eutrophes peut aussi être affectée (Volterra et Boualam, 2003). Selon Bertrand et *al.* (2004), plusieurs cyanobactéries ou « algues bleues », capables de se propager en tant qu'efflorescences ou « fleurs d'eau », produisent des toxines désignées sous le nom de cyanotoxines. Les hépatotoxines ou neurotoxines, qui peuvent causer des intoxications chez les animaux ou les humains dans toutes les parties du monde, constituent les plus dangereuses. Il est assez délicat d'établir le diagnostic pour ces intoxications.

5. 3. Conséquences économiques

Elles sont importantes en raison de :

- . La limitation, voire l'interdiction momentanée ou définitive des usages liés à la zone humide et de certains usages de l'eau,
- . La recherche de ressource de substitution quand elle existe ou la mise en place d'un traitement des eaux, lourd et coûteux

La dégradation de la qualité des eaux des zones humides peut avoir des conséquences importantes sur les usages alimentation en eau potable, alimentation en eau industrielle (d'autant plus quand il n'existe pas de ressource de substitution) et sur des fonctions de production (pisciculture, ostréiculture...) (CNRS et CERR, 2000).

Ces 10 dernières années, principalement au niveau monétaire, des essais ont été menés pour estimer les effets de l'eutrophisation sur les eaux continentales, littorales et marines. Elles traitent de quatre catégories d'enjeux : (1) les effets sur la qualité de l'eau, l'environnement et le changement climatique, (2) les conséquences pour la santé et le bien-être des individus, (3) les

impacts sur les opérations commerciales et (4) la manière de réinjecter l'eutrophisation dans une ligne continue. Ces recherches suggèrent que l'obtention d'une valeur globale de tous les impacts liés à l'eutrophisation est infaisable (Pinay et *al.*, 2017).

Chapitre IV.

Problématique des excédents hydriques **dans l'oasis de Ouargla**

La zone aride ne possède pas de cultures sans irrigation ou arrosage : l'oasis est donc l'appellation de ces zones de culture irriguée en permanente de surface très limitée par rapport à l'étendue désertique (Garcier et Bavard, 2014). Il en est de même pour l'oasis de Ouargla où les cultures sont principalement composées de palmiers.

1. Situation géographique de l'Oasis de Ouargla

L'oasis de Ouargla, située dans le sud-est algérien (Figure 1), à 800 km de la capitale, Alger (Idder et *al.*, 2013). Elle est citée parmi les plus anciennes du Sahara, née comme l'essentiel des oasis du commerce transsaharien dont elle fut un important « port », est aujourd'hui l'une des plus grandes villes sahariennes, métropole régionale affirmée, aux fonctions diversifiées, regroupant une population d'environ 140.000 habitants (Bensaad, 2013).

L'agglomération de Ouargla comprend Ouargla, Rouissat et Aïn Beïda qui forment une seule unité urbaine (Bonard et Gardel, 2003).

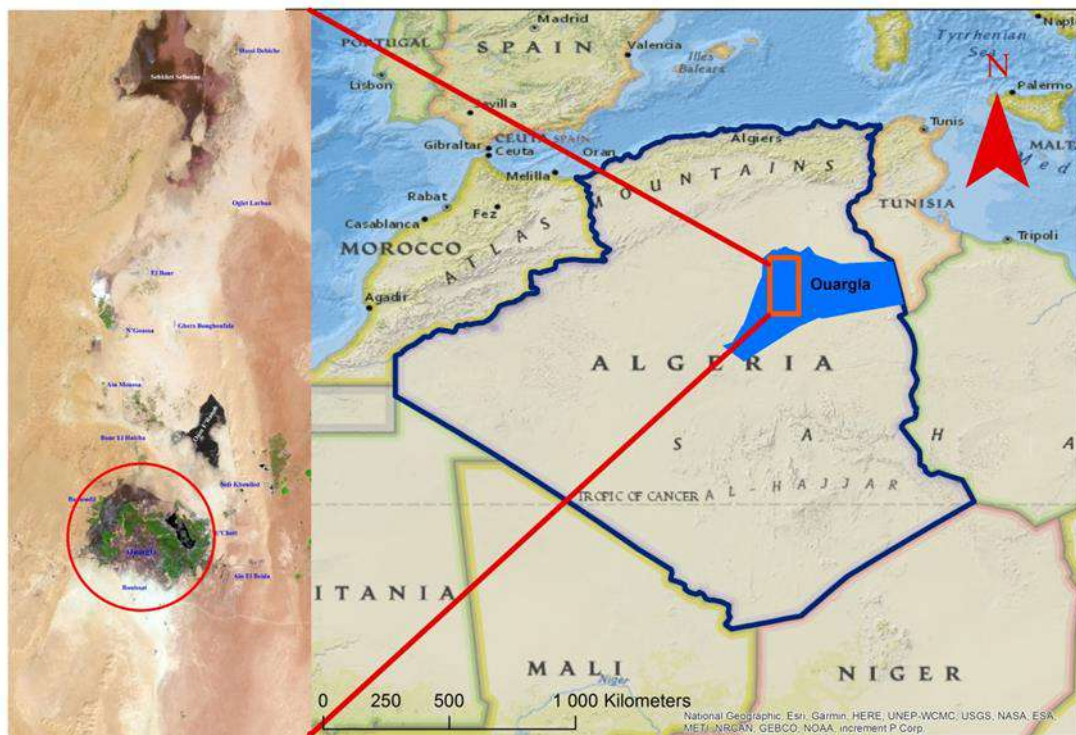


Figure 1. Situation géographique de l'oasis de Ouargla (Carte personnelle, 2025).

2. Excédents hydriques dans l'oasis de Ouargla

Ils se distinguent par l'émergence de grandes quantités d'eau supplémentaires. Ce problème représente une véritable menace pour l'environnement et les répercussions s'en font sentir à la fois dans les zones urbaines et les zones périphériques des zones habitées (Idder, 2007). Ce phénomène est observé aussi dans de nombreuses oasis du Bas Sahara algérien (Idder et *al.*, 2013).

Selon la classification établie par la Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie (DRIEE, 2020), la remontée de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla est un type d'inondation avec une montée lente des eaux en plaine.

3. Facteurs locaux des excédents hydriques

D'après les recherches menées par Côte (1998), Idder (2007), Idder *et al.* (2013) et (Idder *et al.*, 2014), les problèmes d'excès d'eau dans l'oasis de Ouargla sont associés à leur contexte naturel et à une gestion inefficace des eaux.

3.1. Facteurs naturels

3.1.1. Géomorphologie favorable à la stagnation des eaux

D'un point de vue géomorphologique, Ouargla a un contexte morphologique favorable à la stagnation des eaux (Idder *et al.*, 2014) ; où l'oasis de Ouargla et ses palmeraies sont installées dans une vaste cuvette sédimentaire qui constitue la basse vallée fossile de l'oued Mya qui draine le versant nord du plateau de Tadmait, situé à 700 km au sud de Ouargla, et qui se termine à la Sebkha de Safioune, à une vingtaine de kilomètres au nord de la ville (Hamdi-Aïssa & Girard, 2000). Cette situation a contribué à un manque d'exutoire naturel pour les eaux usées et de drainage, situé à proximité.

D'ouest en est on distingue (figure 2) :

- Le plateau de la hamada miopliocène, à l'ouest de Ouargla, il s'abaisse légèrement d'ouest en est. Il est à 220 mètres au-dessus de la vallée. A l'est, il est très fortement érodé laissant que quelques buttes témoins appelées « goure ».
- Les glacis sur les versants ouest de la cuvette s'étagent du plus ancien au plus récent, d'ouest en est sur quatre niveaux d'érosion de 200 à 140 mètres. Les glacis de 180 et de 160 mètres se caractérisent par des affleurements du substrat gréseux du miopliocène. L'est de la cuvette est un vaste glacis alluvial à sable grossier de 150 mètres d'altitude.
- Le chott et la sebkha constituent les points les plus bas. Le chott ou la sebkha sont constitués de sable siliceux et/ou gypseux à croûte gypseuse de surface et de sub-surface. En aval de Ouargla, diverses sebkhas alternent avec des massifs dunaires jusqu'à la Sebkha Safioune qui est à 103 mètres d'altitude et qui constitue le point le plus bas de la région.

Le sous-sol de la ville de Ouargla est formé de sables dunaires reposant sur des alluvions de l'oued avec localement des formations gréseuses indurées.

Dans la région de Ouargla, seuls les terrains du miopliocène affleurent, recouverts par endroits de formations de dépôts datant du quaternaire composés des ergs et des dunes (Bonard et Gardel, 2003).

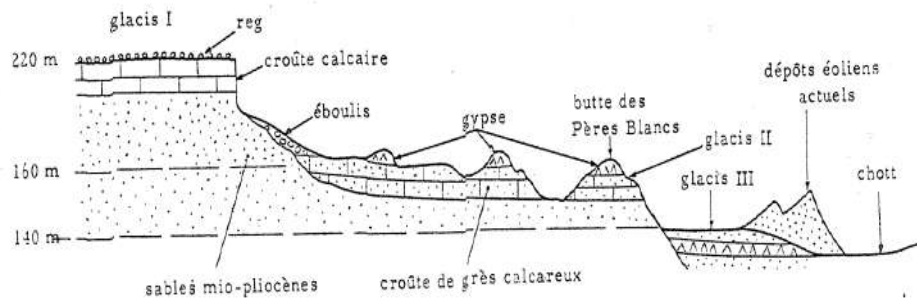


Figure 2. Schéma géomorphologique de la vallée de Ouargla (Bonard et Gardel, 2003).

3.1.2. Topographie entravant l'évacuation des eaux de drainage et d'assainissement

La planéité du relief pose de nombreuses contraintes techniques pour la mise en place des réseaux et l'évacuation des eaux de drainage et d'assainissement. Mis à part les extensions à l'ouest de la ville dans le quartier de Bamendil, le dénivelé total est seulement d'une douzaine de mètres entre Ouargla et le point le plus bas de la vallée soit une pente moyenne de 0,7‰. Ceci a des conséquences sur le système d'évacuation des eaux de drainage en dehors de l'agglomération de Ouargla.

Les faibles pentes entraînent des vitesses d'écoulement très faible et par conséquent une stagnation des eaux dans le réseau qui cause des odeurs très nauséabondes. Ceci nécessite la mise en place de stations de pompage et une pente minimale de réseau de 4‰ au niveau des travaux (Bonard et Gardel, 2003).

3.1.3. Caractères géologiques et pédologiques favorisant à la remontée des eaux

Selon Rouvillois-brigol (1975), la région de Ouargla se distingue par des sols légers à prédominance sableuse et une structure particulière. Ces sols se distinguent également par un taux de matière organique bas, un pH alcalin, une faible activité biologique, une salinité élevée et une aération adéquate. Selon (Hudson, 1990), ces caractéristiques provoquent des infiltrations importantes d'eau et facilitent la pénétration des eaux usées urbaines et agricoles dans les sols qui alimentent la nappe phréatique.

Dans l'étude menée par Charikh en 2023 concernant la perméabilité des sols de divers pédopaysages à Ouargla, les analyses physicochimiques indiquent que le sol est sableux (97,86%), sans salure ni extrême salinité, neutre à modérément alcalin, peu humide et sans calcaire. Ils présentent une capacité de drainage optimale et une perméabilité moyenne de 4,43 m/j, ce qui facilite le déplacement des polluants vers les nappes phréatiques.

D'après la coupe géologique synthétique élaborée par Houari et *al.* (2014), la structure géologique de la zone est marquée par une superposition complexe de formations sédimentaires. L'Albien est principalement détritique avec des grès et du sable, alors que le Cénomaniens se caractérise par des argiles dolomitiques accompagnées de calcaires occasionnels. Des bancs de calcaire fins caractérisent le Turonien. Le Sénonien est plus complexe, se subdivisant en trois catégories : la salifère, l'ahydrétique et la carbonatée. Sa hauteur moyenne se situe entre 200 et 240 mètres. L'Eocène se divise en formations évaporitiques et carbonatées, atteignant des épaisseurs variant de 50 à 200 m en fonction du territoire. Finalement, le Mio-Pliocène offre la possibilité d'interactions entre les nappes d'eau sans obstacles imperméables manifestes.

Ces formations présentent une perméabilité et une rétention d'eau inégale ; le sable, les grès et certaines sortes de calcaires présentent généralement une perméabilité en autorisant la circulation de l'eau, tandis que les argiles, les marnes, l'anhydrite et les sels présentent généralement une imperméabilité ou une faible perméabilité, à moins d'existence de fractures ou de structures karstiques, ce qui affecte directement la gestion des ressources hydriques et l'environnement local.

Pour conclure, l'aquifère phréatique est bercé par des dépôts de sable-gypseux perméables datant du Quaternaire (Slimani et *al.*, 2023). Ainsi, ce genre de dépôt garantit la recharge de la nappe phréatique, mais facilite cependant sa contamination par les apports anthropiques.

3. 1. 4. Nappe phréatique proche de la surface du sol

D'après Roland (2010), la nappe phréatique est une nappe « libre », c'est-à-dire une nappe dont le niveau piézométrique n'est déterminé que par la perméabilité du terrain à travers lequel l'eau d'infiltration pénétrer. La nappe libre dont la surface piézométrique est peu profonde est connue sous le nom de nappe phréatique.

A Ouargla, cette nappe est contenue dans les alluvions de la vallée de l'Oued Mya. Dans l'agglomération et dans les palmeraies, sa profondeur varie, en moyenne, entre 0,5m et 1,5m par rapport au niveau du sol, mais dans les zones les plus basses, elle se trouve pratiquement à fleur de sol. En bordure de la cuvette, on peut en revanche la rencontrer à des profondeurs plus importantes (Idder, 1998).

Elle est partout présente au Sahara dans les dépressions ou les vallées ; elles sont alimentées par les pluies, les crues, les écoulements diffus, les eaux de drainage et aussi très souvent par les remontées naturelles en provenance des aquifères plus profonds ou encore par les fuites dans les ouvrages exploitant ces dernières (Dubost, 2002).

3. 1. 5. Conditions climatiques extrêmes :

La région de Ouargla se distingue, tout comme le reste du Bas Sahara, par un climat désertique (Khadraoui, 2005). La notion d'excès d'eau en milieu désertique peut sembler étrange à première vue. Cependant, il s'agit d'une réalité qui existe depuis de nombreuses années déjà dans une grande partie des oasis du Sahara algérien (Idder et *al.*, 2014). L'existence de conditions climatiques désertiques dans la cuvette de Ouargla peut donc favoriser la remontée des eaux souterraines dans cette région. Afin d'établir cette relation, nous avons analysé les données climatiques de la région de Ouargla pour la période de 2010 à 2019 (Tableau 1).

Tableau 1. Paramètres météorologiques de la station de Ouargla durant (2010 -2019). (ONM, 2020)

Les mois	T max (°C)	T min (°C)	Tmoy(°C)	Hr(%)	V(km/h)	P(mm)	Evap(mm)	Ens (h)
Janvier	18,7	4,96	12,06	55,25	30,24	2,30	19,95	208,06
Février	20,88	6,34	13,58	50,73	34,60	7,46	143,79	216,77
Mars	25,73	10,34	18,7	45,87	39,20	6,51	198,7	237,68
Avril	29,13	14,73	22,73	36,97	43,74	0,61	256,92	245,63
Mai	36,6	19,53	27,18	26,3	46,44	1,81	318,96	257,73
Juin	40,18	24,94	31,97	23,48	46,44	0,19	373,12	207,24
Juillet	43,25	27,19	35,45	21,45	37,15	0,05	419,01	263,71
Août	41,91	26,83	34	24,95	38,23	0,86	96,84	272,83
Septembre	37,24	23,75	30,82	31,92	9,00	7,96	280,68	231,39
Octobre	31,66	18,36	26,25	37,78	32,08	8,22	225,72	231,15
Novembre	23,9	10,34	16,64	51,07	25,20	4,38	134,9	197,25
Décembre	18,84	5,62	11,59	58,39	26,46	1,77	117,71	189,53
Moyenne	30,67	16,08	23,41	38,68	34,07	42,11*	2559,35*	233,59

Tmax: Température maximale/ Tmin: Température minimale/ Tmoy: Température moyenne/
Hr: Humidité relative/ V: Vents/ P : Précipitations/ Evap: Evaporation/ Ens : Ensoleillement/

*Cumul.

. Pluviométrie

La quantité de précipitations annuelle est de 42.11mm. Dans les mois les plus secs (juin, juillet, août), elles atteignent seulement 0.05mm, tandis que dans le mois le plus pluvieux (octobre), elles atteignent 8.22mm. Cette quantité limitée de pluie réduit considérablement la recharge naturelle de la nappe phréatique.

. Température

La température moyenne pendant le mois le plus froid (décembre) est de 11,59°C, tandis que celle pendant le mois le plus chaud (juillet) est de 35,45°C.

. Vitesse du vent

La vitesse moyenne du vent à Ouargla varie légèrement selon les saisons tout au long de l'année. Les mois les plus venteux de l'année sont du mars au juin, avec des vents moyens dépassant 39 kilomètres par heure. Le mois de mai et de juin sont les mois les plus venteux de l'année à Ouargla, avec une vitesse moyenne du vent de 46,44 km/h.

La période la plus calme de l'année dure 5 mois, de septembre à janvier. Le mois le plus calme de l'année à Ouargla est septembre, avec une vitesse horaire moyenne du vent de 9 kilomètres par heure.

. Ensoleillement

Au cours de l'année, la quantité de rayonnement solaire incidente à la cuvette de Ouargla varie considérablement selon les saisons.

La période la plus lumineuse de l'année dure 5 mois, d'avril à août, avec une durée d'ensoleillement supérieur à 240 heures. Le mois de l'année le plus lumineux à Ouargla est août, avec une durée moyenne de 272,83 heure. La période la plus sombre de l'année dure 3 mois, du novembre au janvier, avec une durée d'ensoleillement inférieur à 208 heures. Le mois de l'année le plus sombre à Ouargla est décembre, avec une durée d'ensoleillement de 189,53 heure.

. Humidité relative

La moyenne annuelle de l'humidité relative à Ouargla est de 38,68 %. On constate les plus faibles niveaux d'humidité relative en juin, juillet et août, avec des valeurs inférieures à 25 %. Les niveaux les plus élevés sont observés en janvier-décembre, avec une variation de 55-58 %.

. Evaporation

Le taux annuel moyen d'évaporation à Ouargla est évalué à 2559,35 mm. Les plus élevés taux mensuels ont été observés pendant les trois mois de mai, juin et juillet, par des valeurs dépassant 300 mm, avec une valeur maximale en juillet de 419,01 mm, cette forte évapotranspiration due aux hautes températures. Un grand volume d'eau susceptible de remplir les nappes est épuisé dans l'atmosphère. Cela implique que même les précipitations ne participent pas forcément de façon significative à la recharge puisqu'elles peuvent rapidement s'évaporer ou transpirer.

. Synthèses climatique

Étant donné que les éléments climatiques ne fonctionnent jamais de manière séparée, de nombreux utilisateurs, tels que les écologues et les climatologues, ont tenté de présenter le climat à l'aide de formules réunissant ses principales variables. La plupart des formules utilisées combinent les précipitations et la température.

a. Diagramme Ombrothermique de Gaussen 1952

Si le rapport des précipitations mensuelles « P » exprimées en (mm) et la température moyenne « T » exprimée en (°C) est inférieur à deux (02), Gaussen considère un mois « sec ». Les diagrammes ombrothermiques sont obtenus en représentant sur un même graphique la température et les précipitations moyennes mensuelles, en abscisse les mois, et en mettant en évidence les saisons sèches et les saisons pluvieuses (Gérard, 1999).

L'analyse du diagramme ombrothermique de l'oasis de Ouargla a révélé qu'elle se distingue par une période sèche qui se prolonge tout au long de l'année (Figure 3), ce qui conduit à un surexploitation des ressources souterraines, un facteur contribuant à la montée de la nappe phréatique.

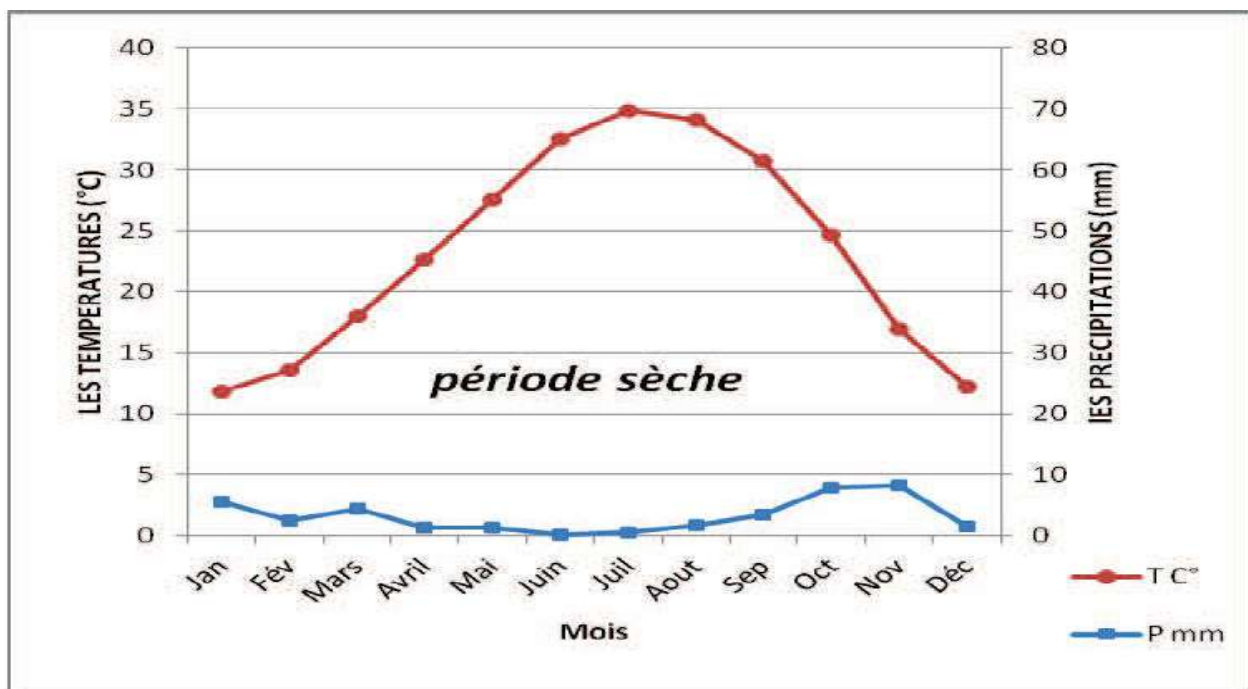


Figure 3. Diagramme Ombrothermique de Ouargla.

b. Climagramme d'Emberger

Le quotient pluviométrique d'Emberger (Q_c) élaboré en 1990 est spécifique au climat méditerranéen, il tient compte des précipitations et des températures, et nous révèle l'étage bioclimatique, la formule établit par Stewart (1989) est comme suit :

$$Q_c = 3.43 \frac{P}{M - m}$$

Avec :

Q_c : Le quotient pluviométrique d'Emberger.

P : la pluviométrie annuelle en mm

M : la température maximale moyenne du mois le plus chaud en °C.

m : la température minimale moyenne du mois le plus froid en °C.

Après l'emplacement de $Q_c =$ sur le Climagramme pluviométrique d'Emberger (Figure 4), l'oasis de Ouargla appartient à l'étage bioclimatique saharien à hiver doux, dont le quotient pluviométrique (Q_c) de Ouargla est enregistré comme étant de 3,77.

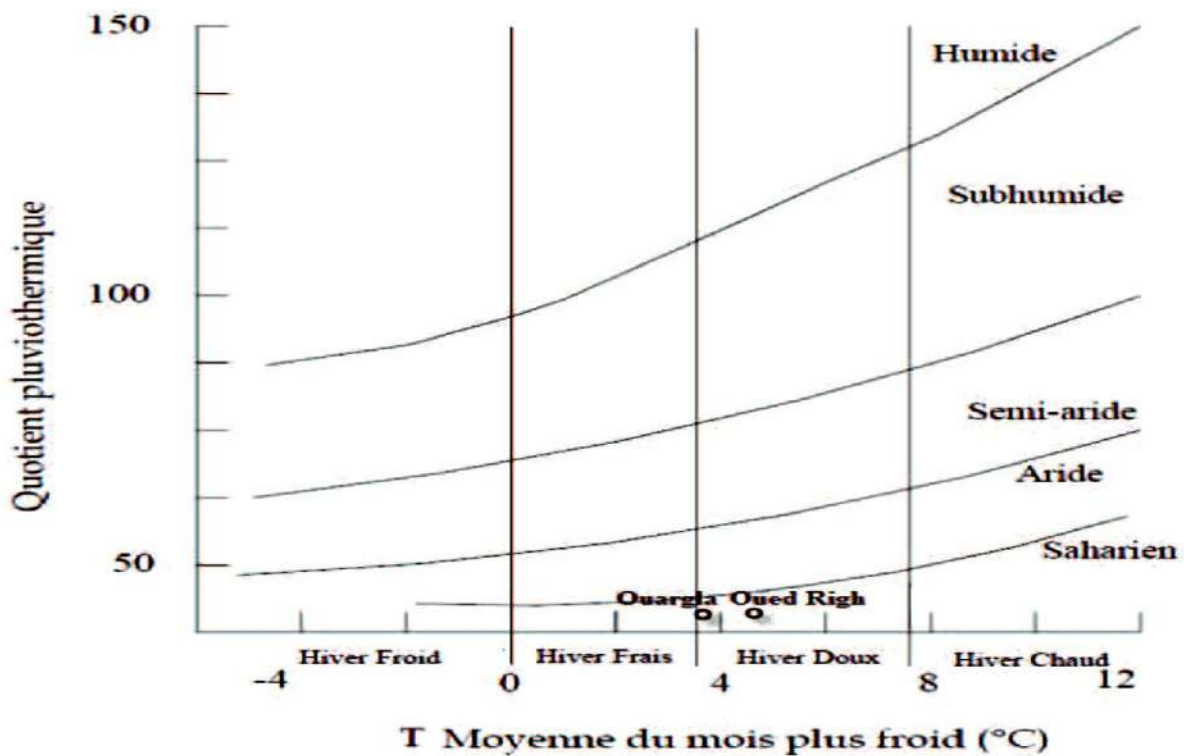


Figure 4. Climagramme d'Emberger de Ouargla.

3. 2. Facteurs anthropiques

D'après Bergeron et *al.* (1983), le développement économique implique une intervention sans cesse croissante de l'homme sur le milieu souterrain celui-ci est en effet sollicité pour l'extraction des ressources minérales et énergétiques, et pour l'exploitation de l'eau qu'il renferme. Les aménagements de surface tout comme les activités touchant au sous-sol et en particulier à l'eau souterraine, peu vent occasionnellement avoir des répercussions néfastes sous la forme de remontées de nappe. Dans leur étude de 2001, Faouzi et Larabi ; ont démontré que la remontée de la nappe de Béni-Amir dans la plaine du Tadla au Maroc est principalement due aux quantités et aux méthodes d'irrigation utilisées sur le territoire, ainsi qu'à la topographie et à la géologie de la plaine.

Selon Idder et *al.* (2013), la surexploitation des ressources en eau et l'absence d'un système efficace de drainage et d'évacuation des eaux usées urbaines forment les causes principales de l'apparition du phénomène d'excédent d'eau et de remontée du niveau de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla.

3.2.1. Surexploitation des ressources en eau

3.2.1.1. Ressources en eau

A Ouargla, comme dans la plupart des oasis du Sahara, les seules ressources hydriques disponibles sont d'origine souterraine (Idder, 1998).

La région de Ouargla repose sur un énorme réservoir d'eaux souterraines, il s'agit du système aquifère du Sahara septentrional qui renferme une série de couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs appelés communément : le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT) (Figure 5) (Houari et *al.*, 2014), s'ajoute aux deux précédentes, la nappe phréatique ou nappe superficielle (Idder, 1998), les eaux de la nappe phréatique sont de très mauvaise qualité et ne conviennent pas à l'usage agricole. En effet, leur degré de minéralisation dépasse 70 mS/cm dans certains endroits de la cuvette (Idder et *al.*, 2013).

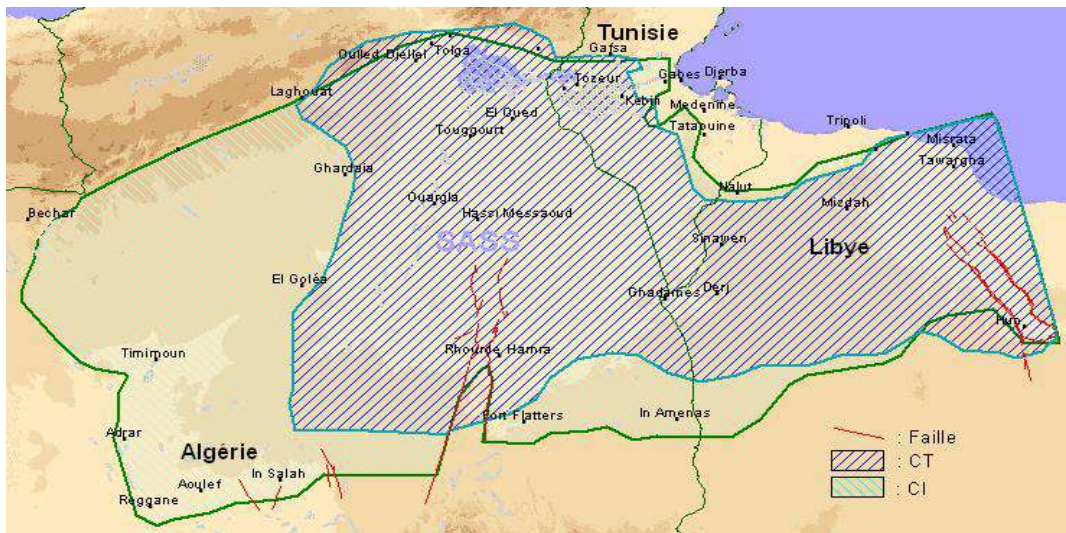


Figure 5. Localisation du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) (Sahel, 2003)(OSS, 2003).

. Continental Intercalaire(CI) et la nappe dite de l'albien

La nappe de continental intercalaire couvre une superficie de 600000 Km², elle s'étend pratiquement sur l'ensemble du bassin sédimentaire du Sahara, avec une profondeur variable d'une région à une autre (en affleurement dans la région de Adrar et Temimoune et dépasse 1000 m au centre du Sahara) (Figure 6) (Dubost, 2002).

Les eaux de la nappe du continental intercalaire sont relativement peu minéralisées par rapport aux eaux des nappes du complexe terminal et de la nappe phréatique. Néanmoins, elles posent d'énormes soucis, en raison de la difficulté de maîtriser leurs débits. Les eaux de cet aquifère montrent une tendance à l'entartrage et des fortes températures qui influent sur leur qualité. L'accès à ces eaux se fait à l'aide de forages profonds qui traversent d'importantes couches salifères (Idder et *al.*, 2013).

. Complexe Terminal (CT)

Ce complexe couvre une partie du bassin oriental du Sahara septentrional sur environ 350000Km² (Figure 6), sa profondeur varie de 100 à 400 m et il alimente l'essentiel des palmeraies du Bas-Sahara (Ziban, Oued Rhir, Souf et Ouargla) (Hamdi-Aissa, 2001).

Le complexe terminal regroupe des formations aquifères contenues dans les horizons perméables du Crétacé supérieur et du Tertiaire.

Sur le territoire algérien, il existe en effet deux formations aquifères distinctes ; la première est contenue dans les sables du Moi-Pliocène, tandis que la seconde se trouve dans le Sénonien supérieur et l'Eocène inférieur (Sénonien pour Ouargla principalement) (Idder, 1998).

L'écoulement de CT se fait du sud-Ouest vers le nord-est, en direction du chott Melghir. La salinité de cette dernière varie de 1,8 à 4,6 g/l. elle fournit les deux tiers de ressources hydrauliques disponibles de la région de Ouargla (Hamdi-Aissa, 2001).

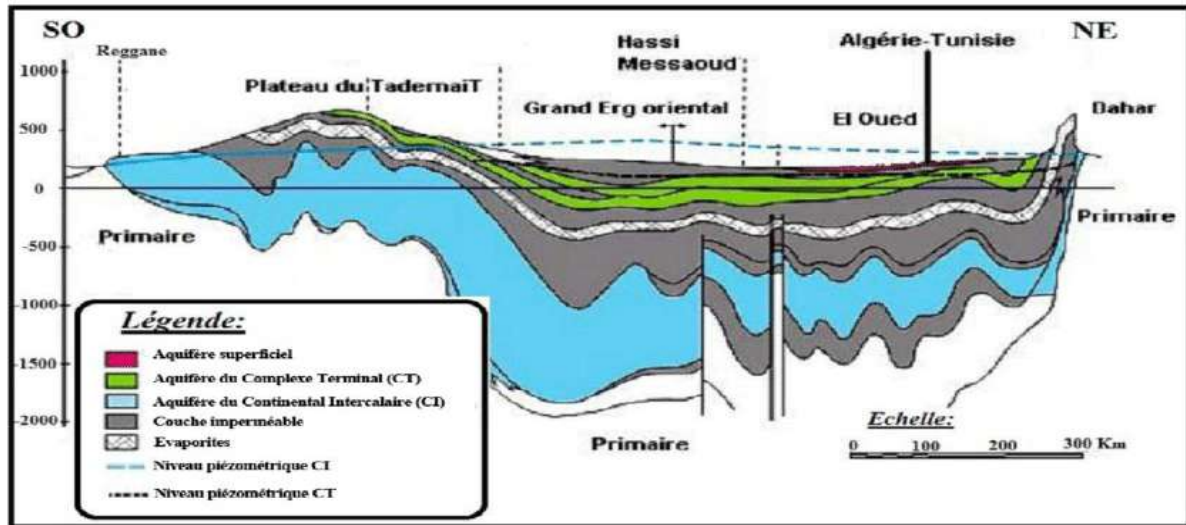


Figure 6. Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrional (UNESCO, 1972).

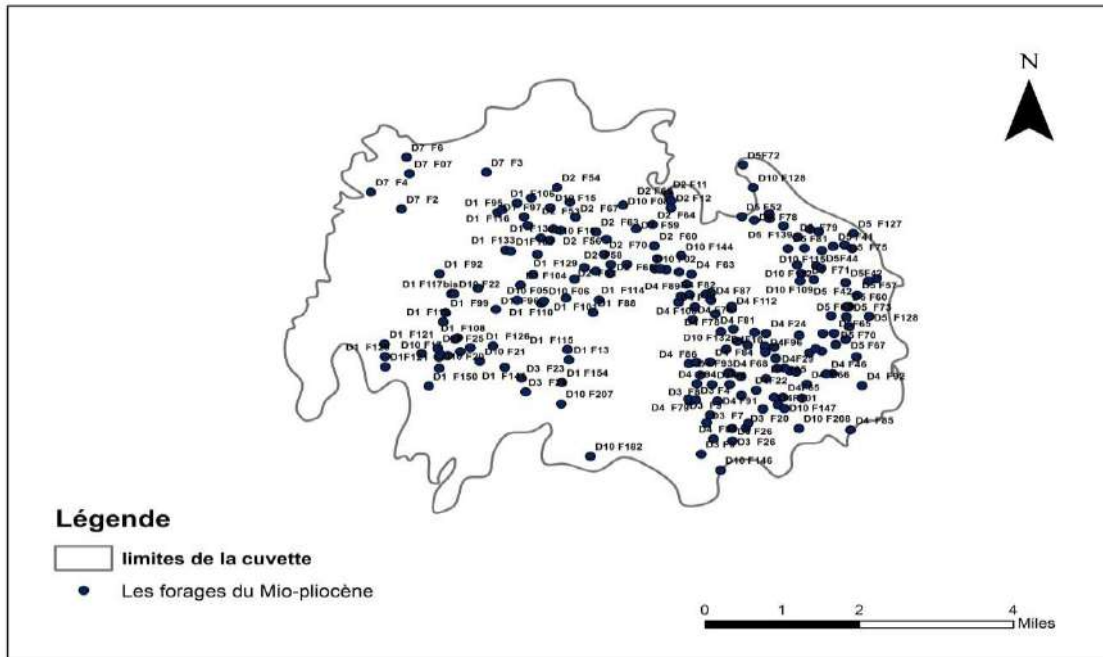
3.2.1.2. Exploitation actuelle des ressources en eau

Dans les oasis du Sahara algérien, l'accroissement des besoins en eau a conduit à un recours de plus en plus important à l'exploitation des nappes d'eau souterraines. L'exploitation intensive de ces nappes est apparue, aux décideurs, comme inévitable pour le développement des régions sahariennes (Idder, 2007). Cette mobilisation des ressources d'eau souterraine a permis la mise en place de multiples projets de mise en valeur de terres sahariennes qui se sont développés dans beaucoup d'oasis, et ce malgré les difficultés relatives à l'aménagement en milieu saharien.

Ces projets de mise en valeur ont été bénéfiques et ont permis, notamment, de développer les cultures maraîchères et céréalières. Cependant, l'accroissement important des débits utilisés pour l'irrigation, associé à un usage mal raisonné des ressources hydriques, a conduit à des gaspillages d'eau importants (Idder, 2013). Dans les oasis de Ouargla, on réalise des Séguia dans les palmeraies des vallées. Les puits étaient creusés dans la nappe phréatique pour assurer l'irrigation. L'amélioration des méthodes d'évacuation de l'eau a facilité la recherche d'eau par le biais de forages profonds. Par conséquent, deux méthodes de gestion de l'eau se rencontrent actuellement : la gestion personnelle du forage et celle communautaire (Amrani, 2021).

La détermination de l'état de l'exploitation actuelle des ressources en eau dans la Wilaya de Ouargla a été effectuée par l'exploitation des données de la direction des ressources en eau de la wilaya de Ouargla (Annexe 1) (ANRH, 2022) ; représentés par les cartes thématiques dans les figures 7 et 8.

Selon ces figures, les forages du complexe terminal – du moi-pliocène et du sénonien- dans la cuvette de Ouargla, étaient au nombre de 242 forages ; 203 dans le mio-pliocène et 39 dans le sénonien. Les premiers forages ont été réalisés et exploités dès le début des années 1900, et leur nombre a augmenté au fil du temps Jusqu'à ces dernières années, le Puits Annexe (D1 F88) a été réalisé et exploité en 1911, tandis que le forage de Sidi Amrane (D2 F72) a été réalisé et exploité en 2011. Les forages de cette nappe sont destinés à l'irrigation et l'appauvrissement en eau potable.



Le débit exploité par forage pour la période de 2021 est présenté dans l'annexe 1 (ANRH, 2022); d'après les chiffres présentés, nous remarquons que le débit exploité dans la cuvette est différent d'un forage à l'autre, il varie entre 5 et 45 l/s. La multiplication des forages a permis une augmentation très sensible des débits exploités, quand on compare le débit total prélevé dans ces deux aquifères en 2002 (Idder et *al.*, 2014) et en 2021, on constate que le débit exploité dans la cuvette a pratiquement été multiplié par 5 ; où il prend les valeurs suivantes : 1,9 m³/s en 2002 et 10,34 m³/s en 2021 (679 l/s (0,68 m³/s) pour sénonien 9664,88 l/s (9,66m³/s) pour le miopléocène).

On explique l'augmentation des débits exploités dans la cuvette de Ouargla par l'augmentation de la population. L'évolution de la population dans les trois communes de la cuvette pendant les années 1987, 1998 et 2021 est représentée dans la figure 09, cette dernière réalisée suivant les données de l'annexe 2. L'analyse de cette figure montre que le nombre des habitants augmente au fil du temps dans les trois communes, la population de la commune de Ouargla est trois fois plus importante que celle de Rouissat et cinq fois plus importante que celle de Ain Beida.

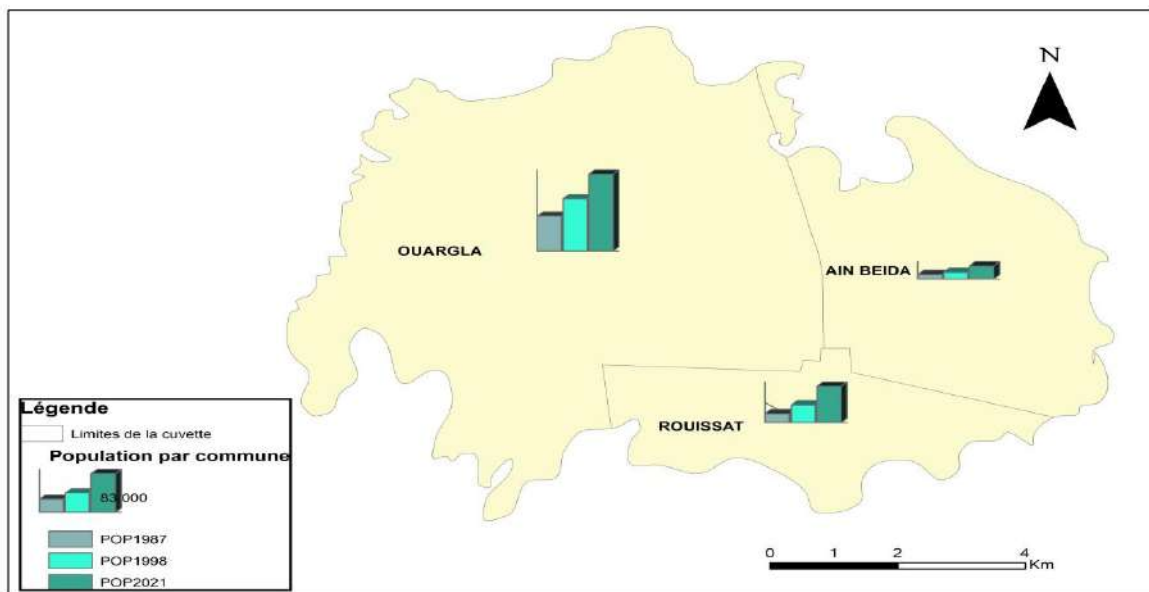


Figure 09. Population de la cuvette de Ouargla ; 1987, 1998 et 2021 (Carte personnelle, 2025).

D'après Idder (1998), le volume d'eau de drainage évalué est au moins, sans compter les secteurs de mise en valeur, 6,5 fois plus important que celui des eaux usées urbaines.

3. 2. 2. Absence d'un système efficace de drainage et d'évacuation

D'après Amrani (2021), en milieu agricole, au-delà de la sur-irrigation, des dysfonctionnements du réseau de drainage provoquent un gaspillage d'eau. En milieu urbain, Idder et *al.* (2013) notent l'absence d'un système efficace d'évacuation des eaux usées domestiques.

Idder en 1998 a déjà évoqué la même situation, soulignant que dans les palmeraies, les drains, quand ils existent, sont souvent mal structurés et leur hiérarchie est fréquemment aléatoire avec un manque flagrant d'entretien. Il a attribué les difficultés de drainage à la position topographique du terrain, tandis que le dysfonctionnement du système de collecte des eaux usées urbaines est lié à des causes financières et des difficultés pratiques.

La figure 10, représente le taux de couverture des réseaux d'assainissement dans chaque commune.

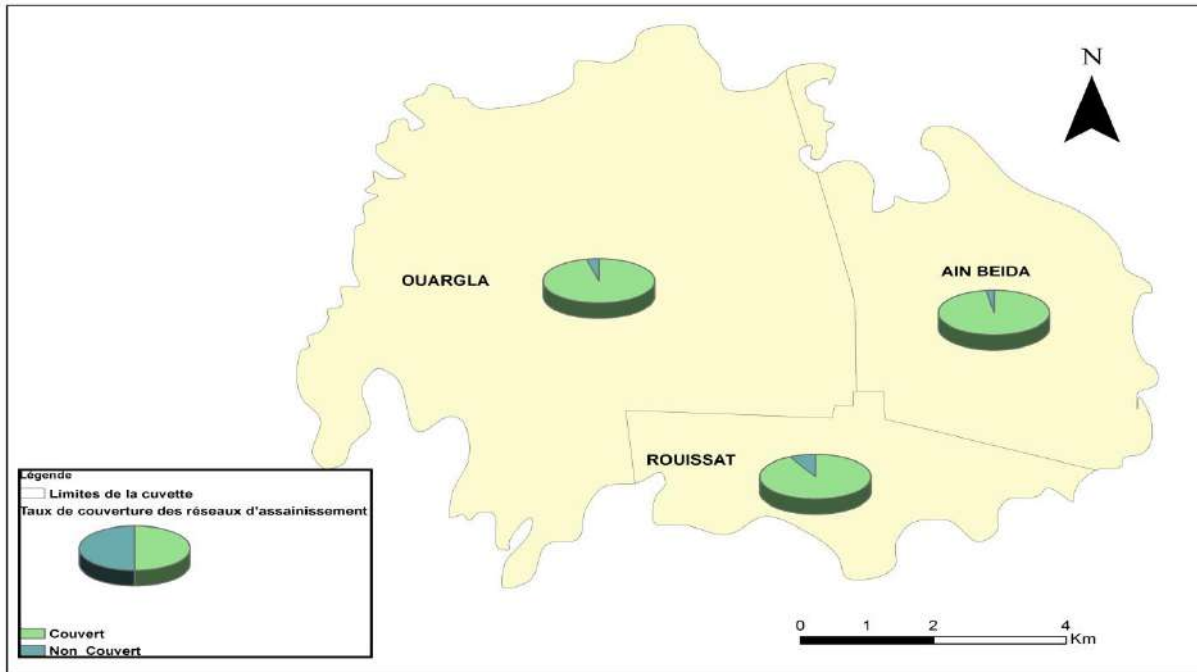


Figure 10. Taux de couverture des réseaux d'assainissement (Carte personnelle, 2025).

A partir de la figure, le taux de couverture du réseau d'assainissement au niveau des communes de la cuvette de Ouargla a atteint des valeurs supérieures ou égales à 90% ; 97% à Ain Beida, 95% à Ouargla et 90% à Rouissat. Selon Bonard et Gardel (2003), les valeurs enregistrées correspondent aux l'objectifs de la seconde tranche du projet d'assainissement de l'agglomération de Ouargla, cette tranche prend en compte la croissance démographique et l'augmentation du taux de raccordement de la population au réseau d'assainissement qui passera de 70% en 2005 à 95% en 2015 et 100% en 2030.

4. Impacts des excédents hydriques

Les excédents hydriques dans la cuvette de Ouargla affectent considérablement l'environnement, l'économie et de la vie sociale de la zone.

4. 1. Remonté des eaux de la nappe phréatique

Dans l'agglomération, d'énormes mares d'eaux usées stagnent en permanence dans les quartiers populaires. En saison chaude, ces mares se transforment en de véritables nids à moustiques et autres insectes nuisibles. Dans les palmeraies, la situation n'est guère meilleure. Les mauvaises herbes prolifèrent, gênent ou obstruent, parfois totalement, les écoulements. Les eaux stagnantes qui en découlent provoquent l'engorgement et le dépérissement de ces palmeraies (Idder et *al.*, 2013).

4. 2. Sur-salinisation des sols

Le phénomène de salinisation des sols irrigables de la palmeraie constitue la seconde principale conséquence des excédents hydriques. Ces sols sont le plus souvent très salés ou, plutôt, ils le sont devenus à la suite de l'intervention anthropique (Idder et *al.*, 2013).

5. Mesures prises pour gérer les excédents hydriques

Pour tenter de résoudre définitivement le problème de la remontée des eaux dans la cuvette et ses conséquences, les pouvoirs publics ont récemment lancé un projet d'envergure d'assainissement et de lutte contre la remontée des eaux de la nappe phréatique (Figure 11). Les aménagements concernent, essentiellement, la remise en état et l'extension du système de collecte des eaux usées excédentaires urbaines et agricoles et leur évacuation vers la Sebkhia Safioune après leur traitement par lagunage (Idder et *al.*, 2011).

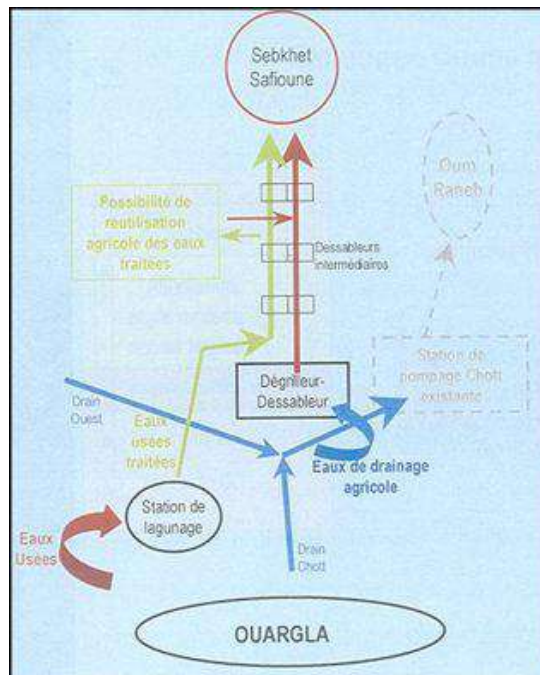


Figure 11. Nouveau schéma de gestion des excédents hydriques dans l'oasis de Ouargla, d'après Lager (2003).

Partie Pratique

Chapitre I.
Matériel et méthodes

Afin d'atteindre nos objectifs, nous allons tout d'abord examiner le procédé de traitement des eaux usées en analysant la composition physico-chimique des eaux résiduaires qui entrent et qui sortent de la station d'épuration de Ouargla. Cela permettra d'identifier l'origine de la salinité dans les eaux purifiées produites par celle-ci, tout en évaluant les volumes des boues produites par cette installation. Ensuite, nous envisagerons la possibilité de l'utilisation de ces dernières pour des objectifs agricoles. En second lieu, nous examinerons la qualité physico-chimique et le danger d'eutrophisation des eaux de Sebkhet Sefioune, qui est l'exutoire final des eaux résiduaires issues de la cuvette de Ouargla. Finalement, nous déterminerons comment les travaux visant à éliminer l'excès d'eau affecteront le niveau de la nappe phréatique.

Ce chapitre présentera le matériel et la démarche utilisés dans la réalisation de ces objectifs.

1. Suivi du processus de traitement des eaux usées

1. 1. Présentation du site expérimental

La station étudiée est située au Nord de l'agglomération de Ouargla, à une dizaine de kilomètres du centre-ville (Figure 12).

Elle est conçue pour traiter les effluents urbains de l'agglomération de Ouargla jusqu'à l'horizon 2030. La station est constituée des éléments suivants (Figure 13):

- Relevage et prétraitement des effluents bruts : poste de relevage, dégrillage et dessablage ;
- Etage 1 du lagunage aéré, composé des lagunes A1, A2, A3 et A4 de profondeurs égale à 3,5m.
- Etage 2 du lagunage aéré, composé des lagunes B1, B2, de profondeurs égale à 2,8m.
- Lagunes de finition, composées des lagunes F1 et F2, de profondeurs égale à 1,5m.
- Traitement des boues par lits de séchage.

La superficie occupée par les lagunes est d'une soixantaine d'hectares et celle des lits de séchage des boues issues du traitement est d'environ 10 hectares.

La technique du lagunage aéré consiste à traiter l'effluent par voie biologique avec apport artificiel d'oxygène. Les lagunes assurent la dégradation de la matière organique (caractérisée par le paramètre DBO_5) par les microorganismes (Ounoki et Achour, 2014).

La station d'épuration de Ouargla a été mise en service en 2009. Sa capacité totale est de 400000 EH (ONA, 2018). Depuis sa mise en service, les boues de traitement des eaux usées s'accumulent dans les bassins de lagunage et leur volume augmente avec le temps. Ces dernières années, il y a eu des quelques essais de curage des bassins et de séchage des boues pour les caractériser.

Les eaux usées produites par cette station sont évacuées par un canal d'évacuation parallèle à celui des eaux de drainage vers Sebkhet Safioune, un site d'évaporation, situé à une quarantaine de kilomètres au nord de la station d'épuration.

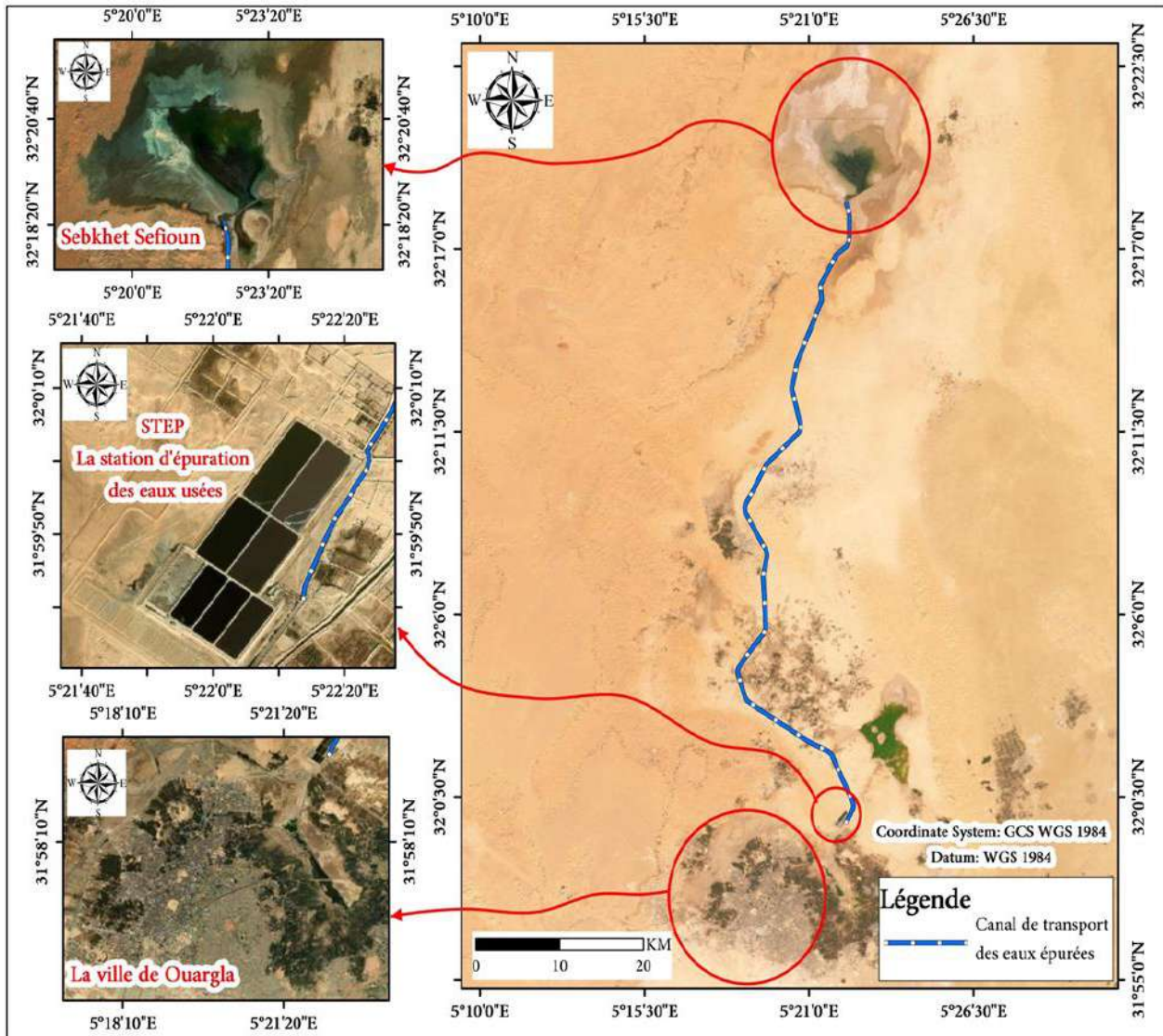


Figure 12. Situation du périmètre d'étude (Carte personnelle, 2025).

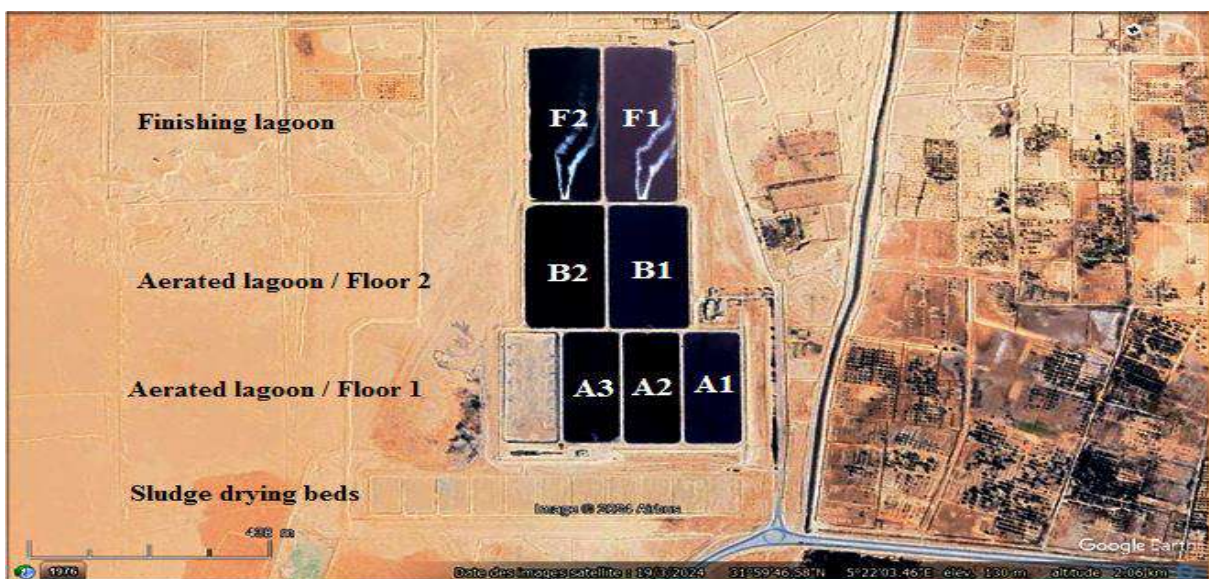


Figure 13. Schéma de principe de la station de lagunage de Ouargla.

De part et d'autre du canal de transport de l'eau épurée depuis la station, des exploitations agricoles se sont installées dont certaines utilisent cette eau pour l'irrigation. Cependant, selon Negais (2024), le souci lié à la salinité des eaux traitées a freiné le succès de ces travaux de mise en valeur agricole.

1. 2. Identification de l'origine de la salinité des eaux usées épurées

1. 2. 1 Echantillonnage des eaux

Nous avons effectué des prélèvements hebdomadaires en février et mars 2023. Pour identifier l'origine de la salinité des eaux usées qui entrent dans la station. Six échantillons ont été prélevés dans les canaux issus des stations de refoulement concernées par le traitement (Figure 14, Tableau 2), et un autre dans le bassin de collecte d'eaux usées (Entrée) (Figure 15). Le huitième échantillon a été prélevé suite à l'épuration des eaux pour établir la composition chimique de ces dernières à la sortie de la station d'épuration (Figure 16). Le schéma hydraulique de l'évacuation des eaux usées présente la disposition des stations de refoulement dans la figure 17.

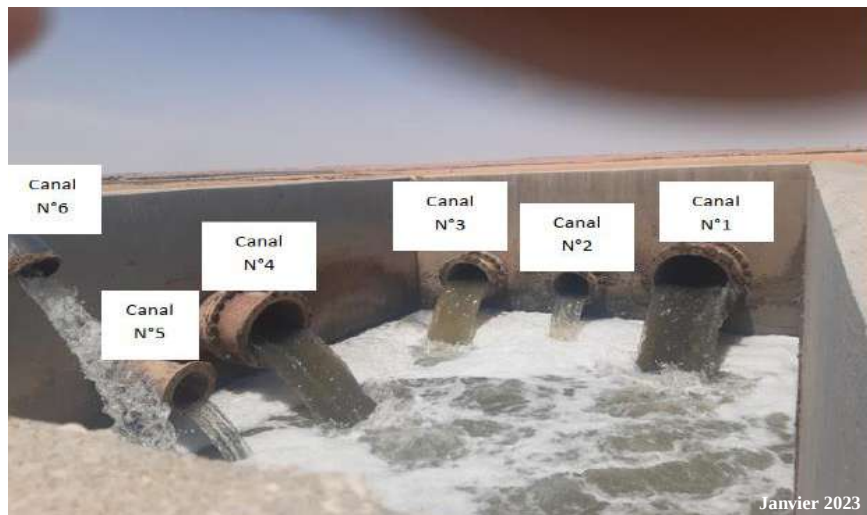


Figure 14. Canaux de collecte des eaux usées.

Tableau 2. Stations de refoulement concernées par le traitement et les canaux.

Canal	Station de refoulement	Diamètre (mm)
01	Station de route N'goussa	700
02	Station Caserne	400
03	Station Douane 02	600
04	Station Rejet Este	500
05	Route Sidi khouilde	315
06	Station Chott Ouest	250



Figure 15. Bassin de collecte des eaux usées (Entrée).



Figure 16. Bassin de sortie des eaux épurées (Sortie).

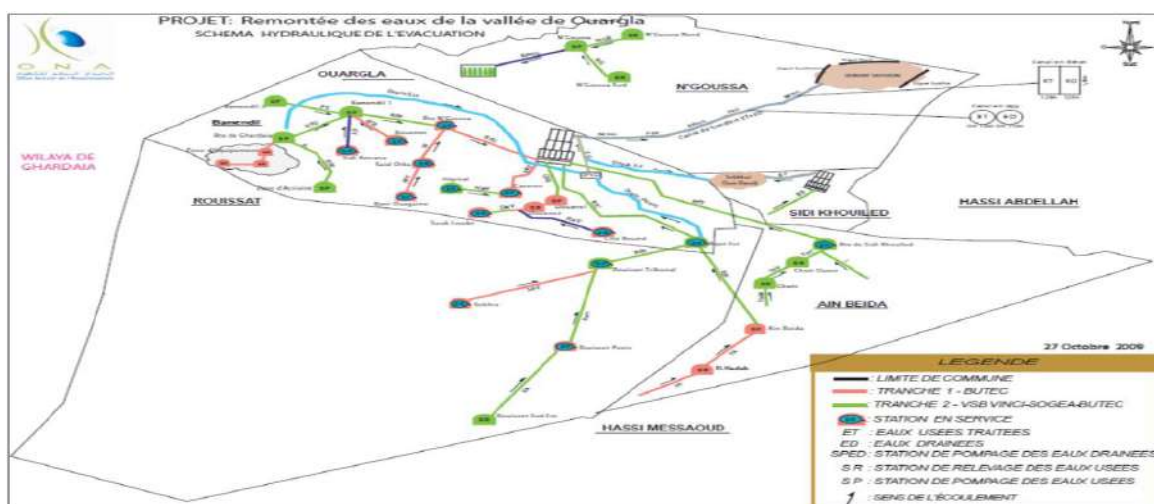


Figure 17. Schéma hydraulique de l'évacuation des eaux usées dans la cuvette de Ouargla (Bonard & Gardel, 2005).

Les échantillons ont été prélevés en utilisant des bouteilles de 1,5 l en plastique (polyéthylène). Avant de réaliser l'échantillonnage des eaux, les bouteilles ont été rincées trois fois avec de l'eau distillée. Les analyses sont effectuées immédiatement suite au prélèvement.

Les paramètres suivants sont utilisés pour estimer la salinité des eaux analysées : la température, le pH, la conductivité électrique et les ions qui constituent les facteurs contribuant à la salinité des eaux résiduelles : chlorure, calcium, magnésium, sodium, potassium, ammonium, orthophosphate et sulfates.

1. 2. 2. Caractérisation physico-chimique des eaux

La détermination du pH, la température et la conductivité électrique a été effectuée au moment du prélèvement à l'aide du multi-paramètre HANNA HI9829. Les différentes analyses des paramètres physico-chimiques ont été effectuées au laboratoire de Géologie du Sahara du centre de recherche scientifique (Université Kasdi Merbah- Ouargla). En ce qui concerne les ions:

.Le chlorure (Cl^-) ; a été déterminé selon la norme ISO 6495-1:2015 (R), à l'aide d'une méthode titrimétrique fondée sur la précipitation des ions chlorure par le nitrate d'argent, suivi de la détection de l'excès de réactif à l'aide de thiocyanate de potassium.

. Le calcium (Ca^{+2}) ; a été mesuré conformément à la norme NF T90-016 (R), qui prescrit l'utilisation de la méthode complexométrique. Celle-ci consiste à titrer la solution d'échantillon à l'aide d'une solution d'EDTA (acide éthylènediaminetétraacétique) en présence d'un indicateur approprié (purpurate d'ammonium).

. Le magnésium (Mg^{+2}) ; a été déterminé conformément à la norme NF T90-003 (R), en appliquant la méthode complexométrique à l'EDTA. Le principe repose sur la formation d'un complexe stable entre l'EDTA et les ions magnésium présents dans l'échantillon en présence de noir ériochrome T (EBT) comme indicateur colorimétrique.

. Le sodium (Na^+) et le potassium (K^+) ; ont été déterminés conformément à la norme NF T90-020 (R) par photométrie de flamme. Cette méthode repose sur la mesure de la lumière émise par les atomes de Na^+ et K^+ lorsqu'ils sont excités dans une flamme. Les longueurs d'onde caractéristiques sont 589 nm pour le sodium et 766 nm pour le potassium. L'intensité lumineuse, proportionnelle à la concentration de l'élément, est mesurée à l'aide d'un photomètre de flamme Servotrace du laboratoire de géologie du Sahara (Université de Ouargla).

. L'orthophosphate (PO_4^{-3}) ; a été réalisée conformément à la norme ISO 6878 (R), en utilisant la méthode spectrophotométrique au bleu de molybdène. Le principe repose sur la formation d'un

complexe phosphomolybdique entre les ions orthophosphate et les ions molybdate d'ammonium en milieu acide. Ce complexe est ensuite réduit par l'acide ascorbique pour donner une coloration bleue intense dont l'absorbance, mesurée à 880 nm à l'aide d'un spectrophotomètre, est proportionnelle à la concentration en orthophosphate dans l'échantillon. par méthode colorimétrique au bleu de molybdène. La mesure étant effectuée au spectrophotomètre à 880nm.

. **Les sulfates (SO_4^{2-})** ; a été effectuée conformément à la norme ISO 10304-1 (R), par chromatographie ionique. Le principe repose sur la séparation des anions présents dans l'échantillon à l'aide d'une colonne échangeuse d'anions, suivie de leur détection conductimétrique. L'intensité du signal mesuré est proportionnelle à la concentration en sulfates, déterminée à partir d'une courbe d'étalonnage obtenue avec des solutions standards.

L'analyse a été réalisée à l'aide d'un chromatographe ionique de marque Metrohm, disponible au laboratoire de géologie du Sahara de l'Université de Ouargla.

. **L'ammonium (NH_4^+)** ; a été analysé conformément à la norme algérienne NA 1848 (R), en utilisant la méthode spectrophotométrique à l'indophénol bleu. Le principe repose sur la formation d'un complexe coloré bleu résultant de la réaction de l'ammonium avec un réactif phénolique et de l'hypochlorite en milieu alcalin, en présence de nitroprussiate de sodium comme catalyseur. L'intensité de la coloration, mesurée à 640 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-Visible, est proportionnelle à la concentration en ammonium dans l'échantillon.

1. 2. 3. Etude statistique

Pour déterminer les éléments chimiques qui favorisent le plus l'accroissement de la conductivité électrique des eaux usées et purifiées, ainsi que les canaux possibles pour évacuer ces éléments, l'analyse basée sur les composantes principales (ACP) des données est mise en œuvre. Les corrélations entre les variables et les axes et la projection des variables dans l'espace des axes F1 et F2 ont été obtenues avec le logiciel R 4.2.2.

1. 3. Analyse des taux d'accumulation des boues résiduaire et de la possibilité de leur valorisation agricole

1. 3. 1. Mesure de l'épaisseur et de l'accumulation des sédiments

En fonction du stade de traitement et de la durée d'exploitation de chaque bassin, nous avons sélectionné six des huit bassins existants pour l'étude : A2, A3, B1, B2, F1 et F2.

Les épaisseurs de sédiments ont été mesurées directement à l'aide d'une perche, suivant une grille de 10 mètres établie au-dessus de chaque bassin (Figure 18). Cette technique est adaptée des travaux du CEMAGREF et a été modifiée ultérieurement par l'unité « Assainissement et

Environnement » du Département des Sciences et Gestion de l'Environnement de l'Université de Liège (Keffala et *al.*, 2011).

L'épaisseur des sédiments est déterminée en soustrayant la profondeur de la colonne d'eau, mesurée à l'aide d'une tige coulissante munie d'un disque poreux à son extrémité inférieure, de la profondeur totale du bassin, mesurée à l'aide d'une tige principale. La tige glissante descend le long de la tige principale jusqu'à atteindre la surface des sédiments, et la différence entre les deux mesures détermine l'épaisseur de la couche de sédiments.

La mesure de l'épaisseur des sédiments a été réalisée entre le 25 décembre 2022 et le 25 février 2023.



Figure18. Mesure de l'épaisseur des sédiments.

Les profils de surfaces tridimensionnels ont été reconstitués à l'aide du logiciel Surfer Version 19, et le volume total de boues dans chaque bassin a été estimé à l'aide du même logiciel. Ce volume a été calculé en intégrant la surface des sédiments à l'aide de la règle 3/8 de Simpson.

Le taux d'accumulation annuel, exprimé en cm/an, est le rapport du volume total de boues à la surface du bassin, divisé par le nombre d'années ou de mois d'exploitation. Le taux d'accumulation, exprimé en m³/EH/an, est calculé comme le rapport du volume total de boues (Vs) de chaque bassin (estimé à l'aide du logiciel Surfer) au nombre d'équivalents habitants, divisé par le nombre de mois d'exploitation.

1. 3. 2. Échantillonnage et caractérisation physico- chimique des sédiments

Les sédiments ont été collectés dans les bassins A3, B2 et F2, qui contenaient le plus de boues à chaque étage du système lagunaire. Les échantillons ont été prélevés à l'entrée, au milieu et à la sortie de chaque bassin.

Tout au long de notre étude, la drague utilisée pour l'extraction mécanique des boues était en panne, donc un échantillonnage manuel a été effectué à l'aide d'une perche en bois avec un seau propre (Figure 19). Neuf échantillons de boues ont été collectés et immédiatement envoyés au lit

de séchage. Après un mois de séchage, les échantillons ont été transportés au laboratoire dans des bocaux hermétiquement fermés pour les analyses nécessaires. Le transport, le séchage et le stockage des boues ont suivi les exigences de la norme ISO 5667-1 (ISO, 2013).



Figure 19. Prélèvement de la boue

L'analyse physicochimique de la boue a eu lieu au laboratoire du Centre Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA) de Touggourt. Les boues examinées sont d'origine biologique, constituées d'agrégats gris solides avec une légère odeur désagréable, résultant de la fermentation de la matière organique au fond des lagunes. Les échantillons ont été broyés et tamisés à l'aide d'un tamis de 2 mm afin de les préparer à l'analyse des paramètres suivants :

. **Potentiel d'hydrogène (pH)** ; a été effectuée selon la méthode recommandée par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ, 2015). Le principe repose sur la préparation d'une suspension solide-eau, obtenue en mélangeant une masse donnée d'échantillon solide avec un volume défini d'eau distillée. Après agitation et décantation, le pH de la phase aqueuse est mesuré à l'aide d'un pH-mètre de type WTW Multi 3420, équipé d'une électrode combinée SenTix® 41 et calibré à 25 °C.

. **Conductivité électrique (CE)**; a été mesurés en milieu aqueux, selon le protocole d'analyse décrit par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ, 2023); Le principe repose sur la préparation d'un extrait aqueux obtenu par mélange d'une masse donnée d'échantillon solide avec un volume défini d'eau distillée. Après agitation et décantation, la conductivité de la phase liquide est mesurée à l'aide d'un conductimètre de type WTW Multi 3420, équipé d'une sonde de conductivité TetraCon® 325 et calibré à 25 °C.

. **Matière sèche (MS)** ; a été déterminée selon la méthode décrite par Rejsek (2002), utilisée pour l'analyse des boues. Le principe repose sur la méthode gravimétrique, consistant à sécher un échantillon de boue dans une étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Après refroidissement dans

un dessiccateur, la perte de masse correspond à la teneur en eau, tandis que le résidu sec représente la matière sèche.

L'opération de séchage a été effectuée à l'aide d'une étuve à air ventilé de marque Memmert, assurant une température uniforme et contrôlée dans l'ensemble de la chambre de chauffe.

.Matières volatiles en suspension (MSV) ; a été réalisée selon les techniques décrites par Rejsek (2002) pour l'analyse des boues. Le principe repose sur la perte de masse subie par la matière sèche après calcination à haute température, correspondant à la fraction organique volatile.

Concrètement, l'échantillon de matière sèche est chauffé dans un four à moufle à 550 ± 25 °C pendant environ 2 heures. Après refroidissement dans un dessiccateur, la perte de masse est mesurée et exprimée en pourcentage de matière sèche. L'analyse a été effectuée à l'aide d'un four à moufle de laboratoire de type Nabertherm L 9/11/B180, spécialement conçu pour les calcinations à haute température.

En ce qui concerne les nutriments,

. Azote total (NT) ; a été déterminé selon la méthode de Kjeldahl décrite par le CEAEQ (2014). Le principe repose sur la minéralisation de l'azote organique présent dans la boue par l'acide sulfurique concentré en présence d'un catalyseur, transformant l'azote en ion ammonium (NH_4^+). L'ammoniac libéré après neutralisation et distillation est ensuite dosé par titrage acide.

L'analyse a été effectuée à l'aide d'un système Kjeldahl automatique, comprenant un bloc de minéralisation Buchi K-435 et un distillateur automatique Buchi K-355, assurant la précision et la sécurité du processus.

. Phosphore total (PT) a été mesuré selon la norme ISO 11885 (2004) après minéralisation acide de la boue. La méthode repose sur la minéralisation acide de l'échantillon de boue afin de transformer tout le phosphore organique et minéral en une forme dissoute. La solution obtenue est ensuite analysée par spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif (ICP-OES). Dans le plasma d'argon, les atomes de phosphore sont excités et émettent une lumière dont l'intensité est proportionnelle à leur concentration.

L'analyse a été effectuée à l'aide d'un bloc de minéralisation Buchi K-437 et d'un spectromètre ICP-OES PerkinElmer Optima 8000.

. Calcium total (exprimé en CaO) a été déterminé selon la norme NA 1655 (1994). Le principe repose sur la minéralisation acide de la boue afin de solubiliser le calcium, suivie de sa mesure par spectrométrie d'absorption atomique (SAA). La teneur en calcium est obtenue à partir de

l'intensité de la lumière absorbée par les atomes dans la flamme. L'analyse a été réalisée à l'aide d'un spectromètre d'absorption atomique PerkinElmer AAnalyst 400.

. **Magnésium total** (en MgO) a été déterminé selon la norme NA 752 (1989). Le principe repose sur la minéralisation acide de la boue pour solubiliser le magnésium, suivie de sa mesure par spectrométrie d'absorption atomique (SAA).

. **Potassium total** (en K₂O) a été déterminé selon la norme NA 1653 (2013). Le principe repose sur la minéralisation acide de la boue, suivie de la mesure du potassium par photométrie de flamme. L'analyse a été réalisée à l'aide d'un photomètre de flamme Sherwood Model 420. Les éléments traces métalliques (Co, Ni, Cd, Hg, Pb et Zn) ont été déterminés selon la norme ISO 11885 (2007).

Le principe repose sur la minéralisation acide de la boue suivie de la détection simultanée des métaux par spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif (ICP-OES). L'analyse a été effectuée à l'aide d'un bloc de minéralisation Buchi K-437 et d'un spectromètre ICP-OES PerkinElmer Optima 8000.

Les coliformes fécaux (FC) et les streptocoques fécaux ont été dénombrés conformément à la norme NF EN ISO 9308-1 (ISO, 2014), par la méthode de filtration sur membrane.

L'analyse des données a été réalisée à l'aide de XLSTAT, version 2021.5.

Nous avons enfin mené une étude économique pour appliquer les résultats en créant un projet productif qui préserve également l'environnement. En calculant la quantité de nutriments présents dans les boues étudiées et en déterminant la quantité finale d'engrais sur la base d'une formule NPK cible de 11-25-25, nous avons évalué les coûts associés et les bénéfices potentiels.

2. Analyse physico-chimique et risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux usées de la cuvette de Ouargla

2. 1. Présentation du lac étudié

Sebkha Sefioune constitue le point le plus bas de la cuvette de Ouargla. Elle constitue l'exutoire naturel des crues des oueds N'sa et M'zab (Bonard et Gardel, 2003 ; Koull, 2017). Il s'agit d'une zone humide qui se situe à environ 40 km de la ville de Ouargla, avec une superficie d'environ de 11 000 hectares.

Elle se situe entre 05°20'02" et 05°24'24"Est ; 32°17'40" et 32°23'28" Nord et une altitude de 103 à 108m, dont 2 500 hectares ont été inondés par les eaux usées épurées pompées dans le cadre du projet d'assainissement de la cuvette (Koull, 2017).

Elle est limitée en bordure Est et Nord-est par une zone à topographie un peu plus élevée occupée par une végétation clairsemée de tamarix, et de salicorne. Ces deux espèces sont

inféodées aux milieux salés voire très salés. A l'Ouest et au Sud, la sebkha est bordée par des dunes de sable (Figure 13) (Bonard et Gardel, 2003).

Les concentrations en sels au niveau de la nappe phréatique située sous la sebkha sont de l'ordre de 300g/l. Le sol est également très salé, une croûte d'inflorescence saline recouvre toute la partie de la sebkha limitant tout développement végétal (Bonard et Gardel, 2003).

2. 2. Biodiversité à Sebkhet Sefioune

Ce site naturel abrite différentes plantes qui se développent naturellement, telles que la *Phragmites communis*, *Halocnemum strobilaceum* et *Juncus maritimus*, qui sont des espèces halophytes (Koull, 2017).

D'après les études sur le terrain réalisées par la conservation des forêts de la Wilaya de Ouargla, il a été prouvé que cette région se transformera en une zone humide d'intérêt biologique et en un lieu de nidification pour les oiseaux migrateurs, et non pas seulement un parcours pour eux. Sa valeur réside aussi dans la possibilité de l'intégrer dans les recherches universitaires sur la biodiversité, d'autant plus qu'elle renferme des espèces de poissons et un certain nombre d'oiseaux migrateurs tels que le flamant rose, l'aigrette, la cigogne blanche et le héron cendré (Koull, 2017).

2. 3. Démarche de l'étude

Avant de prendre des échantillons d'eau, nous avons choisi des stations variées et représentatives qui permettent d'évaluer l'état trophique du plan d'eau. Les stations d'étude ont été sélectionnées en fonction des critères suivants :

- . La structure du plan d'eau, divisée en trois parties principales par les canaux qui alimentent la sebkha en eau.
- . L'occupation du sol; la Sebkha est constituée d'une alternance des composants suivants : l'eau, la végétation (roseau), la croute saline et le sol nu,
- . L'aspect général de l'eau; la couleur, la turbidité, l'odeur, la profondeur.

En se basant sur ces critères et étant donné la difficulté d'accès aux zones nord de la sebkha en raison de la propagation des roseaux au centre du plan d'eau et dans le reste des zones nord, nous avons réussi à repérer trois stations d'étude.

. **Station 01:** Représente le plan d'eau qui se trouve à gauche des canaux qui transportent les eaux usées vers la sebkha (côté Ouest des canaux). Sa profondeur est de 0,75m en moyenne. Cette station est marquée par une forte prolifération d'algues qui couvrent toute la surface de l'eau, avec une ceinture de plantes halophytes courtes sur les bords (Figure 20).



Figure 20. Station 01.

. **Station 02:** Elle est localisée à l'embouchure des deux canaux (Figure 19), à une profondeur moyenne de 2m. Le roseau occupe le plan d'eau et les algues vertes en recouvrent la surface, donnant une couleur verte pâle, avec quelques flamants roses nageant dans l'eau.



Figure 21. Station 02

. **Station 03:** Elle se trouve à droite des deux canaux (côté Est des canaux). Il s'agit d'une nouvelle formation d'un plan d'eau discontinue créée suite à l'augmentation des volumes d'eau usée déversés dans la sebkha. La profondeur d'eau dans cette station est faible. Cette station est également très salée, ce qui provoque une absence totale de végétation. Cependant, on peut observer qu'elle est envahie par des groupements du flamant rose (Figure 22).



Figure 22. Station 03

2. 3. 1. Echantillonnage de l'eau

Nous avons effectué trois campagnes de prélèvements, la première en février, pendant la période des hautes eaux correspondant à la recharge hivernale de la nappe phréatique, la deuxième en avril et la dernière en août, pendant la période des basses eaux, après la vidange de la nappe.

On a procédé aux prélèvements en utilisant des bouteilles en plastique (polyéthylène) de 1,5 litre, qui ont été rincées à l'eau distillée. On a immédiatement conservé les échantillons d'eau à l'ombre et à 4°C à l'aide d'une glacière. Les analyses ont été effectuées dans les moins de 24 heures suivant la collecte.

2. 3. 2 Analyses des paramètres physico-chimiques

Les différentes analyses des paramètres physico-chimiques des eaux de Sebkhet Sefioune ont été effectuées aux laboratoires suivants :

- . Le laboratoire pédagogique de la Faculté de Science de la Nature et de la Vie (Université Kasdi Merbah-Ouargla) pour le dosage du pH, Température, Oxygène dissous, Conductivité électrique, Solides totaux dissous, Turbidité et Matières en Suspension .
- . Le laboratoire de recherche sur la phoeniciculture pour la détermination de l'azote total, le nitrite, le nitrate, l'ammonium, l'orthophosphate et le phosphore total.
- . Le laboratoire de Centre de Recherche Scientifique et Technique en Analyses Physico- Chimique de Ouargla pour la détermination de la chlorophylle a.

Les échantillons d'eau ont été prélevés, conservés et analysés suivant les procédures de Rodier (2009). Le pH, la conductivité électrique (CE), la température et l'oxygène dissous ont été mesurés in situ à l'aide d'un appareil multiparamètre portatif (HANNA HI98194), permettant des mesures simultanées et précises des principaux paramètres physico-chimiques.

. **Solides dissous totaux** ; ont été déterminés selon la méthode gravimétrique. Après filtration sur membrane de 0,45 μm , le filtrat a été séché à 105 °C dans une étuve thermostatique (type Memmert) jusqu'à masse constante, puis pesé à l'aide d'une balance analytique de précision.

. **Matières en suspension (MES)** ; ont été déterminées selon la méthode de filtration sur fibre de verre décrite par Rodier (2009). Un volume connu d'échantillon a été filtré sur un filtre en fibre de verre (Whatman GF/C, 0,7 μm), séché à 105 °C dans une étuve thermostatique (Memmert) jusqu'à masse constante, puis pesé à l'aide d'une balance analytique de précision (Sartorius $\pm 0,1$ mg).

. **Turbidité** ; a été déterminée par la méthode néphélométrique à la formazine. Le principe repose sur la diffusion de la lumière par les particules en suspension dans l'eau. L'appareil utilisé, un turbidimètre néphélométrique, mesure l'intensité de la lumière diffusée à 90° du faisceau incident. L'étalonnage est réalisé à l'aide de solutions standards de formazine, et les résultats sont exprimés en NTU (Nephelometric Turbidity Units).

Pour ce qui est des nutriments,

. **Azote Kjeldahl total (NTK)**; a été déterminé par la méthode de chromatographie ionique. Le principe repose sur la minéralisation acide de l'azote organique et ammoniacal en ion ammonium (NH_4^+), suivi de sa séparation et quantification par un chromatographe ionique muni d'une colonne échangeuse d'ions et d'un détecteur conductimétrique.

. **Nitrite (NO_2^-)**; le principe repose sur une réaction colorimétrique : le nitrite réagit avec un réactif diazonium pour former un complexe azoïque coloré, dont l'intensité est mesurée par spectrophotométrie. La concentration en nitrite est proportionnelle à l'absorbance et les résultats sont exprimés en mg/L de NO_2^- .

. **Nitrate (NO_3^-)** ; le principe repose sur la réduction chimique du nitrate en nitrite, suivi d'une réaction colorimétrique similaire à celle du nitrite pour former un complexe azoïque coloré, mesuré par spectrophotométrie. La concentration en nitrate est proportionnelle à l'absorbance et les résultats sont exprimés en mg/L de NO_3^- .

. **Ammonium (NH_4^+)**; le principe repose sur la formation d'un complexe coloré par réaction de l'ammonium avec le réactif de Nessler, dont l'intensité est mesurée par spectrophotométrie. La concentration en ammonium est proportionnelle à l'absorbance.

. **Orthophosphate (PO_4^{3-})**; le principe repose sur la formation d'un complexe phosphomolybdique en milieu acide, réduit ensuite en bleu de molybdène, dont l'intensité est

mesurée par spectrophotométrie. La concentration est proportionnelle à l'absorbance mesurée, et les résultats sont exprimés en mg/L de phosphore (P).

. **Phosphore total (PO_4^{3-} total);** le principe repose sur la minéralisation préalable de toutes les formes de phosphore présentes dans l'échantillon en orthophosphate, suivie de la formation du complexe phosphomolybdique réduit en bleu de molybdène, dont l'intensité est mesurée par spectrophotométrie.

. **Chlorophylle a ;** le principe repose sur l'extraction de la chlorophylle à l'aide d'un solvant organique (acétone ou méthanol), suivie de la mesure de l'absorbance de l'extrait à des longueurs d'onde spécifiques. La mesure est effectuée avec un spectrophotomètre UV- Visible, et la concentration en chlorophylle a est calculée à partir de l'absorbance, exprimée en $\mu\text{g/L}$.

2. 4. Etat trophique de Sebkhet Safioune

La détermination de l'état trophique de l'eau a été faite suivant la grille d'évaluation du risque d'eutrophisation pour la colonne d'eau (tableau 3) selon Ifremer, 2000.

Tableau 3. Grille d'évaluation du risque d'eutrophisation (Ifremer, 2000).

Variable		Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
TUR	(NTU)	0	5	10	25	40
PO_4^{3-}	(μM)	0	0,3	1	1,5	4
NITRI	(μM)	0	0,3	0,5	0,75	1
NITRA	(μM)	0	1	3	5	10
AMMO	(μM)	0	1	3	5	10
Chl-a	mgM^{-3}	0	5	7	10	20
NT	(μM)	0	50	75	100	120
PT	(μM)	0	0,75	1,5	2,5	4,5

2. 5. Évaluation de la variation spatiotemporelle de la couverture végétale

Afin de montrer l'évolution de la couverture végétale, y compris celle des algues vertes au fil du temps, nous avons réalisé trois cartes SAVI (Indice de Végétation Ajusté au Sol) à différentes dates. Des images des satellites Landsat 5 et Landsat 8, près projets d'assainissement de 1990 et postérieurs à 2015 et 2023, ont été exploitées pour déterminer la superficie occupée par l'eau, le sol et la végétation.

3. Suivi de remontée de la nappe phréatique

Pour connaître l'impact des travaux d'évacuation des excès en eau de la ville de Ouargla sur le niveau de la nappe phréatique, nous avons fait une comparaison entre les cartes piézométriques pour six campagnes de mesures qui ont été effectuées par l'ANRH dans les années 1998, 2003, 2008, 2013, 2015 et 2019 (Annexe 3), à partir desquelles l'évolution temporelle des profondeurs d'eau, à travers toute la cuvette, sera illustrée. Ces cartes ont été effectuées à l'aide du logiciel Arc GIS 10.8 avec l'interpolation par IDW.

Chapitre II.

Origine de la salinité des eaux usées épurées

1. Qualité physico-chimiques des eaux épurées

Les résultats détaillés des analyses physico-chimiques des eaux épurées de la ville de Ouargla sont présentés dans le Tableau 04 qui donne les valeurs maximales, minimales, moyennes et écart types des paramètres physico-chimiques étudiés au cours du mois de Février et Mars 2023. L'aptitude de ces eaux pour l'irrigation a été évaluée en comparant les valeurs moyennes aux normes algériennes de réutilisation des eaux usées traitées en irrigation.

Tableau 4. Résultats des paramètres physico-chimiques des eaux épurées étudiées.

Paramètre	Unité	Min	Max	Moy	Ecart Type	Normes Algériennes REU
Température	°C	17,8	21,1	19,37	1,4	
pH		7,27	8,11	7,79	0,32	$6,5 \leq \text{pH} \leq 8,5$
CE	(dS/m)	12,38	17,9	15,65	2,31	3
SAR	/	9,04	13,4	12,38	0,8	1,3
Ca ⁺²	meq/l	16	20	18,5	7,53	/
Mg ⁺²	meq/l	25	36	29	4,52	/
Cl ⁻	meq/l	94,66	129,67	100,20	39,38	10
K ⁺	meq/l	1,08	1,74	1,51	0,13	/
Na ⁺	meq/l	41,06	71,19	60,55	11,35	/
PO ₄ ⁻³	meq/l	0,12	0,22	0,17	0,04	/
SO ₄ ⁻²	meq/l	37,02	39,16	38,09	1,01	/
NH ₄ ⁺	meq/l	0,22	0,43	0,33	0,09	/

REU : Concentrations maximales des paramètres physico-chimiques admissibles de réutilisation des eaux usées épurées en irrigation (Arrêté interministériel du 8 Safar 1433 correspondant au 2 janvier 2012)).

Selon ce tableau, la température des eaux purifiées varie de 17,8°C à 21,1°C. Le pH fluctue entre 7,27 et 8,11 ; un intervalle qui respecte les standards algériens pour l'usage des eaux usées traitées pour l'irrigation des cultures.

Les valeurs de conductivité électrique observées varient entre 12,38dS/m et 17,9dS/m, dépassant de loin les limites admises pour l'irrigation en Algérie. En fonction de leur conductivité et selon la classification de l'USSL de 1954 sur les eaux d'irrigation, ces eaux sont catégorisées en Classe C3 ; indiquant des eaux de salinité élevée. Dans ce cas, elles ne peuvent pas être employées sur des terrains présentant un déficit de drainage et, de ce fait, une faible capacité de lessivage. En dépit d'un drainage approprié, une gestion spécifique pour la régulation de la salinité peut s'avérer nécessaire et il faut toujours privilégier des plantes qui présentent une forte résistance au sel (Zaman et *al.*, 2018).

D'après la recherche menée par Koull et *al.* (2013), l'irrigation salée a entraîné une salinisation des sols et une diminution de la productivité. Cependant, l'étude de Masmoudi (2011) concernant l'impact de la salinité de l'eau et la fréquence d'irrigation sur le sol et le développement d'une culture de tomates a démontré qu'une gestion adéquate de l'irrigation peut aboutir à une production satisfaisante des cultures.

Le Sodium Adsorption Ratio ou SAR d'une eau exprime le rapport entre la concentration du sodium et celle des alcalino-terreux, c'est une donnée importante dans la définition de l'aptitude d'une eau, notamment à l'irrigation (Cissé, 2012). Les valeurs du SAR des eaux purifiées de la station d'épuration de Ouargla varient entre 9,04 et 13,4, avec une moyenne établie à 12,38. Ces valeurs dépassent largement la limite de 1,3, jugée comme la référence pour la réutilisation des eaux usées épurées en vue de l'irrigation. Selon Cissé (2012), un SAR au-delà de 10 provoque un taux important de fixation du sodium sur le complexe adsorbant, entraînant ainsi une dispersion des argiles. En conséquence, le sol devient compact et très peu perméable à l'eau et à l'air. D'après Zaman et *al.* (2018), les plantes ont une réaction au sodium et peuvent subir des dommages (entraînant une concentration de sodium dans leurs tissus) même quand les taux de sodium échangeable dans l'eau du sol sont si faibles qu'ils ne causent pas de dégradation physique du sol. L'évaluation des eaux d'irrigation basée sur le taux d'adsorption du sodium selon la classification USSSL 1954 (mmols.l^{-1})-mentionnée dans la même référence- a montré que ces eaux sont classées dans la catégorie S2, ce qui signifie qu'elles présentent un risque moyen de sodicité. Leur emploi en matière d'irrigation risque de présenter un taux significatif de sodium dans les sols à texture fine dotés d'une forte capacité d'échange cationique, surtout sous des conditions de lessivage limitées, sauf si du gypse est présent dans le sol. On peut utiliser l'eau de sodicité S2 dans les sols ayant une texture grossière ou organique et une perméabilité élevée.

Les niveaux élevés du SAR observés sont attribués aux concentrations élevées en sodium par rapport au calcium et magnésium, qui s'élèvent respectivement à 60,55meq/l, 18,5meq/l et 29meq/l.

Le taux de chlorure fluctue considérablement, allant de 94,66meq/l à 129,67meq/l, des chiffres largement au-dessus du seuil permis pour une réutilisation en irrigation. Même en ce qui concerne les sulfates, dont les valeurs sont nettement plus élevées que celles des autres sels : 38,09meq/l, toutefois, dans tous les contextes, les sulfates ne sont pas pris en compte comme des polluants significatifs pour l'agriculture.

Le chlore est identifié parmi les ions les plus toxiques pour les cultures, qu'on retrouve généralement dans l'eau usée traitée avec le sodium (Na) et le bore (B), responsables de la majorité des cas de toxicité. Cependant, le chlorure (Cl) et le sodium (Na) sont moins toxiques que

le bore. Dans les zones arides et semi-arides, l'eau résiduaire traitée pourrait présenter une forte concentration en Cl et Na en raison de la présence relativement élevée de ces composants dans les eaux domestiques (FAO, 2003), comme démontré par la figure 23, qui représente la zonation de salinité des eaux du Complexe Terminal, source d'approvisionnement en eau pour la cuvette de Ouargla. On observe que les zones d'Ain Beida, Rouissat et Ouargla au nord-ouest se caractérisent par une salinité élevée.

On retrouve aussi des sels de potassium, d'orthophosphate et d'ammonium dans les eaux traitées, avec des moyennes respectives de 1,51meq/l, 0,17meq/l et 0,33meq/l. Ces eaux, donc, peuvent constituer une source d'éléments nutritifs indispensables pour les végétaux ; le potassium et l'ammonium qui fournissent de l'azote (PNTTA, 2000) ainsi que les ions orthophosphates qui sont les formes uniques de phosphore exploitables par les cultures (Plassard *et al.*, 2015).

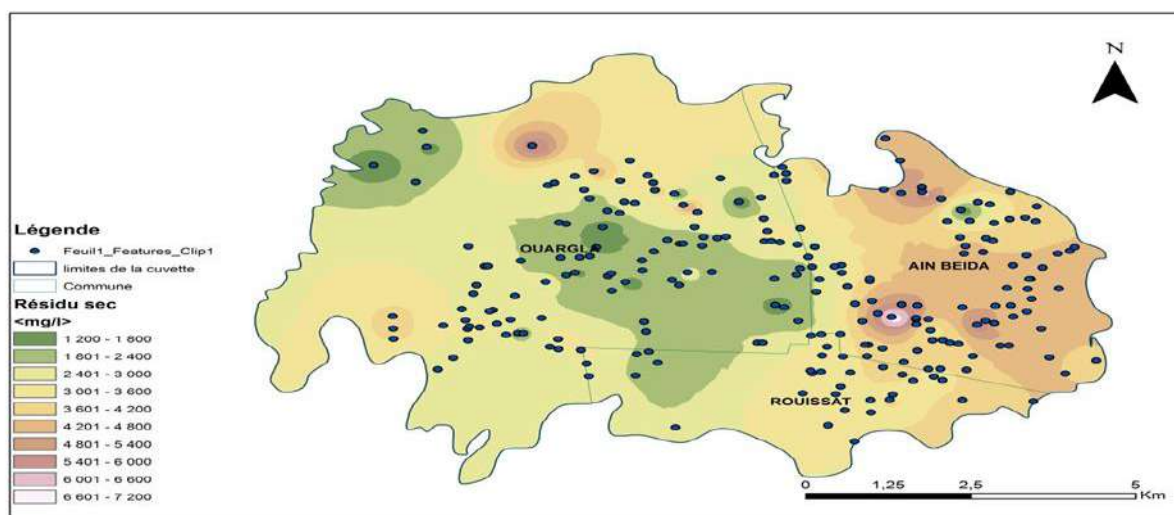


Figure 23. Salinité (en résidu sec) des eaux du Complexe Terminal dans l'oasis de Ouargla

2. Résultats de l'analyse en composant principale (ACP)

Les résultats de l'analyse multi-variée et approfondie de l'ACP (moyenne $\pm$ SE, $n=64$) des neuf variables physico-chimiques analysées au niveau des six canaux de collecte des eaux usées et des deux bassins (entrée et sortie générale) sont présentés dans les figures 24 et 25.

L'analyse multi-variée vise à examiner la structuration des huit canaux et à examiner l'influence de la concentration des paramètres sur l'évolution spatiale de la conductivité électrique. En effet, l'application de l'ACP a révélé que 69.2% de la variabilité (inertie) totale de notre matrice des variables est expliquée par les deux premières composantes principales seulement (Figure 24).

Le 1er axe d'ACP a expliqué à lui seul 48.3% de la variabilité totale, il est corrélé positivement avec Mg^{+2} ($r=+0.79$; $\cos^2=0.63$), Cl^- ($r=+0.76$; $\cos^2=0.57$), K^+ ($r=+0.95$; $\cos^2=0.91$), Na^+ ($r=+0.67$; $\cos^2=0.75$), SO_4^{-2} ($r=+0.89$; $\cos^2=0.79$), CE ($r=+0.91$; $\cos^2=0.83$). Cependant, le 2ème

axe, a expliqué à lui seul 20.79% de la variation totale, il est caractérisé par une corrélation positive avec PO_4^{-3} ($r=+0.76$; $\cos^2= 0.58$) et NH_4^+ ($r=+0.86$; $\cos^2=0.75$).

L'analyse de la composante principale a révélé une corrélation positive entre la CE et Mg^{+2} , Cl^- , K^+ , Na^+ et SO_4^{-2} .

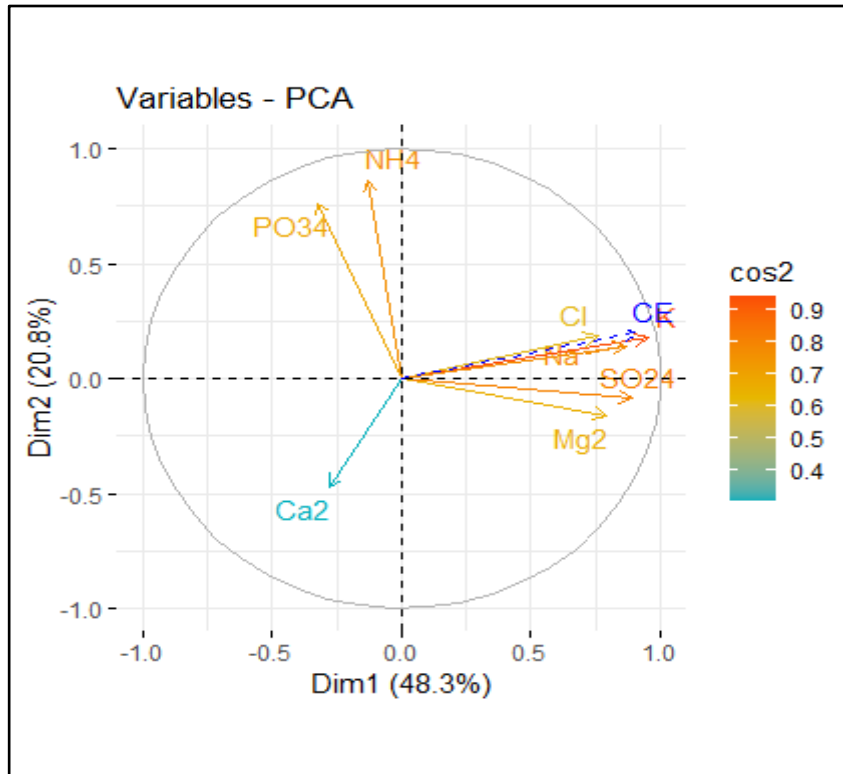


Figure 24. Cercle de corrélation de l'analyse en composant principale (ACP) sur la matrice standardisée des données (Dim 1 vs Dim2).

L'analyse approfondie de l'ACP pour le facteur « canal » a montré qu'à partir du 1^{er} axe deux groupes ont été constatés : le premier groupe regroupe le canal 1, l'entrée générale et la sortie générale, ils se caractérisent par des taux élevés de Cl^- , Na^+ , CE, K^+ , SO_4^{-2} et Mg^+ par rapport à l'autre groupe qui regroupe les canaux 2, 3, 4, 5 et 6 (Figure 25).

En revanche, on a constaté deux groupes à partir de l'axe 2 : le premier groupe regroupe les canaux 1, 2, 3, ils sont caractérisés par des forts taux de NH_4^+ et PO_4^{-3} par rapport au deuxième groupe qui regroupe les canaux 4, 5, 6, Sortie générale et Entrée générale.

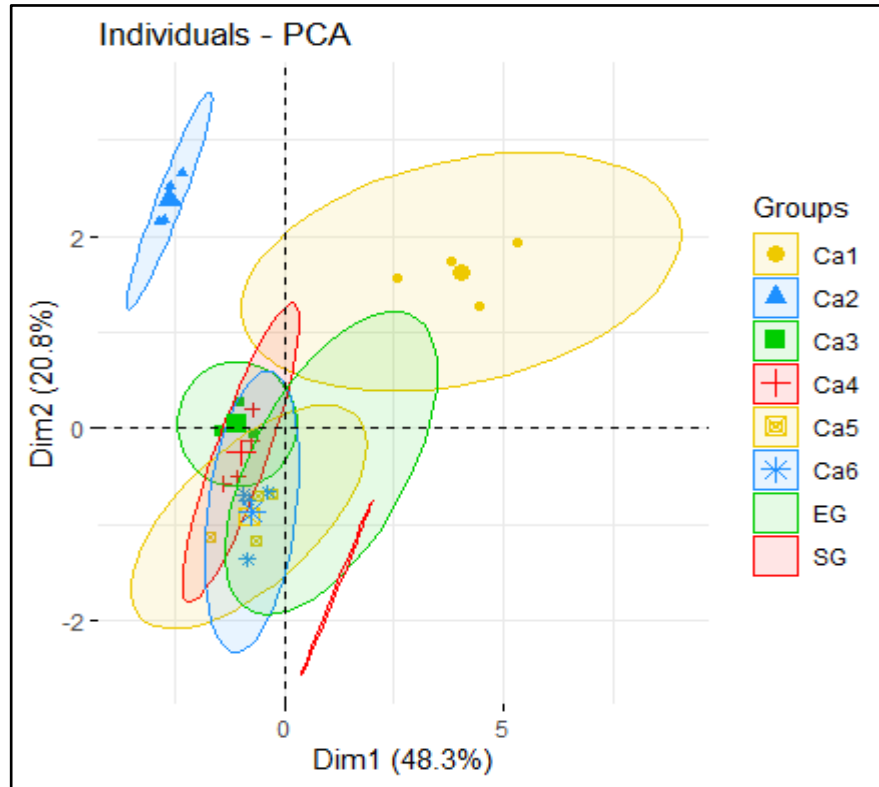


Figure 25. Analyse en composant principale (ACP) sur la matrice standardisée des données ; A : Plan factoriel (Dim 1 vs Dim2) selon le facteur "Canal".

L'analyse statistique indique que les facteurs qui causent le problème de salinité des eaux incluent le chlorure, le sodium, les sulfates, le potassium et le magnésium. Le canal qui contribue le plus à l'apport de ces sels est le canal 1, qui est alimenté par la station de refoulement de route Ngoussa.

3. Discussion

Selon les analyses physicochimiques effectuées sur l'eau épurée à la station d'épuration de Ouargla, la température moyenne de l'eau tend à rejoindre celle de l'eau épurée de la STEP de Khenchla (Halimi et *al.*, 2018). Il est important de préciser que ces évaluations ont eu lieu à Ouargla entre février et mars, et à Khenchla entre juillet et décembre. Il convient également de noter que ces deux villes occupent des positions géographiques opposées : Ouargla se situe dans le Sud du pays, alors que Khenchla se trouve dans le Nord.

La moyenne du pH mesuré se rapproche de celle relevée par la STEP en 2017 (Annexe 4) et Negais en 2024, pour les eaux générées par la même station. Concernant la conductivité électrique, on note des valeurs moyennes presque identiques dans les trois études, avec une légère augmentation de 1ds/m notée dans notre étude.

Par rapport aux eaux usées traitées par la station d'épuration de Kouinine (El-Oued), qui utilise également la technique du lagunage aéré (Bouselsal et *al.*, 2016), les eaux épurées produites par la STEP de Ouargla montrent un pH inférieur, cependant, leur conductivité électrique est nettement supérieure aux valeurs observées dans la station de Kouinine, d'où la $CE_{Ouargla} = 3CE_{Kouinine}$. Tandis que les eaux traitées de la STEP d'Oued M'zab, se distinguent par une conductivité électrique inférieure aux deux précédentes STEP (Ben Hedid et *al.*, 2018). Cette station procède au traitement de l'eau en employant la seconde forme de lagunage, à savoir le lagunage naturel.

La valeur du SAR que nous avons déterminée est comparable à celle trouvée par Negais (2021) qui a étudié la viabilité de l'utilisation des eaux usées traitées de Ouargla pour l'irrigation de variétés forestières. Ces chiffres sont extrêmement amplifiés par rapport aux eaux purifiées produites par les stations de Médéa et Koléa. Dans l'étude de la qualité des sous-produits d'épuration de la STEP Médéa pour une utilisation agricole (Karef et *al.*, 2018), les SAR notés variaient entre 0 et 3, avec une conductivité électrique oscillant entre une moyenne de $2449\mu S/cm$ à l'entrée et $2305\mu S/cm$ à la sortie. Selon les auteurs de ce travail, ces eaux sont jugées hautement minéralisées et pourraient être appropriées pour l'irrigation de certaines plantes résistantes au sel, sur des sols bien drainés et lessivés. Concernant la station d'épuration de Koléa, elle génère des eaux traitées présentant une valeur de 2,75 pour le SAR et de $1001\mu S/cm$ pour la CE. D'après ces données, ces eaux peuvent être utilisées pour l'irrigation de cultures moyennement résistantes aux sels, sur des sols bien drainés ou ayant une bonne perméabilité (Nakib et *al.*, 2013).

Les niveaux de chlorures que nous avons relevés sont quasiment les mêmes que ceux notés par Negais (2024), qui a mené une analyse de la qualité des eaux usées traitées au niveau de la même station de lagunage aéré de Ouargla en 2015 et 2017. Comparativement aux eaux épurées de la ville de Sidi Bel Abbès, qui affichent une concentration de $18,33meq/l$ de chlorure (Chadli et *al.*, 2022), et celles de la ville de Sétif, présentant une concentration de $31,31meq/l$ (Ababsa et *al.*, 2013), les eaux épurées de Ouargla sont excessivement chargées en chlorure.

D'après l'étude menée par Negais (2024), les niveaux de sulfates, avec une moyenne de $21,56meq/l$, sont inférieurs à ceux relevés dans notre investigation. Cependant, le potassium est présent à des concentrations plus élevées que celles que nous avons trouvées dans nos travaux.

D'autre part, l'analyse de l'évolution temporelle de la conductivité électrique des eaux purifiées à la station d'épuration de Ouargla a démontré une montée de leur salinité depuis 2010 jusqu'à l'heure actuelle, en se référant aux recherches menées par Mensous (2011), puis par la STEP (2011) et enfin par Negais (2024).

Cette hausse coïncide avec la mise en place de neuf (9) stations de déminéralisation d'eau potable situées dans différents quartiers de la ville de Ouargla (Gherbouz, Ain elkhir, Mkhadma, Ifri gara, Bamendil village, Bamendil'khefdji, Rouisset, Elhdeb et Ziayna), dans le but d'améliorer la qualité des eaux de consommation, où le processus de dessalement utilisé est l'osmose inverse (ADE, 2015), qui génère une concentration saline appelée « saumure » (Degron et *al.*, 2024). Ainsi, on peut affirmer que les décharges de ces stations sont à l'origine de cette salinité élevée. Elles le font en déversant directement dans le système de collecte d'eaux usées qui conduit ensuite vers la station d'épuration. Étant donné que la station d'épuration de Ouargla ne dispose pas de technologies pour éliminer ces sels, contrairement aux stations de déminéralisation, l'eau qui en résulte reste fortement salée et n'est pas adaptée à l'irrigation.

De plus, quand nous superposons les lieux des stations de déminéralisation d'eau (ADE, 2015) sur les zones résidentielles liées aux stations de pompage (BG, 2005), il s'avère que la station de pompage de la Route Ngoussa reçoit l'eau provenant de quatre stations de déminéralisation : Gherbouz, Mkhadma, Bamendil village et Bamendil'khefdji. Ce n'est pas le cas pour les autres stations de pompage qui ne reçoivent l'eau que d'une seule source. Par conséquent, l'accroissement du volume d'eau est accompagné par une hausse de la concentration en sels. Ceci explique pourquoi cette station contribue significativement à l'augmentation du taux de salinité de l'eau brute et épurée au niveau de la STEP.

En définitive, on envisage diverses solutions pour résoudre le problème de la salinité des eaux purifiées de la cuvette de Ouargla afin de les exploiter en irrigation :

- . La séparation des saumures, qui constituent le sous-produit de la déminéralisation, et les eaux usées urbaines, qui se font par le transport des saumures vers les canaux de drainage en direction de Sabkhet Safioun au nord.
- . L'équipement de la STEP en technologies pour l'élimination des sels.

Chapitre III.

Taux d'accumulation des boues résiduelles et la possibilité de leur valorisation agricole

Chapitre III. Taux d'accumulation des boues résiduaire et la possibilité de leur valorisation agricole

1. Accumulation de la boue

Au niveau des deux bassins du 1er étage de lagunage aéré A2 et A3, de profondeur égale à 3,5m, la distribution des sédiments est hétérogène. Les sédiments du bassin A2 ont une épaisseur qui varie de 0.01 à 0,8m, tandis que dans le bassin A3, ils ont une épaisseur de 0,15 à 0,99m (Figure 26). La variation de l'épaisseur des sédiments dans les deux bassins du même étage est due à la différence des durées de fonctionnement de chaque bassin (Tableau 5).

L'épaisseur maximale des sédiments a été enregistrée à l'entrée des deux bassins mais dans le bassin A2, elle forme deux cônes cumulatifs sur les deux côtés droit et gauche, alors qu'elle se rassemble dans le deuxième bassin sous la forme d'une masse unique.

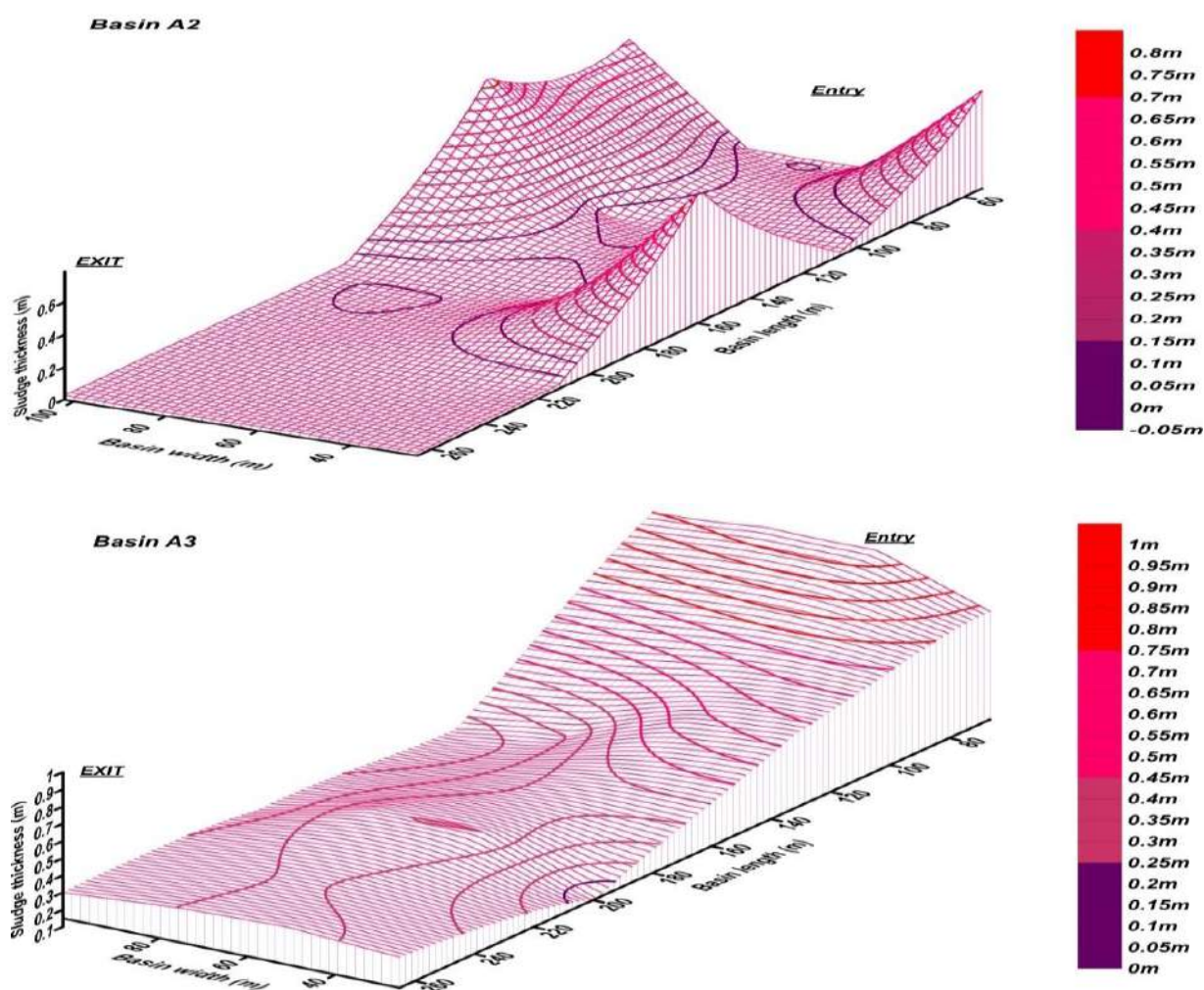


Figure 26. Distribution spatiale des sédiments au niveau des deux bassins du 1er étage du lagunage aéré ; A2 et A3.

Chapitre III. Taux d'accumulation des boues résiduaire et la possibilité de leur valorisation agricole

Les bassins B1 et B2 du deuxième étage de lagunage aéré, dont la profondeur est de 2,8m, ont des distributions sédimentaires uniques. Le premier bassin est loin d'être homogène, tandis que le deuxième bassin est quasi-homogène (Figure 27).

L'épaisseur des sédiments dans le bassin B1 est de 0,01 à 0,15m, tandis que dans le bassin B2, elle varie de 0,01 à 0,74m. La variation significative de l'épaisseur dans le même niveau de lagunage est due au fait que le bassin B1 a un nombre de mois de fonctionnement inférieur à B2 (Tableau 5), et le volume d'eau traitée dans le premier bassin représente le tiers de celui qui a été traité dans le deuxième bassin, cela a entraîné une formation de boue dans le bassin B2 d'une épaisseur proche à celle des bassins du premier étage.

À l'exception du côté gauche de l'entrée du bassin, où les sédiments se rassemblent sous la forme d'un cône dans le coin, les sédiments dans le bassin B1 se répartissent sous forme d'une couche très fine qui recouvre toutes les parties du fond. Ils sont répartis uniformément dans le bassin B2 sous la forme d'une couche d'environ 0,4m d'épaisseur qui recouvre toutes les parties du fond, avec des points où ils se rassemblent sous la forme de crêtes d'une épaisseur supérieure à 0,6m.

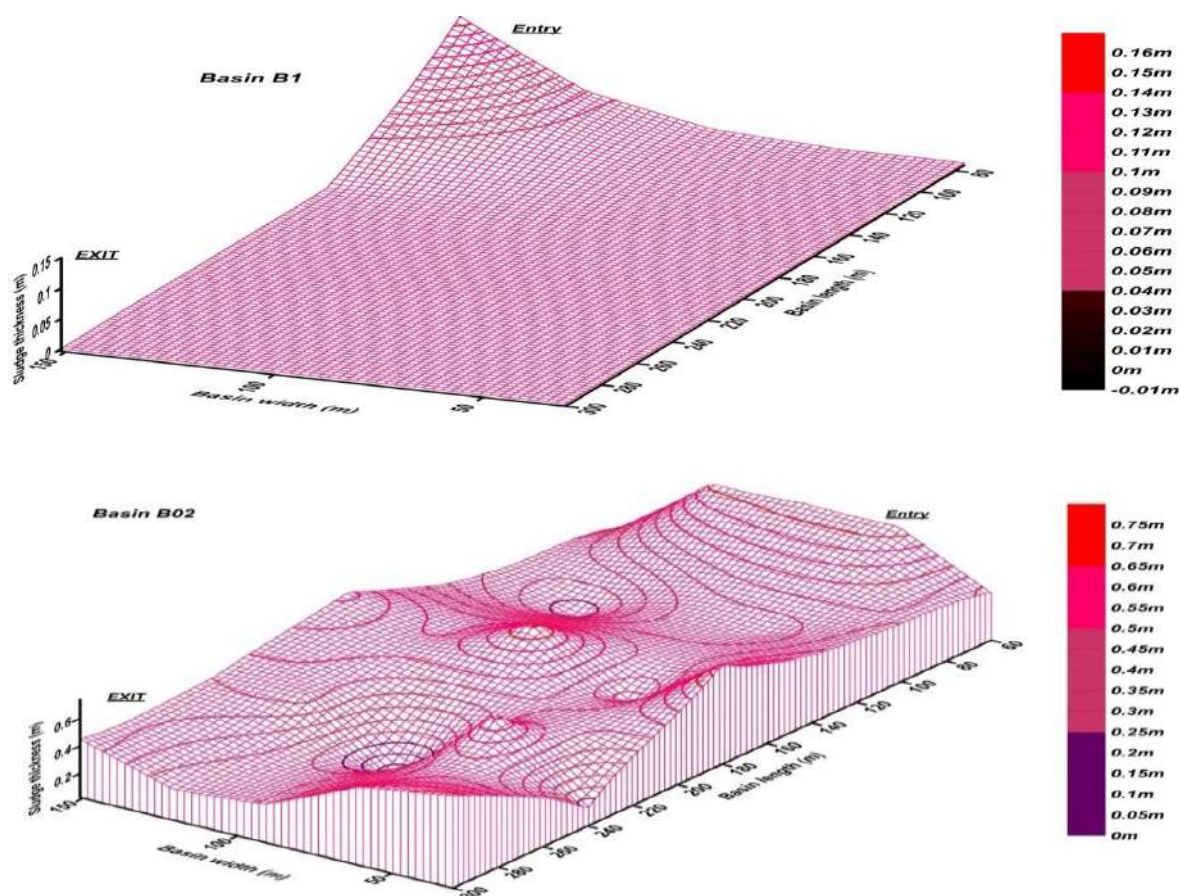


Figure 27. Distribution spatiale des sédiments au niveau des deux bassins du 2ème étage de lagunage aéré ; B1 et B2.

Chapitre III. Taux d'accumulation des boues résiduairees et la possibilité de leur valorisation agricole

Les deux bassins de finition F1 et F2, de profondeur égale à 1,5m, présentent une distribution hétérogène des sédiments. Le bassin F1 a une épaisseur de sédiments qui varie de 0.0001 à 0.0009m, tandis que le bassin F2 a une épaisseur de 0,49 à 0,94m (Figure 28). L'écart entre les deux bassins est considérable. C'est également en raison de la différence dans le nombre de mois de fonctionnement.

Les sédiments décantés dans le bassin F1 s'organisent en une couche d'épaisseur très variable, entrecoupée par des points où l'épaisseur augmente sous forme de cônes. L'épaisseur maximale des sédiments dans le bassin F2 a été enregistrée à droite de l'entrée du bassin

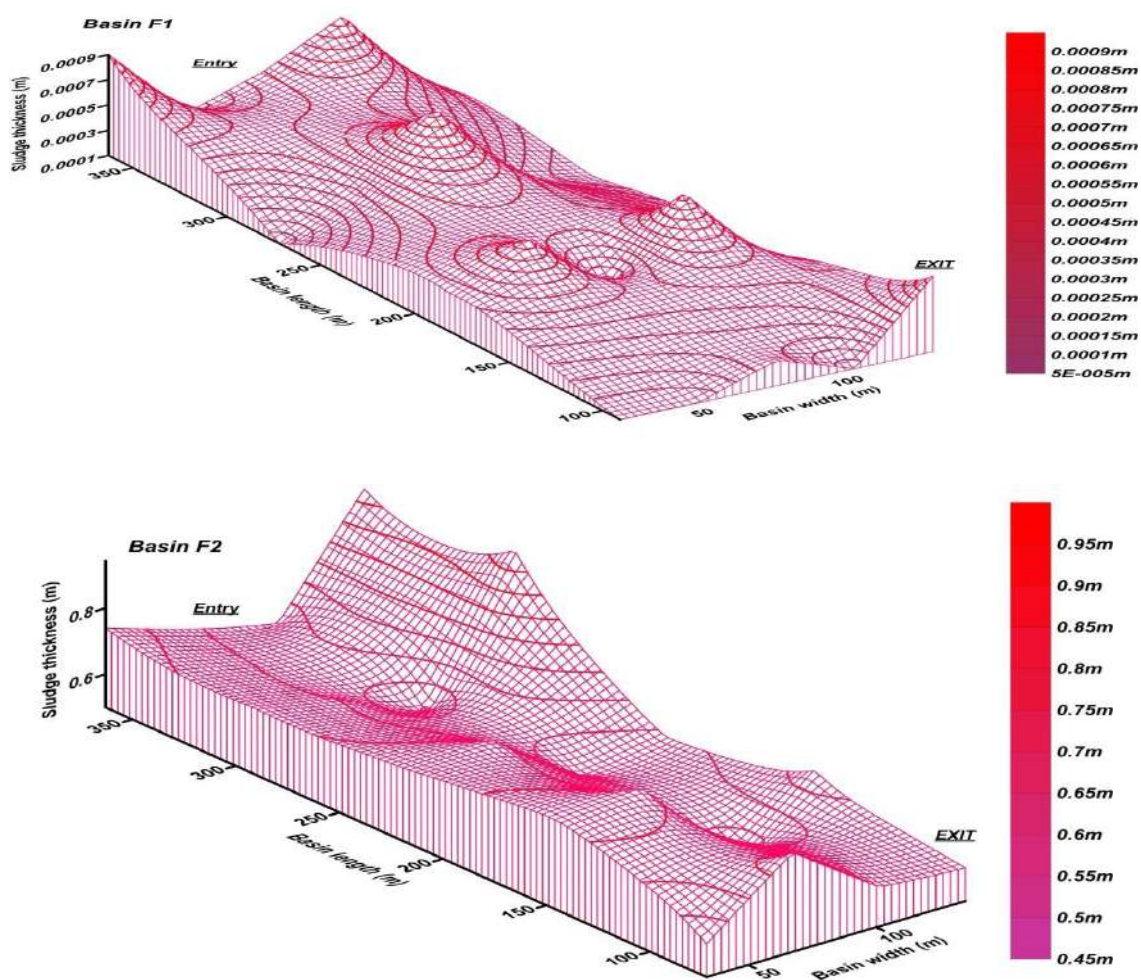


Figure 28. Distribution spatiale des sédiments au niveau des deux bassins de finition ; F1 et F2.

Chapitre III. Taux d'accumulation des boues résiduelles et la possibilité de leur valorisation agricole

En général, l'aération automatique des lagunes dans le 1^{er} et le 2^{ème} étage lors du traitement des eaux par l'utilisation d'aérateurs de surface peut expliquer la distribution spatiale hétérogène des sédiments. Alors que la distribution dans les bassins du troisième étage, désignés par MECV et MDA (1979) comme lagunes de décantation; résulte de la divergence physique des matières décantables (qui forment les boues) de l'eau épurée.

2. Production des boues

Le volume net, le taux de remplissage et le taux d'accumulation des sédiments ont été mesurés dans les 6 bassins étudiés afin d'évaluer la production de boue dans la station d'épuration de Ouargla. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.

Dans ce tableau, on observe une hausse du volume des sédiments enregistrés à partir des bassins du premier niveau de lagunage jusqu'aux bassins du niveau final, avec une différence entre les bassins de même étage ; le volume était de 7053,78m³ dans le bassin A3, 12655,75m³ dans le bassin B2 et 19813,37m³ dans le bassin F2. L'augmentation observée est causée par les processus qui se déroulent à chaque niveau du lagunage. D'après Keffala et *al.* (2011), dans les bassins de l'étage d'aération, sur les niveaux 1 et 2 de lagunage, les eaux sont traitées par des micro-organismes qui consomment et assimilent les nutriments provenant de la pollution à éliminer, donc il y a une transformation de la pollution grâce à l'activité biologique ; la dégradation de la matière organique s'accompagne d'une sédimentation des matières décantables de l'effluent. Dans l'étage de décantation, bassins de finition, les matières en suspension que sont les amas de micro-organismes et de particules piégées, décantent pour former les boues.

Chapitre III. Taux d'accumulation des boues résiduairees et la possibilité de leur valorisation agricole

Tableau 5. Production de boue dans chaque bassin.

Bassins	Nombre de mois de fonctionnement	Epaisseur des sédiments			Volume net (m ³)	Volume total (m ³)	Taux de remplissage (%)	Taux d'accumulation	
		Min (cm)	Max (cm)	Moyenne (cm)				cm/an	m ³ .EH ¹ .an ¹
A2	72	1,31	81	15,2	1959,11	85 200	2,299	2,53	/
A3	168	15	100	49,4	7053,78	85 200	8,279	3,52	/
B1	72	1	15	7	189,38	113 600	0,166	1,66	/
B2	168	1,15	75	44,7	12655,75	113 600	11,14	79,86	/
F1	72	0,01	0,09	0,04	12,02	74 027	0,016	0,13	/
F2	168	49	95	67,9	19813,37	74 027	26,748	98	/
Total	/				41683,41	460 454	/	/	0,015

Vt : volume total de chaque bassin, Vnet : volume des sédiments calculé par le logiciel Surfer, EH : équivalent habitant

Selon les taux de remplissage des bassins par les sédiments, il est observé que le volume occupé par la boue dans les bassins A2, A3, B1, B2 et F1 est relativement faible par rapport au volume total des bassins. Il oscille entre 0,016% et 11,14%, ce qui est inférieur à 25%. C'est la valeur à laquelle le curage de la lagune est nécessaire (Bonard et Gardel, 2003). Dans le bassin F2, la boue occupe 26,74% du volume total de la lagune. En raison de cette quantité, il est essentiel de faire le curage de ce bassin.

En se référant au critère de la hauteur moyenne de la boue dans le bassin pour débiter le curage, on remarque que Racault et Boutin (2004) ont démontré que lorsque cette hauteur dépasse 25cm, la nécessité du curage est systématiquement confirmée. Par conséquent, il est nécessaire de curer les bassins A3, B2 et F2 qui se distinguent par une hauteur de boue moyenne de 49,4cm, 44,7cm et 67,9cm.

Les taux annuels d'accumulation varient de 0,13 à 98cm par an. Pour les bassins A2, A3, B1, B2, F1 et F2, les valeurs annuelles calculées sont respectivement de 2,53cm/an, 3,52cm/an, 1,66cm/an, 79,86cm/an, 0,13cm/an et 98cm/an, tandis que la valeur moyenne calculée pour toute la station est de 30,95cm/an.

Chapitre III. Taux d'accumulation des boues résiduaires et la possibilité de leur valorisation agricole

3. Caractérisation des sédiments

3. 1. Caractérisation physicochimique

Les données présentées dans le tableau 6 incluent les niveaux de pH, la conductivité électrique (CE), la siccité et les matières volatiles en suspension dans la boue, mesurées à l'entrée, au milieu et à la sortie des bassins A3, B2 et F2. Sur cette base, il a été déterminé que la boue présente un pH moyen de 7,54, la classant comme alcaline, et une CE moyenne de 9 390 μ S/cm, indiquant qu'elle est saline. L'homogénéité quasi constante de l'alcalinité et de la salinité dans la boue à travers les trois bassins est évidente en raison des faibles valeurs d'écart-type observées pour ces deux variables. Les valeurs élevées de CE sont directement liées à la forte conductivité des eaux usées, qui contribue à la formation de boue décantée. La CE de l'eau brute était de 24000 μ S/cm, et celle de l'eau traitée avait une CE de 14000 μ S/cm, selon la station d'épuration des eaux usées de Ouargla (STEP, 2017). Compte tenu du pH et de la CE de cette boue, il est essentiel de connaître les caractéristiques du sol – en particulier le pH et la CE – avant d'appliquer la boue sur le sol afin de réduire le risque d'augmentation de la salinité et de l'alcalinité.

Il est également évident que la boue générée par les trois bassins étudiés présente une siccité extrêmement élevée, avec des valeurs dépassant 96%. La faible variabilité de la siccité de la boue à travers les trois bassins est confirmée par un faible écart-type (1,43). Cela est illustré plus en détail dans la figure 5, où la teneur en matière sèche (MS) dans la boue varie latéralement entre 96 % et 98 %, tandis qu'elle atteint 93 % à l'entrée du bassin B2. Selon une étude de Keffala et *al.* (2011), qui évalue la consistance de la boue en fonction de sa siccité, la boue provenant de la STEP de Ouargla est classée comme sèche. La forte consistance peut être attribuée à l'efficacité du processus de séchage solaire utilisé dans la station d'épuration.

Le pourcentage moyen de matières volatiles en suspension (MVS) dans la boue des trois bassins est de 19,97%. Compte tenu de l'écart-type de 9,59, les valeurs mesurées montrent une variation significative autour de la moyenne. Comme illustré dans la figure 29, les valeurs les plus élevées ont été observées au premier stade de traitement en lagune, dépassant 30%. Au deuxième stade, elles sont tombées à 20%, et au stade final de la lagune, elles ont atteint 9%. Selon l'étude de Rejsek (2002), ces faibles valeurs suggèrent que la boue sèche produite par la station d'épuration des eaux usées de Ouargla n'est pas facilement fermentescible. Cela peut être attribué au processus d'aération pendant le séchage, où des micro-organismes aérobies décomposent la matière organique présente dans la boue. Ce processus, connu sous le nom de digestion aérobie, est utilisé pour stabiliser la boue.

Chapitre III. Taux d'accumulation des boues résiduaires et la possibilité de leur valorisation agricole

Tableau 6. Caractéristiques physicochimiques de la boue dans les bassins A3, B2 et F2.

n=9	pH	EC ($\mu\text{S/cm}$)	DM (%)	SVM (%)	TN (%)	TP (%) de MS	K (%) de MS	Mg (%) de MS	Ca (%) de MS
Mean	7.54	9390	96.73	19.67	1.16	1.28	0.56	6.04	1.35
Ecart type	0.76	195	1.43	9.59	0.18	0.7	0.03	0.79	0.17

MS : matière sèche, MVS : matières volatiles en suspension, NT : azote total, PT : phosphore total, K : potassium, Mg : magnésium, Ca : calcium total.

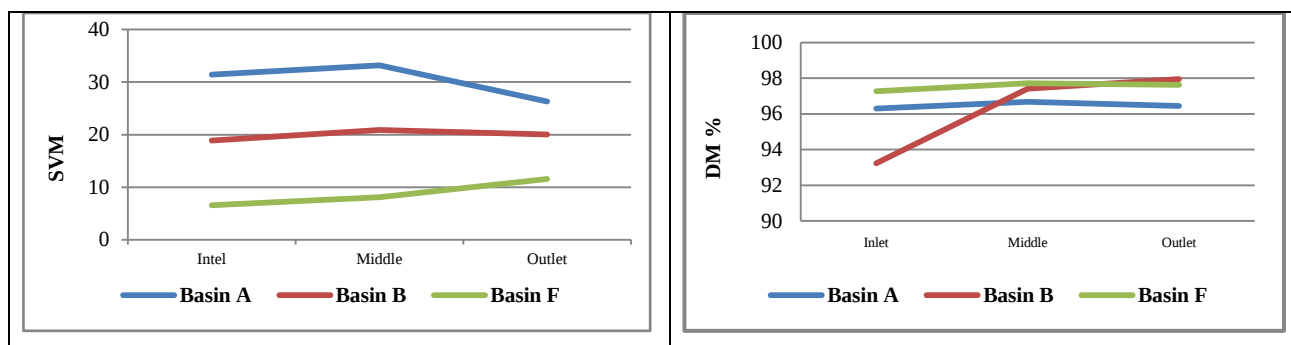


Figure 29. Distribution latérale des teneurs en matière sèche (MS) et en matières volatiles en suspension (MVS) dans les bassins A3, B2 et F2.

. Nutriments

Les principaux éléments fertilisants (N, P, K, Mg et Ca) ne représentent que 10,39 % de la matière sèche (MS) de la boue. Le magnésium est l'élément le plus abondant, représentant 6,04 %, tandis que les autres éléments ont des concentrations inférieures à 1,5 % (Tableau 6). Les eaux usées de la province de Ouargla, qui sont à l'origine de la boue étudiée, sont classées comme des eaux usées salines (Negais et *al.*, 2021; STEP, 2017; Bouhanna et *al.*, 2019). La pression osmotique accrue due aux ions salins dans l'eau constitue une menace significative pour les micro-organismes responsables du traitement biologique, limitant sévèrement l'efficacité du processus de traitement des eaux usées (Song et *al.*, 2023; Srivastava et *al.*, 2021). En conséquence, la composition de la boue déposée pendant le traitement en est directement affectée.

. Éléments traces métalliques

Selon le tableau 7, la présence de métaux lourds dans la boue est faible, se trouvant en quantités infimes et bien en deçà des concentrations maximales autorisées spécifiées dans la norme algérienne (NA17731:2017) et la norme AFNOR (U44-041:1985) pour l'utilisation agricole des boues d'épuration (IANOR, 2017; Boumediene et *al.*, 2005).

Chapitre III. Taux d'accumulation des boues résiduelles et la possibilité de leur valorisation agricole

Cela réduit considérablement le risque de contamination du sol et empêche le transfert des éléments traces métalliques vers les plantes cultivées ou leur migration verticale vers les aquifères.

Tableau 7. Teneur en éléments traces métalliques dans la boue du bassin B2.

Elément	Concentration (mg/kg de MS)	Normes Algériennes (NA17731:2017) (mg/kg de MS)*	Normes Afnor (U44-041:1985) (mg/kg de MS)
Cu	0.072	1750	2000
Ni	0.00	400	400
Cd	0.05	40	40
Hg	0.001	25	20
Pb	0.05	1200	1600
Zn	0.05	4000	6000

. Cuivre (Cu), Nickel (Ni), Cadmium (Cd), Mercure (Hg), Plomb (Pb) et Zinc (Zn).

*Aucune teneur en boue pour l'un de ces éléments traces ne doit dépasser 25 % de la teneur maximale correspondante.

La faible concentration d'éléments traces métalliques dans la boue peut être attribuée à son traitement principalement issu d'eaux usées domestiques, qui sont riches en matière organique, par opposition aux eaux usées industrielles, qui contiennent davantage de minéraux.

3. 2. Caractérisation bactériologique

Les résultats des analyses bactériologiques, présentés dans le tableau 8, montrent que la boue provenant de la station d'épuration des eaux usées de Ouargla ne contient ni coliformes fécaux (FC) ni streptocoques fécaux. L'absence de contamination fécale dans la boue peut être attribuée à sa forte salinité. L'exposition au soleil joue également un rôle crucial dans la réduction de l'abondance bactérienne, en particulier dans des conditions de pH élevé.

Tableau 8. Résultats des analyses bactériologiques de la boue dans les bassins A3, B2 et F2.

Paramètre	A3	B2	F2
Coliformes fécaux (UFC/ml)	Absent	Absent	Absent
Streptocoques fécaux (UFC/ml)	Absent	Absent	Absent

Chapitre III. Taux d'accumulation des boues résiduaires et la possibilité de leur valorisation agricole

3. 3. Etude économique

. Quantité de nutriments dans la boue

- Quantité annuelle de boue : 5 100mètres cubes = 10 200tonnes (en supposant une densité de la boue de 2 tonnes/mètre cube).
- Quantité d'azote dans la boue : $10\,200\text{ tonnes} \times 1,16\% = 118,32\text{ tonnes}$.
- Quantité de phosphore dans la boue : $10\,200\text{ tonnes} \times 1,28\% = 130,56\text{ tonnes}$.
- Quantité de potassium dans la boue : $10\,200\text{ tonnes} \times 0,56\% = 57,12\text{ tonnes}$.

. Quantité finale d'engrais

Pour produire un engrais chimique (NPK), il est nécessaire de combiner les nutriments extraits de la boue avec d'autres ingrédients afin d'atteindre la formulation cible :

- Azote (11%)
- Phosphore (25%)
- Potassium (20%)

En se basant sur les quantités disponibles de nutriments provenant de la boue, nous pouvons estimer la quantité d'engrais NPK qui peut être produite.

. Quantités disponibles de nutriments :

- Azote disponible : 118,32tonnes.
- Phosphore disponible : 130,56tonnes.
- Potassium disponible : 57,12tonnes.

. Quantité potentielle finale d'engrais

Nous utilisons la plus petite quantité disponible de nutriments pour déterminer la quantité totale d'engrais qui peut être produite. Le potassium est l'élément limitant (plus petite quantité) :

- Si le potassium représente 20% de l'engrais, la quantité totale d'engrais qui peut être produite est calculée comme suit :

Quantité totale d'engrais fini pouvant être produite = $57,12\text{ tonnes} / 20\% = 285,60\text{ tonnes}$ d'engrais fini (NPK).

Ainsi, la quantité potentielle totale d'engrais fini (NPK) qui peut être produite est de 285,60tonnes.

Chapitre III. Taux d'accumulation des boues résiduaires et la possibilité de leur valorisation agricole

. Extrait du tableau 9 :

. Main-d'œuvre : Ce processus nécessite trois travailleurs. Le coût mensuel de la main-d'œuvre est de 60 000,00DZD, ce qui signifie que le coût annuel des salaires est de **720 000,00DZD**.

. Sacs consommés : Le processus de production nécessite 5 800 sacs, le coût actuel sur le marché d'un sac étant estimé à 30DZD, ce qui représente un coût annuel des sacs d'environ **174000,00DZD**.

Tableau 9. Aspect financier.

Énoncé	Quantité	Prix (DA)	Montant total (DA)
Chiffre d'affaires	285.60	8000.00	2284800.00
Sacs utilisés	5800	30.00	174000.00
Main-d'œuvre	12	60000.00	720000.00
Amortissement (usure du matériel)	12	30000.00	360000.00
Frais de maintenance, électricité, eau... (1 % du chiffre d'affaires)		228480.00	228480.00
Résultat			802320.00

4. Discussion

Les résultats des analyses bathymétriques, physico-chimiques et bactériologiques de la boue résiduelle produite par le lagunage aéré dans les bassins de la station d'épuration des eaux usées de Ouargla indiquent que le modèle de sédimentation observé dans les bassins A2, B2, F1 et F2 est cohérent avec les résultats des études sur le lagunage menées par Racault en France (1997), où il a démontré une accumulation irrégulière des dépôts dans les bassins. Selon la forme du bassin, les dépôts sont plus concentrés dans trois zones : l'entrée, la sortie et une bande latérale. Dans ces régions, où les débits sont plus lents, la sédimentation est plus importante. Cependant, le scénario décrit par Vuillot et Boutin (1985), qui suggère que la plupart de la boue se dépose près de l'entrée des eaux usées, formant un cône de sédimentation, correspond au modèle de sédimentation observé dans les bassins A3 et B1. La partie restante se dépose uniformément au fond de la lagune.

Le taux moyen d'accumulation de boue est inférieur à celui de la boue accumulée dans un système de stabilisation des eaux usées à Vamvakofito au nord de la Grèce (Gratziou et Chalatsi, 2017), avec un taux de 0,09m³/personne/an comparé à 0,015m³/EH/an dans notre station.

Chapitre III. Taux d'accumulation des boues résiduaires et la possibilité de leur valorisation agricole

Cependant, l'inverse est observé lorsqu'on compare l'épaisseur des sédiments accumulés dans les deux stations : 30,95cm/an dans la station de Ouargla et 1,4 cm/an dans la station de Vamvakofito (Gratziou et Chalatsi, 2017). Cette disparité peut être liée à la capacité de traitement de chaque station.

Le pH de la boue de la station d'épuration des eaux usées de Ouargla est similaire à celui de la boue de la station de Fès (Afgane et *al.*, 2019). Cependant, il est important de noter que la boue de Ouargla présente une salinité élevée, comme indiqué par sa CE, ce qui pose un risque pour une utilisation agricole.

La siccité de la boue produite par la station de Ouargla est très élevée, similaire à celle de la boue sèche de la station d'épuration des eaux usées de Touggourt (une ville du Sahara algérien située à 160 km de Ouargla) (Idder et *al.*, 2012). Selon l'étude de Gratziou et Chalatsi (2015), une forte siccité présente l'avantage de réduire le volume de boue à transporter et permet son stockage sur le terrain, ce qui n'est pas autorisé avec une boue liquide. Les conditions de forte siccité facilitent également le transport de la boue vers des sites de compostage spécialisés. La boue de la station de Ouargla a une teneur en matière organique, exprimée en solides volatils en suspension, modérément faible et similaire à celle de la boue de Touggourt, qui présente une teneur en azote plus élevée (2,6% dans la boue de Ouargla contre 1,55% dans celle de Touggourt), mais leurs teneurs en phosphore sont presque égales (0,55% à Ouargla et 0,52% à Touggourt). Avec cette composition, l'application de la boue de la station de Touggourt sur des sols agricoles – pratiquement identiques à ceux de Ouargla (Halitim, 1985) – a conduit à des améliorations des caractéristiques du sol, de la teneur en matière organique, de la capacité d'échange cationique et de la capacité de rétention d'eau. De plus, cela a entraîné une augmentation de la production agricole. Par conséquent, les niveaux d'éléments fertilisants trouvés dans la boue étudiée pourraient également améliorer la qualité du sol et augmenter la productivité des cultures dans des conditions d'utilisation similaires.

Dans la boue de la station de Ouargla, la concentration de métaux lourds (cuivre, zinc, nickel et cadmium) était inférieure aux résultats obtenus pour la boue des stations d'épuration des eaux usées de Mazandaran (Yousefi et *al.*, 2023). Cependant, dans les deux cas, conformément aux normes, l'utilisation de ces biosolides en agriculture n'est pas restreinte par ces métaux.

Chapitre IV.

Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux épurées (Sebkhet Safioune)

Chapitre IV. Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux épurées (Sebkhet Safioune)

1. Qualité physicochimique de l'eau

Pendant notre durée d'étude, les valeurs des paramètres étudiés au niveau des eaux des trois stations étudiées ont été variables à l'échelle temporelle que spatiale.

. Température

Selon la figure 30, les eaux ont une température variant de 20°C à 35°C. Aucune disparité spatiale de température n'est constatée dans cette sebkha ; les stations sont presque parfaitement homogènes sur le plan thermique.

Les plus hautes valeurs ont été enregistrées en août, pendant la période de basse eau dans la cuvette, ce qui signifie qu'il y a une variation de température de l'eau en fonction de la température de l'air qui atteint son maximum en été avec l'évaporation.

Selon De Villers *et al.* (2005), cette température est essentielle pour la solubilité des sels et des gaz, y compris l'oxygène indispensable à l'équilibre de la vie aquatique d'une part, et stimule l'activité métabolique des organismes aquatiques lorsque sa concentration augmente, d'autre part.

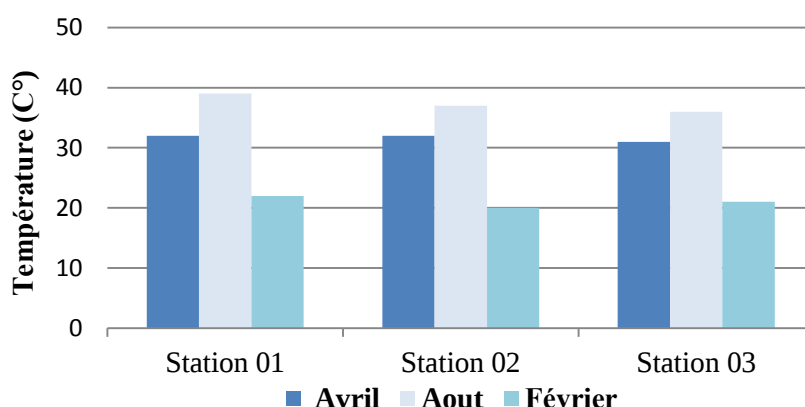


Figure 30. Variation spatiotemporelle de la température des eaux de Sebkhet Safioune.

. pH

Le pH de cette eau oscille entre 6,38 et 8,36. Des valeurs de 6 ont été enregistrées dans la station 02 en août et dans la station 01 en février, ce qui signifie que les eaux sont légèrement inférieures à la neutralité (pH=7). Dans les autres situations, il s'agit d'eaux neutres à alcalines (Figure 31).

D'après le pH recommandé pour la vie aquatique (6,5 à 9,0) établi par CREL (2009), les organismes vivants de la station 02 (en août) et de la station 01 (en février) peuvent être exposés à un stress qui pourrait compromettre certaines de leurs fonctions vitales, tandis que dans les autres cas, le pH est favorable.

Chapitre IV. Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux épurées (Sebkhet Safioune)

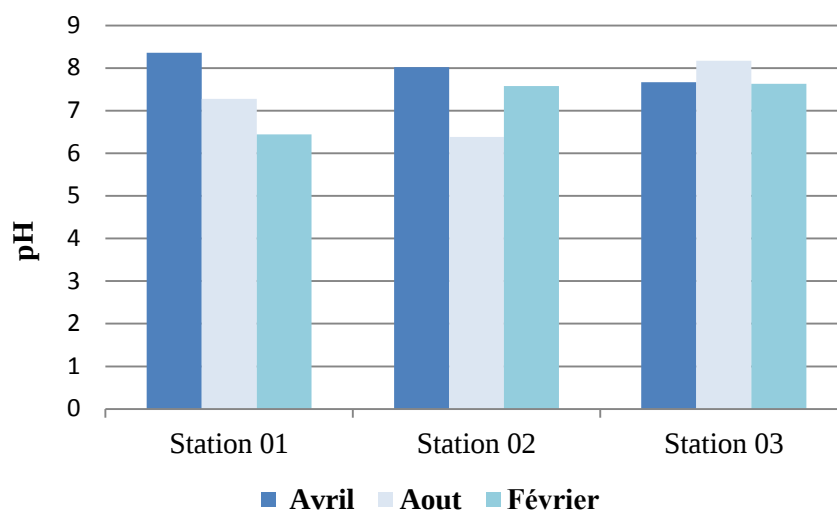


Figure 31. Variation spatiotemporelle du pH des eaux de Sebkhet safioune.

. Conductivité électrique

La variation de la conductivité électrique des eaux pendant la période d'étude est illustrée dans la figure 32. Il est observé que l'eau a présenté des valeurs supérieures à 17 mS/cm, avec une conductivité maximale atteignant 44,2mS/cm en août, tandis que les valeurs faibles ont été enregistrées en février. Le premier mois correspond à la période de basses eaux, tandis que le second mois correspond à la période de hautes eaux. Les variations spatiales de la conductivité électrique indiquent que la station 02 présente des valeurs inférieures par rapport aux autres stations.

On peut expliquer la hausse de la conductivité électrique pendant l'été par l'augmentation de l'évaporation de l'eau de la sebkha, ce qui entraîne une augmentation de la concentration des ions dans l'eau. Cependant, dans la station 02, l'alimentation continue du plan d'eau par les eaux épurées et de drainage, ainsi que la profondeur d'eau importante par rapport aux autres stations, diminue l'effet de l'évaporation.

Selon CREL (2009), les valeurs de conductivité d'un lac sont généralement stables et dépendent surtout de la géologie locale.

Lorsque des changements notables de conductivité sont observés dans un lac, c'est le signe d'une augmentation des apports de substances dissoutes provenant du bassin versant.

Chapitre IV. Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux épurées (Sebkhet Safioune)

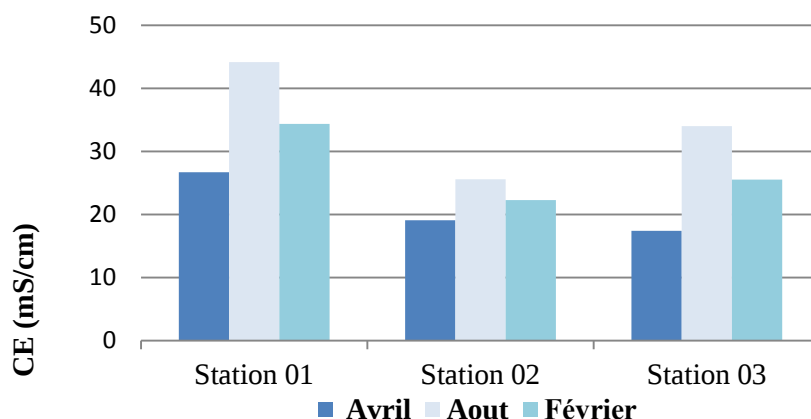


Figure 32. Variation spatiotemporelle de la conductivité électrique des eaux de Sebkhet Safioune.

. Oxygène dissous

La variation spatiotemporelle de l'oxygène dissous (figure 31) est très nette, la quantité la plus faible pour chaque station a été observée en août, la moyenne en avril et la maximale en février (haute eaux). Elles ont une concentration variant de 1,4mg/l à 4mg/l. La solubilité de l'O₂ dans l'eau diminue pendant l'été (août) en fonction de la salinité et de la température qui augmentent également. L'air turbulent favorise l'incorporation de l'oxygène gazeux dans l'eau et l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques augmente la production d'oxygène en février et avril.

La station 02 possède la plus grande quantité d'oxygène car elle présente une faible salinité par rapport aux autres stations.

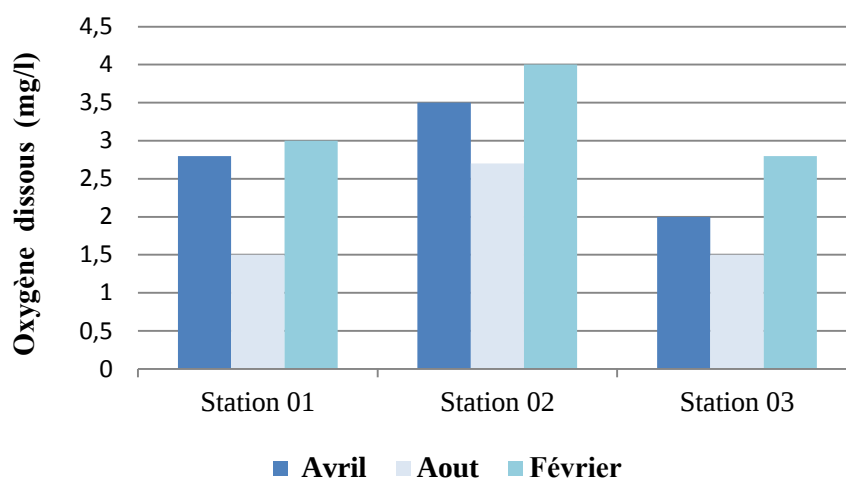


Figure 33. Variation spatiotemporelle de la teneur en oxygène dissous des eaux de Sebkhet Safioune

Chapitre IV. Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux épurées (Sebkhet Safioune)

. Solides totaux dissous

La figure 324 met en évidence la présence de niveaux élevés de matières solides dissoutes dans l'eau du Sebkha, avec des valeurs variant de 10000 à 31000mg/l. Les valeurs sont plus élevées en basses eaux (août).

La teneur élevée des solides totaux dissous est causée par l'évaporation rapide de l'eau, ce qui laisse derrière elle des sels concentrés, selon CEAEQ (2023), les solides dissous sont principalement constitués de substances inorganiques dissoutes dans l'eau. Les principaux constituants des solides dissous sont les chlorures, les sulfates, les bicarbonates, le calcium, le magnésium et le sodium. Ces éléments forment l'essentiel de la composition des apports des eaux usées épurées et de drainage.

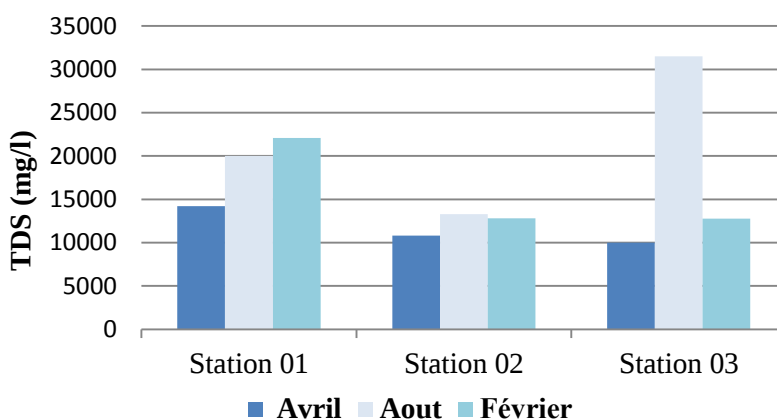


Figure 34. Variation spatiotemporelle des solides totaux dissous des eaux du Sebkhet Safioune.

. Matières en suspension

D'après la figure 35, il y a une variation discrète des concentrations en matières en suspension dans les eaux de Sebkha, allant de 2500mg/l à 6685,7mg/l. La valeur maximale a été enregistrée dans la station 02 en août.

D'après le bilan de l'auto-surveillance de la STEP de Ouargla (2017), les niveaux de matières en suspension dans les eaux épurées produites sont toujours supérieurs aux valeurs limites algériennes des paramètres de rejets (MES: 35 à 40mg/l). Par conséquent, c'est la principale raison des valeurs élevées de MES dans la Sebkha. De plus, les eaux de drainage agricoles non épurées contiennent souvent des particules de terre, de sable et d'argile, ainsi que des phytoplanctons et des zooplanctons souvent transportés vers le milieu récepteur.

Ces matières affectent la transparence de l'eau et diminuent la pénétration de la lumière et, par suite, la photosynthèse. Elles peuvent également gêner la respiration des poissons. Par ailleurs, les

Chapitre IV. Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux épurées (Sebkhet Safioune)

matières en suspension peuvent accumuler des quantités élevées de matières toxiques (métaux, pesticides, huiles minérales, hydrocarbures aromatiques polycycliques...) (De Villers et *al.*, 2005).

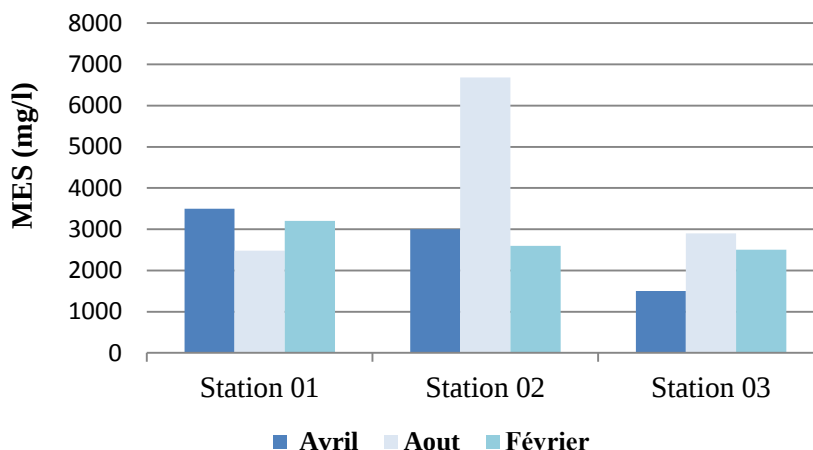


Figure 35. Variation spatiotemporelle des matières en suspensions dans les eaux de Sebkhet Safioune

. Azote total

Les eaux renferment des quantités significatives d'azote total, avec des valeurs variant de 7mg/l à 77mg/l. D'après la station, les valeurs élevées ont été observées dans la station 02, qui est le premier récepteur des eaux épurées et de drainage (Figure 36).

Ces quantités proviennent des eaux de la station d'épuration et de drainage. Selon le rapport de l'auto-surveillance de la STEP de Ouargla (2017), la teneur en azote totale dans les eaux épurées est très élevée et atteint 85mg/l en décembre.

. Nitrite

Les nitrites sont présents dans toutes les stations et pendant les trois mois d'étude en faibles quantités, avec des valeurs inférieures à 1,73mg/l. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées spatialement dans la station 03 et en fonction du temps en avril (Figure 36).

Selon (Corriveau, 2009), il est généralement admis que le nitrite s'oxyde facilement en nitrate et qu'en conséquence, en étant transitoire, il se retrouve rarement en concentration importante dans les eaux naturelles.

Chapitre IV. Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux épurées (Sebkhet Safioune)

. Nitrates

Dans les trois stations et chaque mois, on retrouve des concentrations de nitrates inférieures à 18mg/l. Les concentrations importantes ont été observées en août (Figure 36). Les valeurs enregistrées sont en moyenne de 5,38mg/l. D'après les données de DSI (2021), les niveaux naturels de nitrate (NO_3^-) dans les lacs et les cours d'eau sont habituellement inférieurs à 4mg/l, ce qui signifie que les stations 02 et 03 en août sont contaminées par les nitrates.

. Ammonium

En février, l'eau atteint ses niveaux maximums d'ammonium dans toutes les stations. Les niveaux observés varient de 2,75mg/l à 35,98mg/l (Figure 36). Les valeurs enregistrées sont en moyenne de 15,11mg/l.

Depuis 2009, les eaux épurées alimentant cette sebkha contiennent des quantités aussi élevées d'ammonium, atteignant 38mg/l en décembre (STEP, 2017).

. Phosphore total

La concentration totale de phosphore dans les eaux varie de 3,5mg/l à 14,66mg/l. Les mois d'avril et d'août ont enregistré des valeurs maximales dans la station 03 et le mois de février dans la station 01 (Figure 36).

. Orthophosphates

La quantité d'orthophosphate présente dans l'eau de cette sebkha fluctue entre 0,15mg/l et 5,04mg/l. D'un point de vue temporel, les valeurs les plus élevées ont été enregistrées en avril et spatialement dans la station 02, tandis que les valeurs les plus basses ont été enregistrées dans la station 01 (Figure 36). Selon De Villers et al. (2005), la source de l'orthophosphates assimilable par les organismes aquatiques est la dégradation et l'hydrolyse des phosphates qui interviennent dans la composition de nombreux détergents par les bactéries qui existent dans l'eau.

La présence de substances azotées et phosphorées dans l'eau de la Sebkha est causée par le fait que la station d'épuration ne retire pas l'azote et le phosphore présents dans les eaux usées et que les eaux usées ne sont pas entièrement épurées.

Dans un milieu aquatique, le phosphore et l'azote sont des éléments essentiels à la croissance des plantes et des algues. On dit que ce sont des nutriments limitants, c'est-à-dire que la croissance des plantes et des algues est limitée par la disponibilité du phosphore et/ou de l'azote. Plus ces

Chapitre IV. Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux épurées (Sebkhet Safioune)

éléments sont présents en grande quantité, plus la quantité de matière organique produite est importante (CREL, 2009).

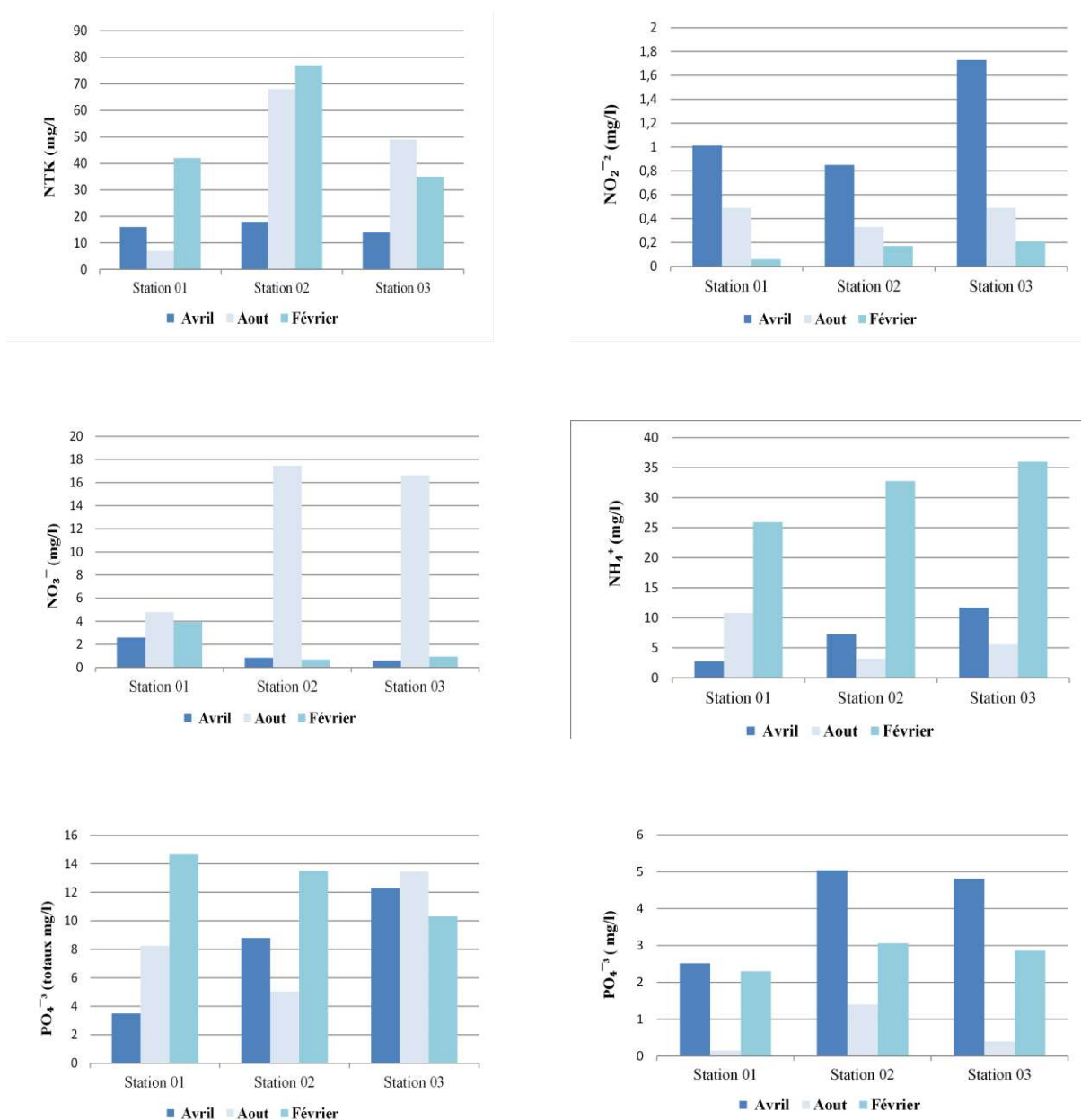


Figure 36. Variations spatiotemporelles de la teneur des nutriments dans les eaux de Sebkhet Safioun

2. Eutrophisation

Le diagnostic de l'eutrophisation d'Ifremer (2000) permet de caractériser l'état trophique des trois (3) stations étudiées. Les résultats sont présentés dans les tableaux 10, 11 et 12.

Chapitre IV. Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux épurées (Sebkhet Safioune)

. Station 01

Le tableau 10 présente les résultats du diagnostic de la station 01, indiquant que la turbidité est classée dans la catégorie "bonne". Le phosphore total et l'orthophosphate sont classés dans la catégorie "mauvais", tout comme l'azote et ses dérivés (nitrite, nitrate, ammonium). La chlorophylle A fait partie de la catégorie "mauvais". Ainsi, les eaux de la station 01 ont une mauvaise qualité d'après la grille de diagnostic. Ces eaux se trouvent dans un état eutrophe.

Tableau 10. Diagnostic de la station 01.

Variable		Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
TUR	(NTU)		9,7			
PO ₄ ³⁻	(μM)					9
NITRI	(μM)					4,4
NITRA	(μM)					34
AMMO	(μM)					114,92
Chl-a	mgM ⁻³					189,17
NT	(μM)					185
PT	(μM)					79
Niveau trophique						Mauvais

. Station 02

Les résultats du diagnostic de la station 02 sont présentés dans le tableau 11, où tous les paramètres d'eutrophisation sont classés dans la catégorie "mauvais". Selon la grille de diagnostic, les eaux de la station 02 présentent une qualité "mauvais". Ces eaux se trouvent dans un état hypereutrophe.

Tableau 11. Diagnostic de la station 02.

Variable		Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
TUR	(NTU)					57,74
PO ₄ ³⁻	(μM)					26,55
NITRI	(μM)					3,8
NITRA	(μM)					53,6
AMMO	(μM)					123,76
Chl-a	mgM ⁻³					51,87
NT	(μM)					478
PT	(μM)					79,57
Niveau trophique						Mauvais

Chapitre IV. Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux épurées (Sebkhet Safioune)

. Station 03

Le tableau 12 présente les résultats du diagnostic de la station 03, pour laquelle tous les paramètres d'eutrophisation sont classés dans la catégorie "mauvais". Par conséquent, selon la grille de diagnostic, la qualité des eaux de la station 03 est mauvaise. Les eaux se trouvent dans un état hypereutrophe.

Tableau 12 : Diagnostic de la station 03.

Variable		Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
TUR	(NTU)					117
PO ₄ ³⁻	(μM)					17,8
NITRI	(μM)					6
NITRA	(μM)					52
AMMO	(μM)					150,28
Chl-a	mgM ⁻³					27,84
NT	(μM)					283,88
PT	(μM)					106,08
Niveau trophique						Mauvais

3. Variation spatiotemporelle de la surface aquatique et du recouvrement végétal

Les figures 37, 38 et 339 illustrent les cartes SAVI de Sebkhet Safioune. L'étude de ces cartes, en conformité avec le principe mentionné par Huete (1988), révèle que :

. En 1990 : L'indice affiche des valeurs allant de -0,6 à 0,79. Les valeurs inférieures à 0 qui se manifestent par une couleur sombre, symbolisent un sol humide. L'atténuation de cette couleur dénote une baisse de l'humidité du sol. Un sol avec une croûte saline, correspond à une valeur entre 0,07 et 0,1. L'élément vert est restreint et symbolise une végétation halophyte rare. Ce manque en couverture végétale est associé à la salinité et à l'aridité du sol (Figure 37). En accord avec la description fournie par Bonnard et Gardel (2003), Sebkhet Safioune représente un milieu extrêmement pauvre en biodiversité (avec des eaux souterraines contenant de 250 à 300g/l de sel).

. En 2015 : Il y a une augmentation du SAVI entre -0,43 et 0,82 comparé à l'année 1990. Cette progression se manifeste par une montée du niveau d'eau au centre de sebkha et le commencement d'une délimitation claire des frontières de sebkha avec des zones de végétation plus étendues en périphérie (Figure 38).

L'augmentation modérée de la densité végétale liée à une légère expansion de l'eau due aux rejets des eaux usées épurées et de drainage de la cuvette de Ouargla, depuis 2009.

Chapitre IV. Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux épurées (Sebkhet Safioune)

. En 2023 : Les valeurs de SAVI notées entre -0,34 et 0,81, caractérisent une croissance végétale dense, dominé par le roseau au centre et entouré de larges tapis d'algues vertes. L'eau et la végétation se distribuent en alternance avec la croûte saline (Figure 39). Cette hausse attribuée à la croissance constante des rejets d'eaux usées en relation avec l'accroissement de la population dans la cuvette.

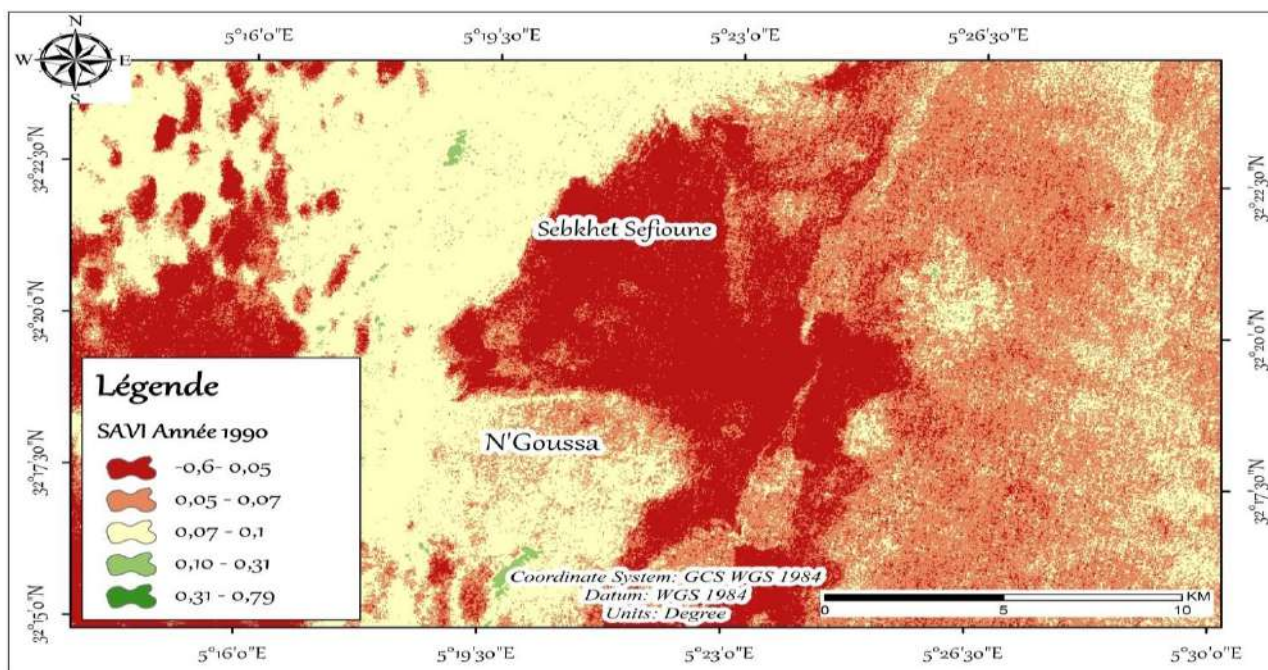


Figure 37. Indice de végétation ajusté au sol (SAVI) de Sebkhet Safioune en 1990.

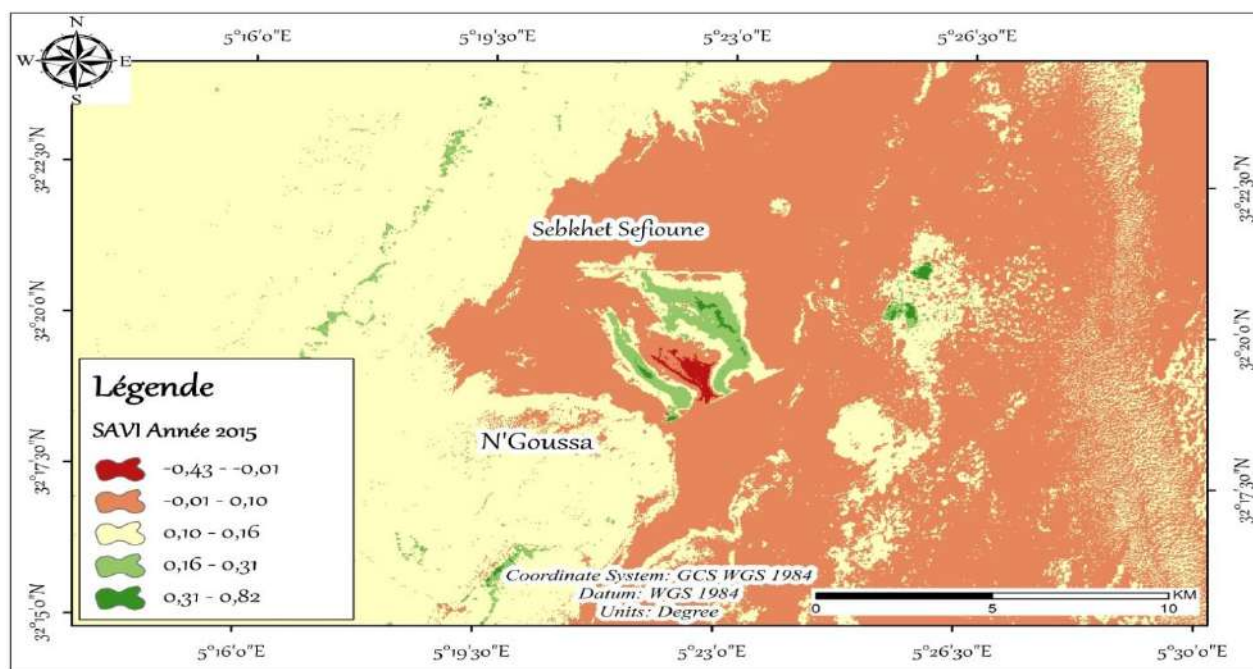


Figure 38. Indice de végétation ajusté au sol (SAVI) de Sebkhet Safioune en 2015.

Chapitre IV. Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux épurées (Sebkhet Safioune)

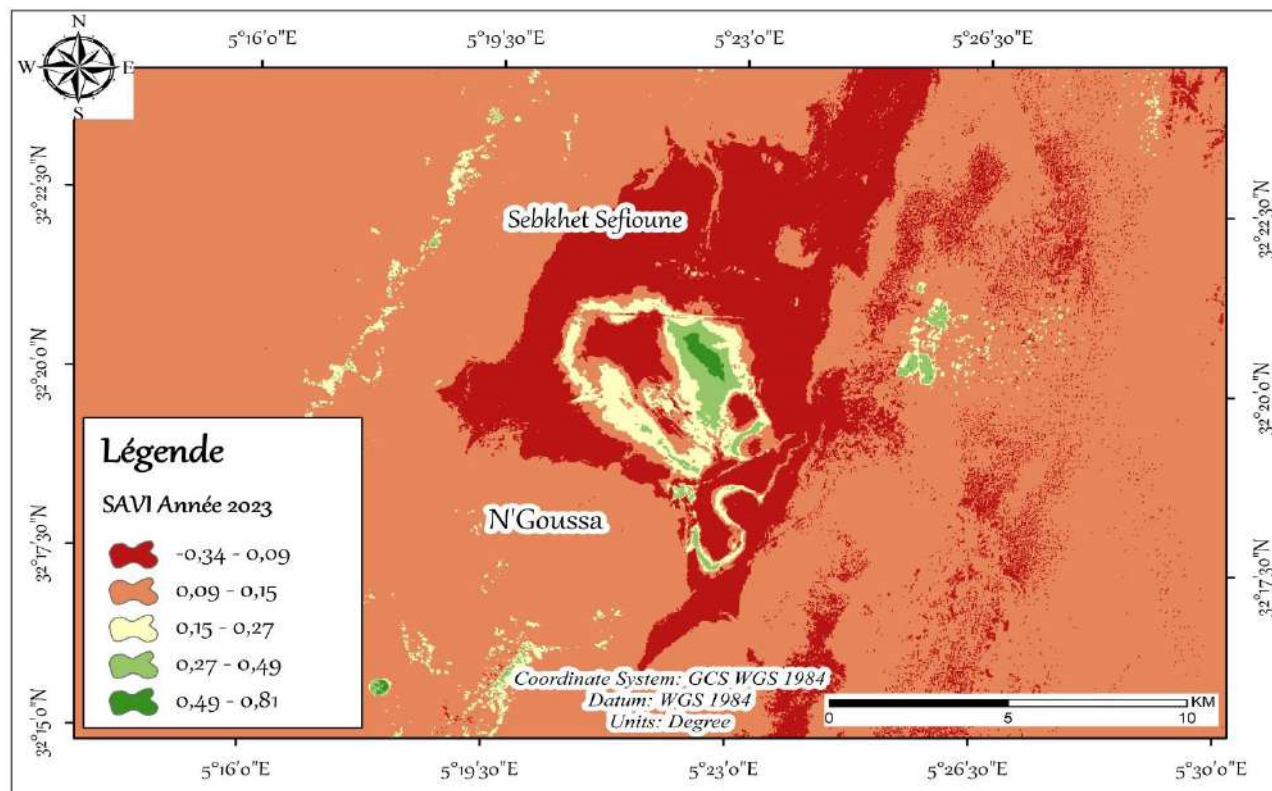


Figure 39. Indice de végétation ajusté au sol (SAVI) de Sebkhet Safioune en 2023.

4. Discussion

Les données issues des études physico-chimiques, de l'évaluation du risque d'eutrophisation et de l'évolution spatiotemporelle des eaux de Sebkhet Safioune révèlent que les propriétés physico-chimiques de ces eaux fluctuent tant dans l'espace que dans le temps. La température des eaux de Sebkhet Safioune est élevée et dépasse celle de trois lacs salés permanents de la vallée d'Oued Righ (Bas Sahara algérien), à savoir les lacs Ayata, Mégarine et Témacine (Gouasmia et *al.*, 2016). Elle dépasse également la température du Chott Ain Elbeida (Ouargla) et du Chott Merrouane (El Meghaier) (Merabet, 2011), la disparité de température entre ces lacs salés, bien qu'ils se trouvent dans la même zone climatique, est due à leur profondeur respective. Sebkhet Safioune se révèle moins profonde, notamment au niveau de la section correspondant à la station 02, ce qui permet à l'eau d'absorber plus efficacement la chaleur solaire. Cependant, Cette Sebkha affiche une conductivité électrique nettement inférieure à celle relevée au Chott Merrouane, qui atteint 182mS/cm, et au Chott Ain Elbeida, avec une valeur de 171,2mS/cm (Merabet, 2011). Quant à la Sebkhet Bamendil, elle présente des valeurs variant entre 40 et 225mS/cm pour une moyenne de 103mS/cm (Zeddouri et Hadj Said, 2012).

Chapitre IV. Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux épurées (Sebkhet Safioune)

D'après Nader (2014), qui a obtenu des valeurs similaires aux nôtres ($<32\text{mS/cm}$), la diminution de la conductivité électrique des eaux de Sebkhet Safioune serait due à la dilution des eaux anormalement salées de la nappe phréatique par les eaux de rejet.

Comme pour les autres lacs salés du bas Sahara, le pH des eaux de cette Sebkha est alcalin, à l'instar de celui des Ayata, Mégarine et Témachine, où il fluctue entre 7,23 et 8,05 (Gouasmia et *al.*, 2016). Cependant, certaines valeurs inférieures à la neutralité ont été notées. La réduction du pH dans ces précédentes stations peut être imputée à l'activité respiratoire des algues et à la décomposition de la matière organique, conduisant à une élévation des niveaux de dioxyde de carbone et une baisse du pH (SC, 2015).

Elles affichent une faible concentration d'oxygène dissous (égale ou inférieure à 4mg/l), comparable aux taux observés dans les trois lacs Ayata, Mégarine et Témachine analysés par Gouasmia et *al.* (2016). D'après Wetzel (1983), on considère généralement que des concentrations inférieures à 4 mg/L indiquent une eau de mauvaise qualité ou polluée. L'augmentation de la température de l'eau entraîne une réduction de la quantité d'oxygène dissous, ce qui peut compromettre la vie des poissons (OBVNEBSL, 2009).

L'analyse de la concentration en solides totaux dissous des eaux de Sabkhet Safioune par rapport à celle de la retenue d'eau de Kogbétohouè (Sud-Bénin) (Noumon et *al.*, 2015) révèle que les eaux de Sabkhet Safioune présentent une concentration presque 200 fois supérieure. Ceci s'explique par le fait que l'eau de la retenue est douce, alors que les eaux de Sebkha sont salées. Ainsi, les niveaux de matières en suspension sont remarquablement plus élevés par rapport à la concentration de ces mêmes matières dans les eaux des chotts Merrouane et Ain Elbeida, qui ne dépassent pas 1600mg/l (Merabet, 2011).

Les concentrations d'azote total et de nitrates dans cette sebkha sont considérablement plus élevées que celles relevées par Noumon et son équipe (2015) dans le réservoir d'eau de Kogbétohouè, où elles n'excédaient pas 8mg/l de NT et $1,5\text{mg/l}$ de NO_3^- . Même pour les valeurs de nitrite relevées, elles sont légèrement plus élevées que celles de la retenue d'eau de Kogbétohouè ($0,006\text{mg/l}$ de NO_2^-).

Concernant le phosphore, les moyennes des valeurs d'orthophosphate et de phosphore total sont respectivement de $2,50\text{ mg/l}$ et $9,98\text{mg/l}$. Ces chiffres sont plus élevés que ceux rapportés par Noumon et *al.* (2015) dans la retenue d'eau de Kogbétohouè, où le PO_4^{-3} était inférieur à $0,6\text{mg/l}$ et le PT inférieur à 3mg/l . Cela démontre que la retenue de Kogbétohoué présente une moindre pollution azotée et phosphorée par rapport à Sebkhet Safioune.

Chapitre IV. Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation du milieu récepteur des eaux épurées (Sebkhet Safioune)

Le diagnostic de l'état actuel de la Sebkha révèle des concentrations élevées de certains éléments tels que PT, PO_4^{-3} , NT, NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , TDS et MES, ce qui caractérise des eaux riches en éléments nutritifs avec de fortes conductivités, donc polluées et salées avec un pH légèrement alcalin. Ces eaux favorisent la prolifération d'organismes halophiles, tels que des populations algales et le *Phragmites communis* traduit par la forte concentration de la chlorophylle a. Cette prolifération entraîne une diminution de la transparence (déterminée par la forte turbidité) et de l'oxygène dissous qui sont également des signes d'eutrophisation. L'évaluation du risque d'eutrophisation de ces eaux à partir de l'outil de diagnostic d'Ifremer (2000), montre que les eaux sont dans un état général mauvais, ce risque d'eutrophisation correspond respectivement à une hypereutrophisation et à une eutrophisation. Cette situation est le résultat d'une évolution chronologique d'une Sebkha naturelle alimentée par la remontée de la nappe phréatique très salée suite à son alimentation par les eaux usées urbaines épurées et de drainage de la cuvette de Ouargla. Cela a aidé à réduire la stérilité du milieu récepteur et à créer un environnement propice à l'établissement d'une avifaune et d'une flore, croissant sur les sols moins salés (Nader, 2014), à l'instar de toutes les zones humides situées dans le bas Sahara. Cependant, le rejet quotidien de grandes quantités d'eaux de drainage non traitées et d'eaux purifiées sans suppression de l'azote et du phosphore a entraîné l'eutrophisation du milieu.

Pour arrêter ce développement indésirable du lac, nous pourrions suggérer ce qui suit :

- . L'amélioration du processus de traitement des eaux urbaines et même de drainage pour réduire la concentration des nutriments.
- . Réguler l'utilisation des engrais par la sensibilisation des agricultures.

Chapitre V.

Effet des travaux d'évacuation **sur le niveau de la nappe phréatique**

Chapitre IX. Effet des travaux d'évacuation sur le niveau de la nappe phréatique

Les cartes piézométriques des années 1998, 2003, 2008, 2013, 2015 et 2019 sont présentées dans les figures 40, 41, 42, 43, 44 et 45.

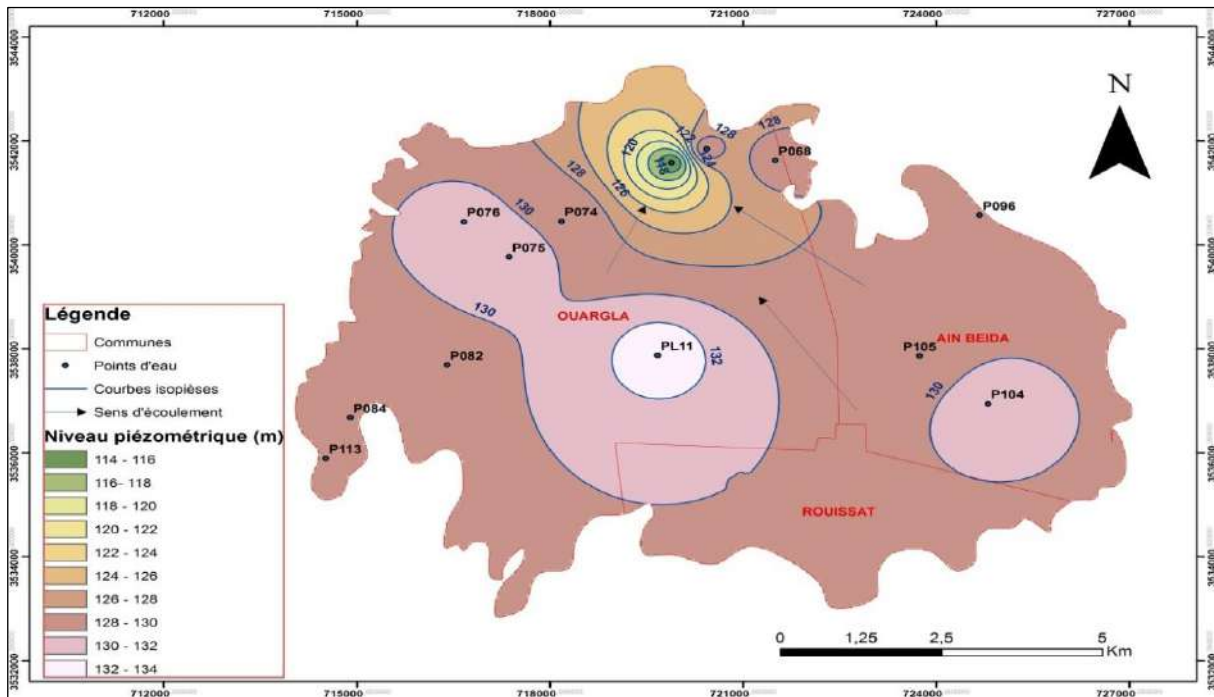


Figure 40. Niveau piézométrique de la nappe phréatique en 1998.

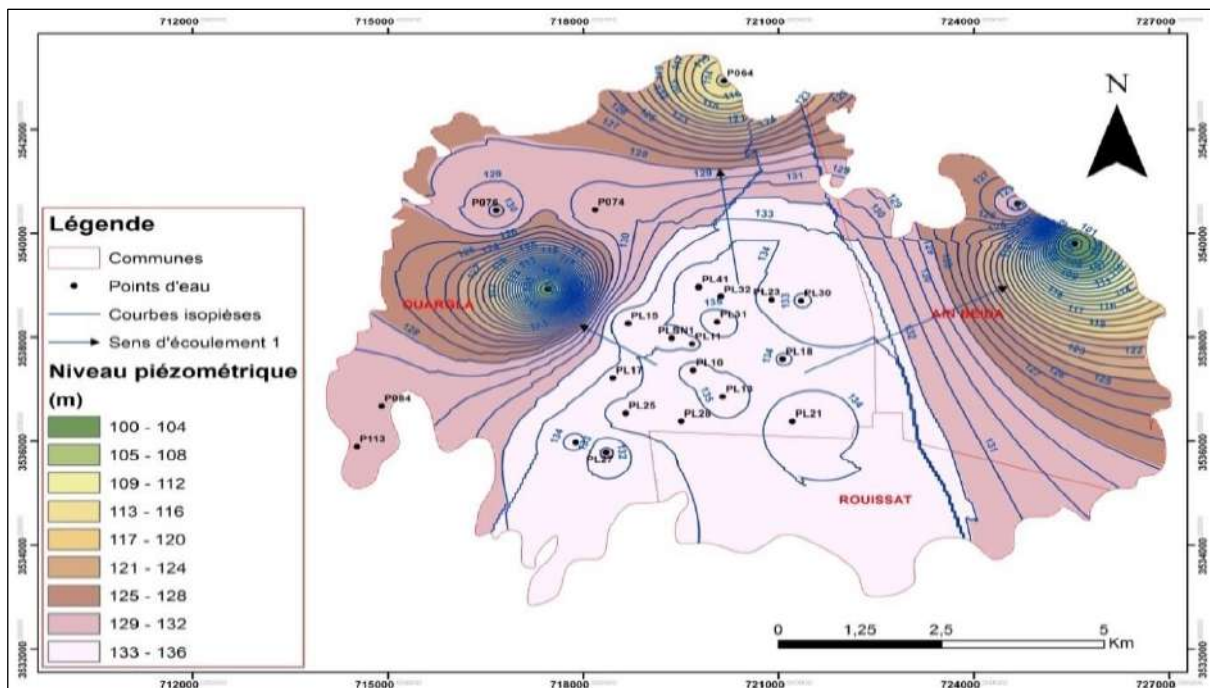


Figure 41. Niveau piézométrique de la nappe phréatique en 2003.

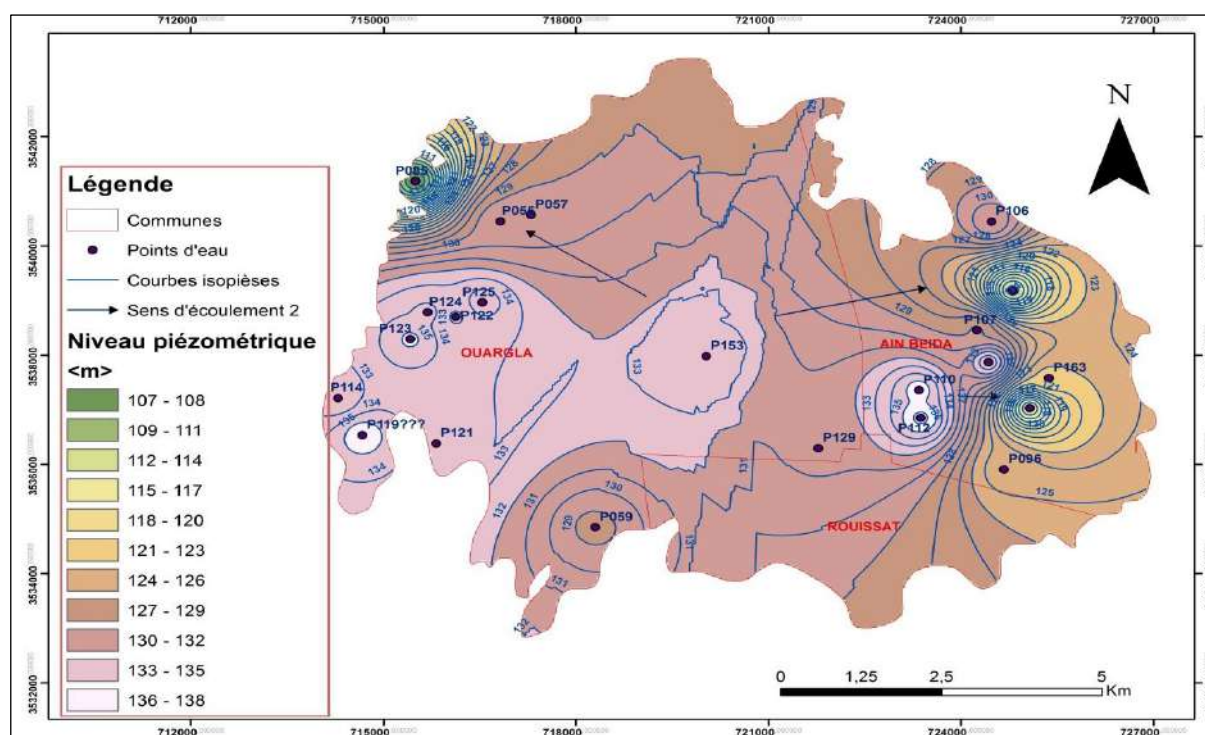


Figure 42. Niveau piézométrique de la nappe phrétique en 2008.

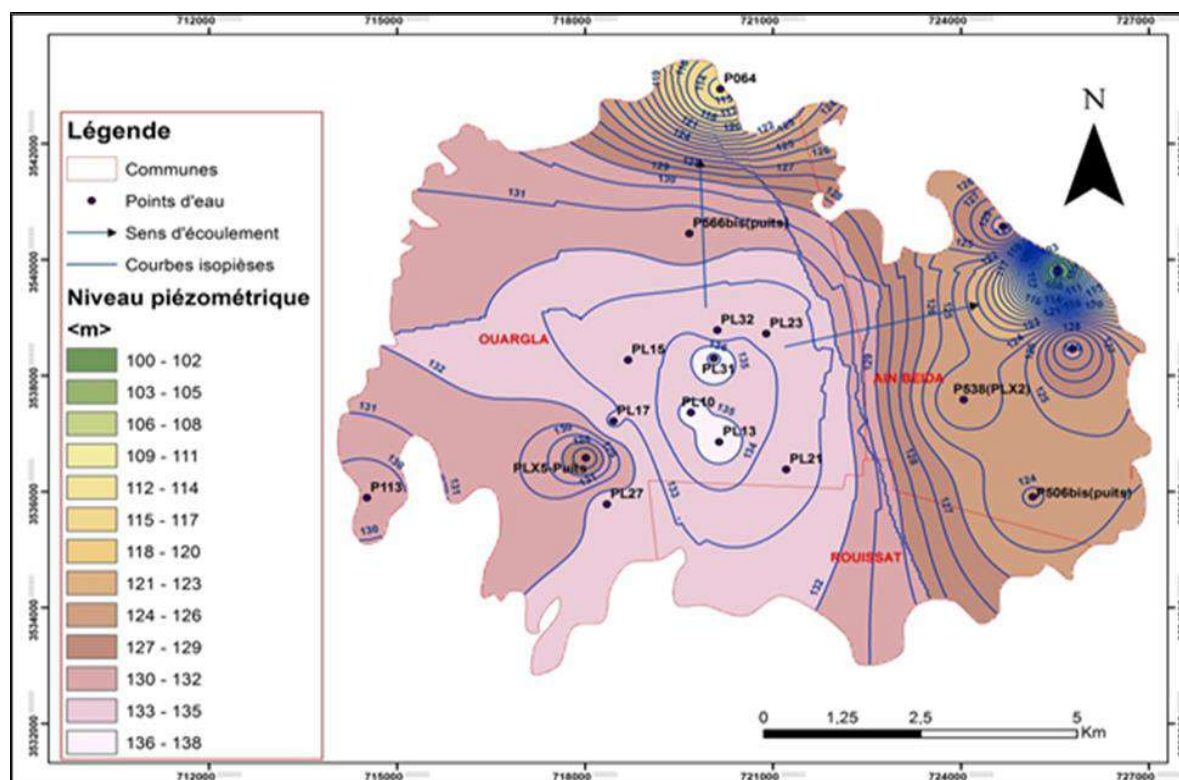


Figure 43. Niveau piézométrique de la nappe phrétique en 2013.

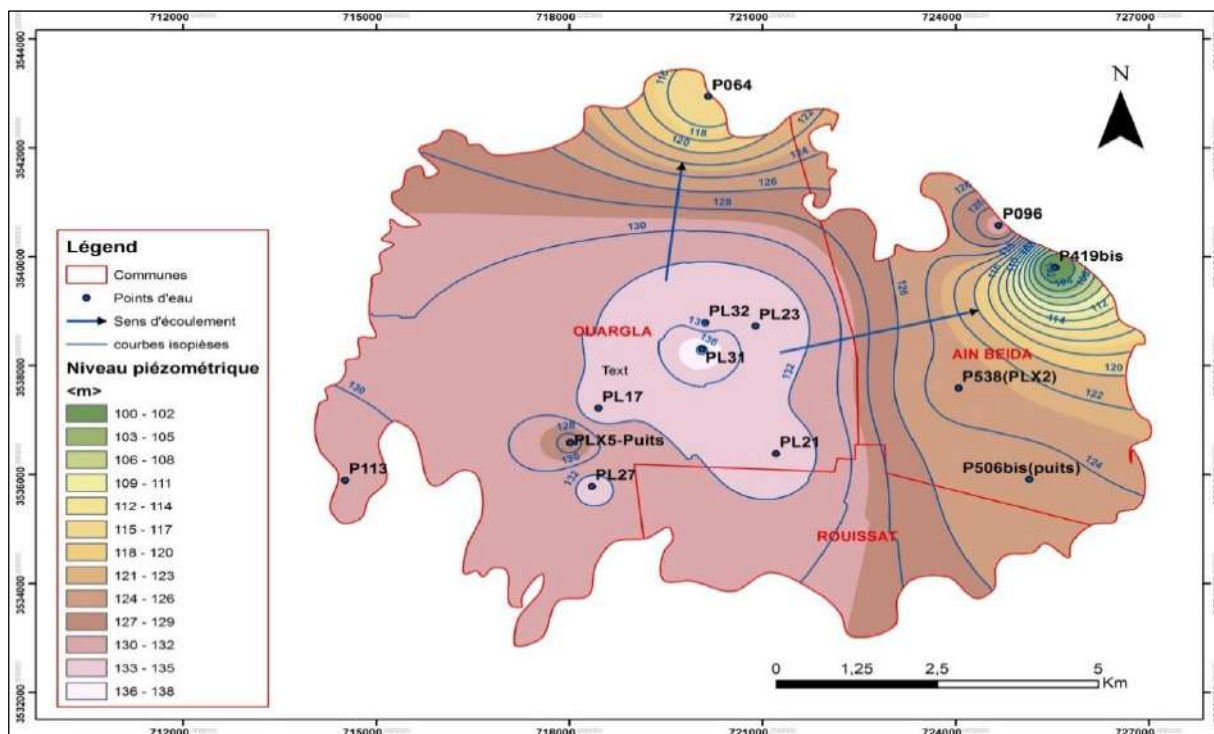


Figure 44. Niveau piézométrique de la nappe phréatique en 2015.

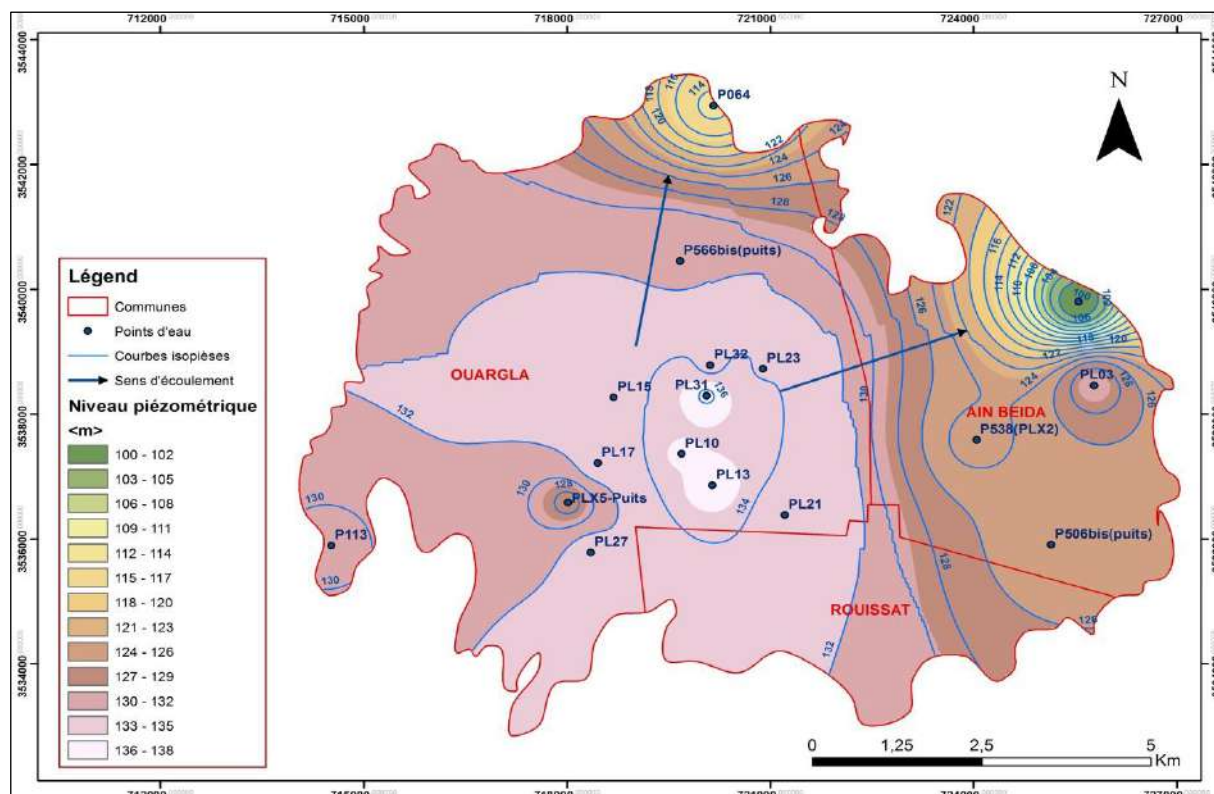


Figure 45. Niveau piézométrique de la nappe phréatique en 2019.

Les résultats obtenus ont montré que le niveau de la nappe phréatique avant et durant les travaux d'évacuation des excès en eau de la ville de Ouargla n'a pas varié dans un sens déterminé.

. Avant les travaux d'évacuation :

En 1998, les hauts niveaux piézométriques de la nappe sont situés au centre de la commune de Ouargla et au Sud de Ain Beida avec un niveau de 130 à 132m, alors que les zones restantes y compris la commune de Rouissat étaient caractérisées par un niveau inférieur (entre 128 et 130m), également considéré comme élevé, par rapport au niveau du sol (figure 39). La zone du bas niveau piézométrique est limitée au nord-ouest de la cuvette (entre 114 et 116m). Au cours de cette période, les points touchés par la remontée de la nappe phréatique coïncident avec les sites des anciennes palmeraies, de Chotts et même les cités voisines; précisément palmerais de Ksar, de Sidi Amrane, du Chott, de Bni Thour et Chott Ain Beida qui forme l'exutoire actuel des eaux drainages. Selon Amrani (2021), on rencontre ces cas d'hydromorphie dans les palmeraies situées près de la Sebkha du Chott, qui est le point le plus bas de la cuvette où s'accumulent les eaux résiduelles.

Sur la période entre 1998 et 2003 (Figure 41), l'observation des cartes piézométriques montre une remontée très nette du niveau piézométrique de la nappe au centre de la cuvette qui touche les trois communes avec des valeurs allant jusqu'à 136 mètres. En revanche, il existe des zones qui ont connu un rabattement de la nappe, à savoir le nord-est d'Aïn El Beida, le nord-ouest et le sud-ouest de la commune de Ouargla, où la baisse a atteint 100 m.

Entre 2003 et 2008 (Figure 42), les zones qui connaissent une remontée dans le niveau piézométrique sont le sud-ouest et le nord-Ouest au niveau de la commune de Ouargla. Dans cette période, le niveau a atteint 138 mètres, ce qui est plus élevé que les années précédentes.

Selon BG (2005), la répartition du volume quotidien atteignant la nappe phréatique pendant cette période est la suivante : 9000m³/jour grâce à l'assainissement autonome, 10000m³/jour à cause des fuites d'approvisionnement en eau potable, 71000m³/jour par le biais du drainage agricole, pour un total variant de 19000 à 90000m³/jour. Ce volume est chargé de générer les points d'altitude élevés sous les agglomérations et les palmeraies irriguées à partir du CT ou du CI. Le point culminant sous le centre culturel a été déterminé par le piézomètre PL31, avec une altitude de 135,2m. Ces informations concordent avec nos observations.

Selon les figures 40, 41 et 42, avant 2010, la situation de la ville qui alterne avec les palmeraies, à faible altitude avec l'énorme volume d'eaux résiduelles déversées directement dans la nappe phréatique, rend tous les points de la ville vulnérables par la remontée des eaux. Par conséquent, toute modification possible devient indispensable pour remédier à cette situation.

. Après les travaux d'évacuation :

Entre 2008 et 2013 (Figure 43), on observe un rabattement au niveau de la zone sud-ouest et nord-ouest de la cuvette. C'est l'influence de l'évacuation des eaux excédentaires hors de la cuvette. Idder et *al.* (2014) ont détaillé cela dans leurs recherches sur la situation de la cuvette suite aux mesures suggérées. Ils ont observé que, après un peu plus d'un an de fonctionnement, les effets bénéfiques des solutions mises en place dans le cadre du nouveau système de gestion des eaux usées commencent doucement à se manifester. Un rabattement du niveau de la nappe phréatique et une réduction de l'humidité dans certaines zones qui étaient perpétuellement hydromorphes ont été notés.

Entre 2013, 2015 et 2019 (Figure 43, 44 et 45), On remarque une stabilité du niveau piézométrique général, le niveau le plus élevé étant toujours 138m, enregistré au centre de la cuvette et le niveau le plus bas au nord-est et nord-ouest.

L'étude des cartes piézométriques nous a permis de constater que le sens d'écoulement des eaux est orienté suivant une direction générale ; de Sud vers le Nord-Ouest et le Nord-Est dans la nappe phréatique.

Donc, nous n'avons pas constaté de rabattement tangible et permanent du niveau de la nappe phréatique, tandis que l'étude réalisée par Miloudi (2019), dans la région de Oued Souf, qui souffre de la même problématique, a montré que les solutions entreprises par l'État ont eu des résultats positifs, où l'efficacité du réseau d'assainissement a été très importante, qui s'est manifestée par un changement de la qualité des eaux de la nappe phréatique, grâce à la mise en place d'un système de pompes successifs par les drains verticaux. Ce système a donné des résultats remarquables pour le rabattement du niveau des eaux de la nappe.

Par conséquent, à Ouargla, malgré les efforts de l'État pour éliminer cette problématique environnementale, il s'agit d'un problème qui ne peut être complètement résolu. Il faut donc le gérer. C'est ce qu'a confirmé l'étude réalisée par Abimouloud (2017), notamment, où il a mis en évidence que les parties enterrées des structures en béton construites dans cette région, telles que les fondations, les structures enterrées et les réseaux d'assainissement (conduites et regards), subissent constamment le problème de la remontée des eaux de la nappe phréatique. Il a donc cherché à établir une nouvelle composition qui permettrait d'atténuer l'impact des agents agressifs dissous et d'incorporer du sable de dune broyé comme matériau local pour améliorer la qualité du béton produit.

Conclusion

Conclusion

La station d'épuration des eaux usées urbaines de la ville de Ouargla, située dans le sud-est algérien et mise en service depuis Décembre 2008, procède à la purification des eaux grâce à un lagunage aéré. Les eaux épurées générées sont dirigées vers Sebkhet Sefioune, un site d'évaporation, situé à une quarantaine de kilomètres au Nord de cette station, grâce à un canal parallèle à celui qui est utilisé pour l'évacuation des eaux de drainage.

Durant ce travail, les démarches suivantes ont été effectuées :

- . Une tentative de connaître l'origine de la salinité des eaux usées traitées au niveau de cette station d'épuration a été entreprise en réalisant des analyses physico-chimiques de ces eaux à différents niveaux, suivant le sens de leur écoulement : Tout d'abord à l'arrivée des eaux à la station d'épuration (dans chacune des 6 canalisations qui amènent les eaux usées brutes à la station), ensuite au niveau du bassin de collecte des eaux usées brutes, situé à l'entrée de la station, et enfin après le traitement.
- . Un essai d'évaluer la distribution et le taux d'accumulation des boues produites par lagune, après 14ans d'exploitation sans maintenance. L'épaisseur de la couche de boues a été évaluée à divers endroits dans les lagunes pour mesurer leur accumulation. Il s'agissait de repérer les lagunes exigeant un enlèvement des boues et d'analyser leurs caractéristiques physiques, chimiques et biologiques afin de déterminer leur potentiel d'exploitation en agriculture.
- . Une recherche permettant d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux de Sebkhet Sefioune afin d'apprécier leur aptitude à l'eutrophisation. Trois stations différentes et de distribution significative ont été choisies pour apprécier l'état trophique du plan d'eau à travers trois campagnes de prélèvements. La première campagne s'est déroulée en février, lors de la saison des crues, qui coïncide avec le remplissage hivernal de la nappe phréatique. La seconde a eu lieu en avril et la dernière en août, durant la période de basse eau qui suit l'épuisement de la nappe. Les eaux ont été examinées en ce qui concerne les paramètres physico-chimiques suivants : pH, température, oxygène dissous, conductivité électrique, solides totaux dissous, turbidité, matières en suspension, azote total, nitrite, nitrate, ammonium, orthophosphate, phosphore total et chlorophylle a. L'état trophique de l'eau a été réalisé suivant la grille d'évaluation du risque d'eutrophisation pour la colonne d'eau, selon Ifremer (2000).
- . Et finalement, une évaluation de l'impact des opérations d'assainissement des eaux usées sur la variation temporelle du niveau de la nappe phréatique en comparant les cartes piézométriques de six campagnes de mesures réalisées en 1998, 2003, 2008, 2013, 2015 et 2019.

Les résultats indiquent :

. Les eaux épurées produites par la STEP de Ouargla se caractériser par une température inférieure à la valeur limite de rejet direct dans le milieu récepteur, un pH conforme aussi aux normes Algériennes de la réutilisation des eaux usées épurées en irrigation, tandis que la conductivité électrique enregistrée est largement supérieure aux limites d'irrigation Algériennes et de l'OMS. Le SAR calculé se caractérise par des valeurs variant entre 9,04 et 13,4, avec une moyenne de 12,38. Ces valeurs sont largement supérieures à 1,3 considérée comme valeur-limite de réutilisation des eaux usées épurées en irrigation (OMS). La quantité des ions ; chlorures, calcium, magnésium, sodium, potassium, ammonium, orthophosphates et sulfates dépasse les normes de l'irrigation de l'OMS. L'analyse statistique indique que les facteurs qui causent le problème de salinité des eaux incluent le chlorure, le sodium, les sulfates, le potassium et le magnésium. Le canal qui contribue le plus à l'apport de ces sels est le canal 1, qui est alimenté par la station de refoulement de route Ngoussa qui reçoit l'eau provenant de quatre stations de déminéralisation : Gherbouz, Mkhadma, Bamendil village et Bamendil'khefdji.

. Une distribution spatiale hétérogène des sédiments, avec une épaisseur variable dans les bassins étudiés, généralement la plus élevée à l'entrée du bassin. Dans la lagune F2, les boues représentent 26,74% du volume total, ce qui nécessite un dragage. De plus, un dragage est nécessaire dans les bassins A3, B2 et F2, où les hauteurs moyennes des boues dépassent 25 cm. Les taux d'accumulation annuels varient de 0,13 à 98 cm/an. Le taux d'accumulation moyen de la station de Ouargla est de 30,95 cm/an, soit 0,015 m³/EP/an. Les boues produites dans cette station sont sèches, ce qui fait du séchage solaire la méthode de traitement la plus efficace en raison des conditions climatiques favorables. Elles ont une faible fermentescibilité, contenant 2,58% d'azote et 0,55% de phosphore, ce qui peut améliorer la productivité des cultures. Les boues ont également de très faibles concentrations en métaux lourds, inférieures aux limites autorisées par les normes algériennes et AFNOR. De plus, elles sont exemptes de contamination fécale, notamment de streptocoques et de coliformes fécaux. Cependant, elles sont salées.

. Les eaux de sebkhet Sefioune présentent une température allant de 20°C à 35°C, un pH allant de 6,38 à 8,36, une salinité élevée avec une conductivité électrique supérieure à 17mS/cm et atteignant 53mS/cm en août, une concentration d'oxygène dissous allant de 1,4mg/l à 4mg/l, des niveaux élevés de matières solides dissoutes de 10000 à 31000 mg/l, et une concentration élevée de matières en suspension de 2500 mg/l à 6685,7 mg/l. Elles présentent aussi des concentrations élevées de substances azotiques et phosphoriques, ce qui les rend riches en nutriments. D'après le diagnostic de l'eutrophisation, ces eaux se trouvent dans un état eutrophe à hypereutrophe.

. Le niveau de la nappe phréatique avant et pendant les opérations d'évacuation de l'excès d'eau à Ouargla est resté stable, sans fluctuation notable. Entre 2013 et 2019, le niveau piézométrique global

se stabilise, avec un sommet toujours à 138 m, noté au cœur de la cuvette, tandis que le point le plus bas est observé au nord-est et au nord-ouest.

A la lumière de ces résultats, Il est recommandé :

- . La séparation des saumures, issues des stations de déminéralisation des eaux de consommation, des eaux usées urbaines. Ces saumures, au lieu d'être rejetées dans le réseau d'assainissement urbain, pourraient être directement évacuées vers les canaux de drainage agricole en direction de Sabkhet Safioune. La STEP pourrait, aussi, être équipée de technologies permettant l'élimination des sels. Cette dernière solution risque en revanche de se révéler très onéreuse.
- . La mise en place des systèmes de suivi plus réguliers pour anticiper les besoins de dragage. Par ailleurs, la réalisation de plus d'études sur la réduction de la salinité des boues est essentielle pour éviter les effets néfastes sur les sols agricoles. D'autres études sur la durabilité à long terme de l'utilisation des boues agricoles sont également nécessaires pour évaluer leurs impacts environnementaux. L'extension de l'étude à d'autres régions aux conditions climatiques similaires permettrait de généraliser ces recommandations.
- . L'amélioration du processus de traitement des eaux urbaines et même de drainage pour réduire la concentration des nutriments.
- . La régulation de l'utilisation des engrais par la sensibilisation des agricultures.
- . Il est admis que le phénomène de la remontée des eaux souterraines ne peut être stoppé. Cependant une adaptation à sa présence est envisageable en optimisant l'usage de l'eau aux niveaux domestique et agricole, notamment pour l'irrigation, et en concevant des bâtiments et des infrastructures routières résistants à la l'humidité.

Références bibliographiques

- **Ababsa, N., Kribaa, M., Addad, D., Tamrabet, L., Zidi, A., & Mansouri, D. (2013).** Évaluation de l'effet d'irrigation avec les eaux usées sur le comportement physique du sol. In Proceedings du Séminaire International sur l'Hydrogéologie et l'Environnement (SIHE 2013), Ouargla.
- **Abimouloud, Y. (2017).** Contribution à l'étude de l'effet de la remontée des eaux de la nappe phréatique de Ouargla sur le béton à base de matériaux locaux (Thèse de doctorat, Génie civil). Université d'El Oued.
- **ADE. (2015).** Rapport du projet « Étude, réalisation, exploitation et assistance pour la maintenance de neuf (09) stations de déminéralisation d'eau à Ouargla ». E.P. Algérienne des Eaux, Alger.
- **AMORCE. (2012).** Boues de station d'épuration : Techniques de traitement, valorisation et élimination. Série Technique DT 51, novembre 2012. https://www.pseau.org/outils/ouvrages/amorce_boues_de_step_techniques_de_traitement_valorisation_et_elimination_2012.pdf
- **Amrani, K. (2021).** Gestion de l'eau d'irrigation dans le Bas-Sahara algérien : cas de la palmeraie de Ouargla. Journée d'étude du 24 juin 2021 du CAREP Paris : Eau et agriculture dans le monde arabe.
- **Aussel, H., Galtier, Y., Puzin, M., & Causse, F. (2004).** Le point de connaissance sur le traitement des eaux usées. INRS, Paris.
- **Bonnard et Gardel. (2003).** Vallée d'Ouargla. Études sur l'assainissement des eaux usées, des eaux pluviales et de l'irrigation. Mesures supplémentaires pour lutter contre la montée des eaux souterraines (Mission III A : Collecte et analyse des données – Station d'épuration des eaux usées). Lausanne.
- **Behra, P. (2013).** Chimie et environnement. Dunod, Paris.
- **Belon, E. (2020).** Valorisation des ressources issues du traitement des eaux usées : Note de synthèse. ASCOMAD. <https://www.ascomade.org/wp-content/uploads/2020/05/Note-de-synthese-Valorisation-des-ressources-issues-du-traitement-des-eaux-usees.pdf>
- **Benhedid, H., Bensemaoune, Y., Daddi Bouhoun, M., Rezzag, A., & Geurbouz, F. (2018).** Impact des eaux usées épurées sur la qualité des sols en aval de l'oued M'zab. In Actes du Séminaire sur la gestion des sols et les problèmes posés.
- **Benoit, G., Dauphin, V., Ducrocq, T., Nougazol, S., & Salva, E. (2011).** Valorisation des eaux usées épurées pour l'irrigation. In Actes du séminaire Développement durable OIEau Engees, 35, 12–13.

- **Bensaad, A. (2013).** Ouargla. du vieux port transsaharien à la métropole. Encyclopédie berbère, (36), 5899–5911.
- **Bergeron, C., Dehays, H., & Pointet, T. (1983).** Remontée des nappes d’eau souterraine : causes et effets. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Département Eau.
- **Berland, J.-M., & Juery, C. (2002).** Les procédés membranaires pour le traitement de l’eau. Document technique FNDAE, 14.
- **Bertrand, F., Dunand, A., Fosse, J., Fradin, N., Liger, D., & Keck, G. (2004).** Les intoxications par les cyanobactéries. Point Vétérinaire, 35, 46–51.
- **Bonard et Gardel. (2005).** Étude d’assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d’irrigation. Mesure complémentaire de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Présentation à Ouargla, 12 décembre 2005.
- **Boumediene, M., Touzi, A., Bahiani, M., & Tareb, S. (2005).** Effet de l’application de boues résiduelles sur la croissance végétative et le rendement des cultures dans l’environnement saharien de l’Algérie. Institut National de Recherche Agronomique d’Alger, 16, 17–26.
- **Bouselsal, B., Medjani, F., Fenazi, B., & Belksier, M. S. (2016).** Qualité des eaux usées et possibilité de leur utilisation en agriculture : cas de la station de Kouinine (El Oued, SE Algérie). In Colloque International sur la Géologie du Sahara : Thème III Eau & Environnement. Université d’Ouargla.
- **Boutin, C., Héduit, A., & Helmer, J.-M. (2009).** Technologies d’épuration en vue d’une réutilisation des eaux usées traitées (REUT). Rapport ONEMA, CEMAGREF.
- **Carpier, H., Philippe, R., Berger, C., Bunel, F., Corvaisier, Y., Debrosse, F., ... Mercier, Y. (2013).** Guide méthodologique : Le curage des lagunes d’épuration. Agence de l’eau Loire-Bretagne. https://www.pseau.org/outils/ouvrages/ae_loire_bretagne_le_curage_des_lagunes_d_epuration_guide_methodologique_2013.pdf
- **Castany, G. (1982).** Bases de l’étude scientifique des eaux souterraines. Méthodes et techniques avancées. UNESCO, France.
- **CEAEQ. (2014).** Détermination de l’azote Kjeldahl total et du phosphore total. Digestion acide – Méthode colorimétrique automatisée (MA. 300 – NTPT 2.0, Rév. 2). Centre d’expertise en analyse environnementale du Québec. <https://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/MA300NTPT20.pdf>
- **CEAEQ. (2015).** Détermination de la conductivité. Méthode électrométrique (MA. 115 – Cond. 1.1, Rév. 1). Centre d’expertise en analyse environnementale du Québec. <https://www.ceaeq.gouv.qc.ca/methodes/pdf/methode-analyse-115-conductivite.pdf>
- **CEAEQ. (2023).** Détermination du pH. Méthode électrométrique (MA. 100 – pH 1.1, rév. 6). Direction générale de la coordination scientifique, Centre d’expertise en analyse

environnementale du Québec, Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). <https://www.ceaeg.qc.ca/methodes/pdf/methode-analyse-100-ph.pdf>

- **Cerra, I., Desagnat, M., Dubart, R., Juven, L., Zhou, N., & Ziani, H. (2014).** Traitement des boues des stations d'épuration des petites collectivités. Montpellier, France.
- **Charikh, M. (2023).** Étude de la perméabilité des sols de différents pédopaysages dans la région de Ouargla. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- **Cissé, B. (2012).** Les eaux de drainage des périmètres irrigués du delta du fleuve Sénégal : Systèmes d'évacuation et qualité des eaux. (Thèse de doctorat en hydrologie continentale, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2011). Physio-Géo. Géographie physique et environnement, 6, 7–8.
- **CNRS-CERR. (2000).** Les menaces et atteintes : Guide technique interagences – Les zones humides et la ressource en eau (Études sur l'eau n°89).
- **Côte, M. (1998).** Des oasis malades de trop d'eau ? Science et changements planétaires / Sécheresse, 9(2), 123–130.
- **Corriveau, J. (2009).** Étude des concentrations toxiques de nitrite dans les cours d'eau d'un bassin versant agricole. Institut National de la Recherche Scientifique (INRS), Canada.
- **CREL. (2009).** Trousse des lacs : Des outils pour la santé des lacs (2^e éd.). CRE Laurentides, 367 p.
- **Degron, R., Dupont, A., Dubreuil-Degortes, C., Cifres, E., & Bellières, S. (2024).** Dessalement en Méditerranée : Des mesures pour atténuer les risques et impacts environnementaux. Plan Bleu, Centre d'activités régionales du PNUE/PAM.
- **Déléry, L., & Bonnard, R. (2007).** Évaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues de stations d'épuration. Rapport d'étude 03-75-C, 93 p.
- **Deslongchamps, G., Caron, A., & Tremblay, J.-É. (2021).** Revue de littérature : L'eutrophisation en milieu marin. MELCC, Direction de la qualité du milieu aquatique (DQMA).
- **De Villers, J., Squilbin, M., & Yourassowsky, C. (2005).** Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface : Les données de l'IBGE – "L'eau à Bruxelles". Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement / Observatoire des Données de l'Environnement, 16 p.
- **Djidjel, M. (2008).** Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla (Sahara septentrional, Algérie). (Thèse de doctorat en hydrogéologie). Université d'Annaba, pp. 74–147.

- **DRIEE. (2020). Réalisation d'une étude d'impact environnemental.** ZAC Lallier, L'Haÿ-les-Roses – Analyse réglementaire sur l'eau. DRIEE Île-de-France, Service régional eau et milieux aquatiques, 48 p.
- **DataStream Initiative. (2021).** Un guide de surveillance de la qualité de l'eau. DataStream.org.
- **Dubost, D. (2002).** Écologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes. Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA), 423 p.
- **Dutil, P., & Samie, C. (1960).** Essai de bilan hydrologique du chott d'Ouargla (Sahara occidental). In Proceedings de l'Hydraulique Souterraine : Compte rendu des Sixièmes Journées de l'Hydraulique (pp. 28–30), Nancy, France.
- **Fabregas, J. (2021).** Traitement et réutilisation des eaux usées dans l'industrie textile. <https://sigmadafclarifiers.com/fr/tratamiento-y-reutilizacion-de-aguas-residuales-industria-textil/>
- **FAO. (2003).** L'irrigation avec des eaux usées traitées : Manuel d'utilisation. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO), Bureau régional pour le Proche-Orient et Bureau sous-régional pour l'Afrique du Nord.
- **Faurie, C. (2011).** Écologie : Approche scientifique et pratique (6^e éd.). Lavoisier.
- **FNAD. (2021).** Valorisation des boues d'épuration : Un enjeu collectif pour demain. Centre d'Information sur l'Eau, Fédération Nationale des Activités de Dépollution et de l'Environnement (FNADE). <https://www.fnade.org/ressources/pdf/2/3517-La-valorisation-des-boues-d-epurati.pdf>
- **Galvez-Cloutier, R., Ize, S., & Arsenault, S. (2002).** La détérioration des plans d'eau : Manifestations et moyens de lutte contre l'eutrophisation. Vecteur Environnement, 35(6), 18.
- **Garcier, R., & Bravard, J.-P. (2014).** Qu'est-ce qu'une oasis ? Réflexions géographiques sur un objet-limite. https://www.researchgate.net/publication/290435844_Qu'est-ce_qu'une_oasis_Reflexions_geographiques_sur_un_objet-limite
- **Gilli, E., Mangan, C., & Mudry, J. (2008).** Hydrogéologie (2^e éd.). Dunod.
- **Gouasmia, G., Amarouayache, M., Frihi, H., & Kara, M. H. (2016).** Caractérisation physico-chimique de trois lacs salés permanents de la vallée d'Oued Righ (Sahara septentrional, Algérie nord-est). Revue d'Écologie, 71(4), 330–341.
- **Gratziou, M., & Chalatsi, M. (2015, September 3–5).** Sludge accumulation and characteristics in a wastewater stabilization pond system in Vamvakofito - North Greece. In Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Science and Technology (Rhodes, Greece). Desalination and Water Treatment, February 2017. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.0256>

- **G.U.N.T. (2024).** Traitement de l'eau – Technologie durable pour la protection de l'environnement. Geratebau GmbH, Hanskampring 15–17, 22885 Barsbuettel, Allemagne.
- **Halimi, S., Zeghdani, Z., & Allaoui, A. (2018).** Aptitude des eaux épurées de la STEP de Khenchela à l'irrigation. *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement*, (3), 12.
- **Halitim, A. (1985).** Contribution à l'étude des sols dans les zones arides (plaines steppiques élevées de l'Algérie) : Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols [Thèse de doctorat]. Université de Rennes.
- **Hamdi-Aïssa, B. (2001).** Le fonctionnement actuel et passé de sols du Nord Sahara (Cuvette de Ouargla) : Approches micromorphologique, géochimique, minéralogique et variabilité spatiale.
- **Houari, I. M., Nezli, E., & Bouregaa, S. (2014).** Description géologique et géométrique des formations aquifères de la cuvette de Ouargla. *Algerian Journal of Arid Environment (AJAE)*, 4(1), 12–19.
- **Hudson, N. W. (1990).** Conservation des sols et des eaux dans les zones semi-arides (Vol. 57). Food & Agriculture Organization.
- **Huete, A. (1988).** A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- **IANOR. (2017).** Valorisation des boues d'épuration en agriculture. Norme algérienne NA 17731:2017, Édition 01. Office National de l'Assainissement (ONA).
- **Idder, A., Cheloufi, H., Idder, T., & Mahma, S. (2012).** Impact des boues résiduelles de la station d'épuration de Touggourt (Algérie) sur un sol sableux cultivé. *Algerian Journal of Arid Environment (AJAE)*, 2(1), 77–81.
- **Idder, T. (1998).** La dégradation de l'environnement urbain liée aux excédents hydriques au Sahara algérien : Impact des rejets d'origine agricole et urbaine et techniques de remédiation proposées : l'exemple de Ouargla [Thèse de doctorat]. Université d'Angers, France.
- **Idder, T. (2007).** Le problème des excédents hydriques à Ouargla : Situation actuelle et perspectives d'amélioration. *Sécheresse*, 18(3), 161–167.
- **Idder, T., Idder, A., & Mensous, M. (2011, 20–21 janvier).** Les conséquences écologiques d'une gestion non raisonnée des eaux agricoles dans les oasis du Sahara algérien : Cas de l'oasis de Ouargla. In *Colloque international : Usages écologiques, économiques et sociaux de l'eau agricole en Méditerranée : Quels enjeux pour quels services* (Atelier n°3, Université de Provence, Marseille).

- **Idder, T., Idder, A., Cheloufi, H., Benzida, A., Khemis, R., & Moguedet, G. (2013).** La surexploitation des ressources hydriques au Sahara algérien et ses conséquences sur l'environnement : Un cas typique, l'oasis de Ouargla (Sahara septentrional). *TSM – Techniques Sciences Méthodes*, (5), 31–39.
- **Idder, T., Idder, A., Tankari Dan-Badjo, A., Benzida, A., Merabet, S., Negais, H., & Serraye, A. (2014).** Les oasis du Sahara algérien, entre excédents hydriques et salinité : L'exemple de l'oasis de Ouargla. *Revue des Sciences de l'Eau*, 27(2), 155–164.
- **Ifremer, S. (2000).** Recueil des campagnes océanographiques françaises 1999.
- **ISO 6878. (2004).** Qualité de l'eau — Dosage du phosphore — Méthode spectrométrique au molybdate d'ammonium. [https://cdn.standards.iteh.ai/samples/ 36917/f0f3a05c014f4dcf8d_1001d84d92bd96/ISO-6878-2004.pdf](https://cdn.standards.iteh.ai/samples/36917/f0f3a05c014f4dcf8d_1001d84d92bd96/ISO-6878-2004.pdf)
- **ISO 11885. (2007).** Qualité de l'eau — Détermination de certains éléments par spectroscopie d'émission optique avec plasma à couplage inductif (ICP-OES).
- **ISO 5667-1. (2013).** Qualité de l'eau — Échantillonnage — Partie 1 : Guide sur la conception des programmes d'échantillonnage et des techniques d'échantillonnage (3e éd.). <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/2b14797a-9c5d-4210-8300-f93e3c2e197a/iso-5667-1-2020>
- **ISO 9308-1. (2014).** Qualité de l'eau — Détermination d'*Escherichia coli* et des bactéries coliformes — Partie 1 : Méthode de filtration sur membrane pour les eaux à faible teneur bactérienne.
- **Journal officiel de la République algérienne. (2012).** Arrêté interministériel du 8 Safar 1433 correspondant au 2 janvier 2012 fixant les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation (JO n°41 du 15 juillet 2012).
- **Karef, S., Boughalem, M., Aitnouh, F., Batana, F., Boujelben, N., Achak, M., ... Kettab, A. (2018).** Évaluation de la qualité des sous-produits de l'épuration pour usage en agriculture dans une région semi-aride en Algérie. *Proceedings of JIC2017, Journal Mauritanien de Chimie (J. Maurit. Chem. Soc.)*, 1, 12–20.
- **Keffala, C., Effebi, K. R., Ghrabi, A., Juspin, H., & Vassel, J.-L. (2011).** Évaluation des taux d'accumulation et de production de boue dans des bassins de stabilisation sous climat méditerranéen : Étude de cas en Tunisie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 24(1), 63–76.
- **Koull, N. (2017).** Atlas des zones humides du Bas Sahara (Algérie). Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides, Touggourt.
- **Koull, N., Kherraze, M., Lakhdari, K., Benzaoui, T., Helimi, S., Laouissat, M., ... Mimouni, F. (2013).** Eaux d'irrigation et salinisation des sols des périmètres irrigués dans la vallée de l'Oued Righ. *Journal Algérien des Régions Arides*, 12, 97–102.

- **Léger, C. (2003).** Vallée de Ouargla : Études d'assainissement des eaux résiduaires pluviales et d'irrigation, mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Mission III C – Étude d'impact sur l'environnement, analyse des impacts. Rapport technique, BG, Lausanne.
- **Marcel, C., & Pastor, F. (2013).** L'assainissement des eaux usées en agglomération parisienne : Principes et procédés. SIAAP.
- **Masmoudi, A. (2011).** Effet de la salinité des eaux et de la fréquence d'irrigation sur le sol et le végétal. Courrier du Savoir, 11, 61–69.
- **MECV & MDA. (1979).** Lagunage naturel et lagunage aéré : Processus de traitement des eaux usées pour les petites communautés. Étude inter-agences. Ministère de l'Environnement et de la Qualité de la Vie, Agence de l'Eau Loire-Bretagne, Ministère de l'Agriculture, Centre Technique de l'Ingénierie Rurale, de l'Eau et des Forêts. Paris. [https:// belinrae. inrae. fr/ doc_num.php?explnum_id=4184](https://belinrae.inrae.fr/doc_num.php?explnum_id=4184)
- **Mensous, M. (2011).** Étude du système de gestion des eaux usées dans la cuvette de Ouargla [Mémoire de magistère, Université Kasdi Merbah Ouargla].
- **Merabet, S. (2011).** Étude comparative de deux systèmes aquatiques dans le Sahara septentrional (Chott Merrouane et Ain El Beida) : Environnement et signes de dégradation [Mémoire de magistère, Université de Ouargla].
- **Miloudi, A. (2019).** Mécanismes et remèdes de la remontée des eaux dans la région d'Oued Souf : Impact sur l'environnement de la région [Mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla].
- **NA 752. (1989).** Qualité de l'eau — Détermination de la somme du calcium et du magnésium — Méthode titrimétrique à l'EDTA.
- **NA 1655. (1994).** Qualité de l'eau — Détermination du calcium — Méthode titrimétrique à l'EDTA.
- **NA 1653. (2013).** Qualité de l'eau — Détermination du sodium et du potassium — Méthode de spectrométrie d'émission de flamme.
- **Nader, A. (2014).** Eaux usées épurées de la cuvette de Ouargla: Gestion et risques environnementaux. Mémoire de Magister, Écologie saharienne et environnement, Université de Ouargla, 169p.
- **Nakib, M., Kettab, A., Tebbal, S., & Bouanani, H. (2013).** Étude du potentiel fertilisant des eaux épurées et des boues de la station d'épuration de Koléa (Algérie). 3ème Conférence internationale sur l'eau, Alger, 18-19 novembre 2013.

- **Negais, H., Idder, T., Cheloufi, H., Idder, A., & Ahmed Benmchi'h Ayada, S. (2021).** Feasibility study of the application of treated wastewater for the irrigation of forest species in a Saharan area. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, 8(3), 197-204.
- **Negais, H. (2024).** La réutilisation des eaux usées épurées et leur impact sur les cultures irriguées (cas de l'Oasis de Ouargla). Thèse de doctorat, Écologie saharienne et environnement, Université de Ouargla.
- **Noumon, C., Mama, D., Dedjiho, C., Agbossou, E., & Ibouraima, S. (2015).** Évaluation de la qualité physico-chimique et du risque d'eutrophisation de la retenue d'eau de Kogbétohouè (Sud-Bénin). *Journal of Applied Biosciences*, 85, 7848–7861.
- **OBVNEBSL. (2009).** Lac Salé. Organisme des Bassins Versants du Nord-Est du Bas-Saint-Laurent, 11p.
- **OMS. (2012).** L'utilisation sans risque des eaux usées, des excréta et des eaux ménagères. *Utilisation des eaux usées en agriculture*, 3, 1-219.
- **ONA. (2018).** Fiche technique des stations de lagunage aéré STEP Ouargla. Office National de l'Assainissement.
- **ONEMA. (2020).** L'épuration de l'eau. Les agences de l'eau, France. (https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/png/PNG%202011/10_fiche_epuration_de_l_eau_web.pdf).
- **ONM (Office National Météorologique). (2020).** Les données météorologiques de Ouargla.
- **Ounoki, S., & Achour, S. (2014).** Évaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux usées brutes et épurées de la ville d'Ouargla. Possibilité de leur valorisation en irrigation. *LARHYSS Journal*, P-ISSN 1112-3680 / E-ISSN 2521-9782(20).
- **Pinay, G., Gascuel, C., Menesguen, A., Souchon, Y., Le Moal, M., Levain, A., ... & Souchu, P. (2017).** L'eutrophisation : manifestations, causes, conséquences et prédictibilité. Synthèse de l'expertise scientifique collective CNRS-Ifremer-INRA-Irstea.
- **Planas, D., Vanier, C., & Laviortte, E. (2014).** Le programme de recherche sur les cyanobactéries au lac Bromont. Service aux collectivités, Université du Québec à Montréal, 53p.
- **Plassard, C., Robin, A., Le Cadre, E., Marsden, C., Trap, J., Herrmann, L., ... & Lardy, L. (2015).** Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol. *Innovations Agronomiques*, 43, 115-138.
- **Programme National de Transfert de Technologie en Agriculture (PNTTA). (2000).** Les engrais minéraux, caractéristiques et utilisation. Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA, N°72, septembre 2000.

- **Racault, Y. (1997).** Lagunage naturel : leçons tirées de 15 ans de pratique en France. Éditions Cemagref, 60p.
- **Racault, Y., & Boutin, C. (2004).** La lagune naturelle en France – État de l’art et tendances. Paris : Engineering Special No. p.77-86.
- **Rejsek, F. (2002).** Analyse des eaux : aspects réglementaires et techniques. CRDP, France, pp. 35-55.
- **Richer-Bond, M., & Genest, M. (2013).** Études d’eutrophisation 2009-2011, dans le cadre de la mise en œuvre du programme de protection des lacs. Service de l’urbanisme et de l’environnement (SUE), 40p.
- **Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2009).** L’analyse de l’eau – 10e édition. Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. DUNOD.
- **Roland, V. (2010).** Eau, environnement et santé publique (3e éd.). Lavoisier.
- **Rouvillois-Brigol, M. (1975).** Le pays de Ouargla (Sahara algérien) : variations et organisation d’un espace rural en milieu désertique.
- **Sahel, O. d. S. e. d. (2003).** Système aquifère du Sahara septentrional (SASS) : gestion commune d’un bassin transfrontière. Principaux résultats. [En ligne] : www.unesco.org/oss
- **S.C. (2015).** Recommandations pour la qualité de l’eau potable au Canada : le pH de l’eau potable. Santé Canada, document technique, 48p.
- **Slimani, R., Charikh, M., & Aljaradin, M. (2023).** Assessment of groundwater vulnerability to pollution in an arid environment. Archives of Environmental Protection, 49(2).
- **SMRA. (2018).** Et nos boues deviennent compostes. Syndicat Mixte Recyclage Agricole du Haut-Rhin, France.
- **Song, Q., Chen, X., Hua, Y., Chen, S., Ren, L., & Dai, X. (2023).** Biological treatment processes for saline organic wastewater and related inhibition mechanisms and facilitation techniques: a comprehensive review. Environmental Research, 239(Pt 1):117404. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117404>
- **Srivastava, A., Parida, V. K., Majumder, A., Gupta, B., & Gupta, A. K. (2021).** Treatment of saline wastewater using physicochemical, biological, and hybrid processes: insights into inhibition mechanisms, treatment efficiencies and performance enhancement. Journal of Environmental Chemical Engineering, 9(4):105775. <https://doi.org/10.1016/j.jece.105775>
- **STEP. (2017).** Données de l’analyse physico-chimique des eaux usées et épurées à la station d’épuration des eaux usées d’Ouargla. Office National de l’Assainissement (ONA), Direction des Opérations et de la Maintenance.

- **Strub, M.-P. (2012).** Normalisation eau/boues, synthèse des travaux 2011. Programme scientifique et technique, NERIS et Onema, 34p. https://www.aquaref.fr/system/files/IIIA01_DRC_12_118941_09084_VF.pdf
- **Talaboulma, R. (2018).** Recommandations pour l'utilisation des eaux usées épurées dans l'agriculture. ONID, Oran, 25p.
- **UNESCO. (1972).** **Projet ERESS** : Étude de ressource en eau du Sahara septentrional. Rapport sur les résultats du projet, UNESCO, Paris, 100p.
- **Volterra, L., & Boualam, M. (2003).** Eutrophisation et santé. Organisation Mondiale de la Santé, Bureau Régional de l'Europe, 32p. http://www.ssents.uvsq.fr/IMG/pdf/Eutrophisation_et_Sante_brochure_CE_OMS_11_2003FR.pdf
- **Vuillot, M., & Boutin, C. (1985).** Le fonctionnement des lagunes naturelles : un guide technique pour les petites collectivités. Irstea.
- **Xanthoulis, D., Tilly, J., Fonder, N., Wauthelet, M., Bergeron, F., Chengduan, W., ... & Brix, H. (2005).** Les techniques d'épuration des eaux usées à faibles coûts. Contrat VN/Asia-Link/012/(113128), 2008, 60p.
- **Yousefi, Z., Batabi, R., Ziaei Hezarjaribi, & Mousavi Nasab, N. (2023).** Survey on the quality of outlet biosolids and sludge heavy metals in the wastewater treatment plants of Mazandaran province. Environmental Health Engineering and Management Journal, 10(3):281-291. <https://doi.org/10.34172/ehem.2023.32>
- **Zaman, M., Shahid, S. A., & Heng, L. (2018).** Guideline for salinity assessment, mitigation and adaptation using nuclear and related techniques. Springer Nature.
- **Zeddouri, A., & Hadj-Saïd, S. (2011).** Effet de la salinité sur les propriétés géoélectriques des alluvions évaporitiques et qualité des eaux de la Sebkha de Bamendil, Ouargla, Sud-Est algérien. Journal of Hydrocarbons Mines and Environmental Research, 2(2), 160-166.
- **Zella, L., & Smadhi, D. (2006).** Gestion de l'eau dans les oasis algériennes. LARHYSS Journal, P-ISSN 1112-3680 / E-ISSN 2521-9782(5).
- **Wetzel, R. G. (1983).** Limnology. Michigan State University, Hickory Corners (USA), W.K. Kellogg Biological Station.

Annexes

Annexe 1. Liste des forages de la vallée de Ouargla (ANARH, 2022).

Cote Forage	NOM FORAGE	Année de réalisation	Long	Lat	Z	Profondeur (m)	Côte de abasse (m)	Côte de la croupe (m)	Niveau statique (m)	Débit m3/j	Débit exploité (l/s)	Abaissement (m)	Reduit sec (m³/j)	Année de mise en service	Utilisation	Matériau	Nappes
D1 F78	BAHMID I	1941	5°19'44"	31°57'51"	140	67	40.70	35		20	15	6.48	1788	1941	AEP	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F96	AIN EL KHEIR	1960	5°18'41"	31°57'28"	139	58.50	35.40	35.40	5.75	20	20	5.02	2864	1960	AEP	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F110	MATMORA AEP	1968	5°19'17"	31°57'32"	136	70	37.8	33.55	7.55	20	20	9.3	2324	1968	AEP	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F112	CHATEAU D'EAU Matmlour	1969	5°19'27"	31°57'27"	142	185	128	121.6	3.88	30	30	15	1612	1969	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F123	MEKHADMA AEP I	1977	5°18'47"	31°56'34"	139	200	129.6	120	5.14	20	20			1978	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F124	GHARBOUZ AEP I	1978	5°18'50"	31°57'47"	135	180.60	83	70	5.00	39	30	2.08		1982	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F128	LALA MIMOUNA AEP	1979	5°19'19"	31°57'20"	140	172	110	81.65	6	30	20	7.9	1900	1982	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F134	BOUR EL AICHA	1985	5°20'01"	32°01'29"	145	65	45	41	2.13	30	10	11.52	2000	1986	AEP	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F135	HASSI MILOUD	1985	5°17'56"	32°02'45"	136	120	100	94	14.49	20	10	23.12	2700	1986	AEP	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F137	JARDIN COMMUNAL	1989	5°19'54"	31°57'28"	140	188	109	103	10.40	40	30	8.80		1990	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F140	EL GARA AEP	1989	5°20'53"	31°57'28"	143	191	130	115	1.72	30	20	50.63	2100	1990	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F141	MEKHADMA II AEP	1989	5°18'47"	31°56'42"	55	37	31						3400	---	AEP	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F142	GHARBOUZ II AEP	1990	5°18'53"	31°57'33"	130	185	107	101	6.3	30	30	8.9	1950	1991	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F144	MEKHADMA AEP UNIV	1991	5°18'42"	31°56'36"	140	74	68	3.50	27	24	15.70	2800	1991	AEP	ETAT	SENONIEN	
D1 F145	BAHMID II APC	1991	5°19'37"	31°57'44"	166	101	89	10		20		84.08	2000	1993	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F149	IFTRI SELLIS	1992	5°20'17"	31°57'34"	141	180	99	93	6.80	30	20	13.89	2000	1993	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F151	IFRI	1995	5°20'21"	31°58'01"	176	106	96	9.15	30	20	2.55			1996	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F155	HADJI AEP Foundou	1998	5°19'07"	31°57'48"	119	200	110.00	102	9.86	38	30	33.8	1922	1998	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F156	EL RAHMA AEP	1998	5°18'58"	31°57'35"	180	79	73	12.22	50	40	1.01	1700	1998	AEP	ETAT	SENONIEN	
D1 F160	MEKHADMA Jandarmet	2003	5°18'24"	31°56'47"	179	103	93	6.3	30	25	17.03	2200	1999	AEP	ETAT	SENONIEN	
D2 F66	SAID OTBA AEP	1988	5°19'45"	31°58'46"	193	130	109			20	20			1990	AEP	ETAT	SENONIEN
D7 F4	BAMENDIL AEP	1982	5°17'04"	31°59'03"	144	131	102	94	14.48	30	20	3.68	1500	1983	AEP	ETAT	MIO-PLIOCENE
D7 F08	BAMENDIL AEP KH II	1997	5°15'31"	31°57'17"	176	110	93	87	45.83	13	8	34		1997	AEP	ETAT	MIO-PLIOCENE
D7 F09	EL KHAFFI III	2001	5°15'28"	31°57'22"	144	139	122	116	62	13		2300	---	AEP	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D7 F10	EL KHAFFI IV	2003	5°15'47"	31°57'30"	201	130	118	41.30	60		02.68			2003	AEP	ETAT	SENONIEN
D4 F95	A BENI THOUR AEP	1978	5°20'42"	31°56'37"	141	190	110	109	1.86	30	20	11.61		1979	AEP	ETAT	SENONIEN
D4 F105	A BENI THOUR AEP	1990	5°20'45"	31°56'37"	64	28	22			30	20			---	AEP	ETAT	MIO-PLIOCENE
D4 F110	SIDI BEN SASSI AEP	1998	5°21'06"	31°56'54"	130	190	100	100	4	42	40	11.35	2254	1999	AEP	ETAT	SENONIEN
D4 F111	AIN LOUISE II	1999	5°20'58"	31°57'05"	143	179	100	94	7.75	45		16.75		---	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F163	SIDI AMRANE	2008	5°18'23"	31°57'17"	129	160	95	90	8.5	25	20	14.4		2010	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F164	BOUAMEUR	2008			151	80	70	10	10.5	10	64			2010	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F165	HAI ENNASR 1	2011			262	172	166	84.54	20					2011	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F166	HAI ENNASR 2	2011			222	182	174	82.5	45					2011	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F167	LA SILICE	2011			104	61	56	12	49					2011	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F168	AIN EL KHEIR (BAAMER)	2011			171	110	105	29.95	30					2011	AEP	ETAT	SENONIEN
D7 F13	BAMENDIL VILLAGE	2011			176	142	117	22.31	30					2011	AEP	ETAT	SENONIEN
D2 F72	SAID OTBA	2011	5°20'55"	31°58'51"	183	115	111	10.06	40					2011	AEP	ETAT	SENONIEN
D1 F169	BOUGHOUFALA	2015			82	50	46	13.95	55	15.2				---	AEP	ETAT	
D1 F170	MEKHADMA SINTV	2015			142	105	94	12.8	14					---	AEP	ETAT	
D1 F91	SAR MEKHADMA	1954	5°18'17"	31°56'46"	123	197	102	70	0.62	30	20		1954	IRRI	ETAT	SENONIEN	
D1 F92	TALEB BOUHAFS	1955	5°17'57"	31°57'57"	70	52	57	1.6	30			2900	1960	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D1 F95	BAFAOU	1956	5°18'44"	31°58'45"	75	39	32.6	ART	30	20		2262	1960	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D1 F97	BABA AISSA	1961	5°19'05"	31°58'41"	130	80	51.38	40.68	1.7	20	15	6.45		1961	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F98	MERGOUB DJEDID	1961	5°18'27"	31°57'45"	121	80	42.21	35		25	20	7.41		1961	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F99	MERGOUB EL KEDIR I	1969	5°18'01"	31°57'20"	136	71	43.40	31.30	0.20	20	15	7.10		1961	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F100	DELABES	1963	5°19'11"	31°58'50"	80	43.82	39.68		25	20	5.92	4346	1963	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D1 F102	LA PISCINE	1961	5°19'52"	31°58'00"	64.50	34.30	25.30		15	12			1961	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D1 F104	BOUCHAIB	1962	5°19'01"	31°57'47"	60				20	20			1962	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D1 F106	KOUCHANE	1966	5°19'00"	31°58'52"	130	82.11	42.00	36.53	1.17	17	12	1.87	2800	1966	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F108	MERGOUB ELKEBIR 2	1966	5°18'10"	31°57'06"	120	70.60	32.00	26.00	0.80	20	20		1966	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D1 F109	BABA MERZOUG	1962	5°19'08"	31°58'34"	130	70			2.75	17	12		2100	1962	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F111	BABA YOCUF	1969	5°19'11"	31°57'55"	119	79	48	34.65		28	20	2.75	1700	1970	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F113	GARET CHEMIA	1970	5°17'37"	31°56'19"	188.48	141.09	141.09	3.80	25	20	21	2700	1970	IRRI	ETAT	SENONIEN	
D1 F116	OUTAADJA DJEDIDA	1970	5°18'48"	31°58'47"	130	92.71	54.42	46.18	1.84	30	20	9.00	3200	1970	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F117	MEGUERAOU	2003	5°18'06"	31°57'41"	127	79	42.00	36.00	0.70	30	20	4.88	2700	2003	IRRI	PRIVE	MIO-PLIOCENE
D1 F118	AIN EL BOUR	1971	5°17'59"	31°57'19"	125	68	42.71	37.74	2.23	25	20	5.6		1975	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F119	BEL GUETAIF 2	1973	5°17'55"	31°56'51"	65	35	30	2.34	30	20	22.85	3400	1975	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D1 F120	AIN DIABA II	1973	5°17'12"	31°56'52"	70	42	37	1.26	20	15	14.85	3800	1975	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D1 F121	AIN DIABA IV	1979	5°17'12"	31°57'02"	69	42	35.65	2.24	30	20	6.75	3800	1979	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D1 F125	BAB SBAA	1978	5°19'28"	31°58'31"	68	37	30	5.07	30	20	5.83		1980	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D1 F126	SAR MEKHADMA II	1979	5°18'38"	31°56'59"	127	69.10	36	30.04	4.94	29	20	5.51		1982	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F129	BEY BID	1982	5°19'15"	31°58'11"	125	70	37	20	4.13	30	20	6.11	1200	1983	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F130	NANOUDI	1982	5°19'18"	31°58'24"	72	33	22	3.6	30	20	7.11	2300	1983	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D1 F131	BELGUETAIF	1984	5°17'55"	31°56'42"	129	62	42	38	5.32	40	20	16.76	2600	1985	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F132	SIDI AMRANE	1984	5°17'52"	31°57'07"	129	62	32	30	5.05	40	20	9.14	2900	1985	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F133	BOUAMEUR	1985	5°18'50"	31°58'15"	58	43	37	5.5	40	20	10.5		1985	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D1 F136	OULALOU	1988	5°19'34"	31°58'30"	128	72	40	34	7.17	35	20	4.51	2700	1988	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F138	HASSI MILOUD	1989	5°42'00"	32°05'51"	120	68	55	49	ART	20	15	19.20	2200	1992	APFA	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F139	BOUR EL AICHA	1989	5°19'49"	32°01'35"	123	64	41	35	7.23	42	20	16.73	1700	1990	APFA	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F147	ABBAZAT	1994	5°15'11"	32°05'14"	124	145	62	56	19.08	23	20	25.47		---	APFA	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F152	HASSI MILOUD 4	1996	5°17'59"	32°04'34"	122	116	74	68	41.70	20	20	17.50		1996	APFA	ETAT	MIO-PLIOCENE
D1 F159	BEN ZID MAAMAR	1999			120					20				---	IRRI	PRIVE	MIO-PLIOCENE
D2 F11	A EL HADJAR	1955			63	50	50	0.44	12				1955	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D2 F12	A MEGSEMINE	1964	5°21'02"	31°58'46"	53.45	37	37		12				1911	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D2 F51	SELLIS Transat	1958	5°20'12"	31°58'55"	45	16	16		5.00	15	10		2328	1958	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D2 F52	TALEB BOUHAFS Temlaoui	1960	5°20'13"	31°58'02"	65	38.10	30		20	15	3.85		1960	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE	
D2 F53	A TASSE	1963	5°19'42"	31°58'52"	125	74	38	25.85	1.30	20	15	12.50	3330	1963	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D2 F54	A BANOUNOU	1966	5°19'32"	31°59'04"	126	80	42	35.91	2.55	20	20	3.55	3444	1967	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D2 F55	A MAHCENE I	1962	5°20'57"	31°57'57"	70				2.18	15	15			1963	IRRI	ETAT	MIO-PLIOCENE
D2 F56	A BAISSA	1962	5°20'10"	31°58'22"	123												

Annexe 2. Population de la wilaya de Ouargla (Direction du logement de la wilaya de Ouargla, 2021).

COMMUNES	POPULATION	Parc logt total	TOL
Ouargla	165 148	34 037	4,85
Rouissat	78 165	12 875	6,07
Sidi Khouiled	19 853	6 025	3,30
Hassi Ben Abdellah	7 485	5 716	1,31
Ain Beida	28 024	5 532	5,07
N'goussa	22 486	4 920	4,57
Hassi Messaoud	52 618	11 000	4,78
El Borma	8 612	1 620	5,32
TOTAL GENERAL	382 391	81 725	4,68

Annexe 3. Campagnes piézométriques de la nappe phréatique de Ouargla dans: 1998, 2003, 2008, 2013, 2015 et 2019 (ANARH, 2023).

Z (m)	Long.Tube (m)	Coordonnées UTM Clarke		Piézométrie 1994		Piézométrie 1998		Piézométrie 2003		Piézométrie 2008		Piézométrie 2013		Piézométrie 2015		Piézométrie 2019	
		X	Y	NS(m)	NPZ(m)	NS(m)	NPZ(m)	NS(m)/Sol	NPZ(m)	NS(m)/Sol	NPZ(m)	NS(m)/Sol	NPZ(m)	NS(m)/Sol	NPZ(m)	NS(m)/Sol	NPZ(m)
108.04	0.75	722310	3572455	1.5	Z-NS	0.93	Z-NS	0.83	Z-NS	0.86	Z-NS	0.88	Z-NS	0.87	Z-NS	0.87	Z-NS
110.52	0.83	721972	3570830	1.9	Z-NS	1.33	Z-NS	1.25	Z-NS	1.21	Z-NS	1.25	Z-NS	1.29	Z-NS	1.37	Z-NS
112.92	0.77	721440	3569350	2.3	Z-NS	1.79	Z-NS	1.78	Z-NS	1.73	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
113.86	0.57	720828	3567413	2.26	Z-NS	1.37	Z-NS	1.45	Z-NS	1.49	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
114.99	0.64	719365	3564579		Z-NS	1.33	Z-NS	1.52	Z-NS	1.35	Z-NS	1.53	Z-NS	1.51	Z-NS	1.63	Z-NS
116.55	0.6	718595	3562543		Z-NS	1.61	Z-NS	1.79	Z-NS	1.73	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
116.78	0.75	717702	3561017		Z-NS	0.75	Z-NS	0.80	Z-NS	0.79	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
118.33	0.85	717651	3559695		Z-NS	0.95	Z-NS	0.89	Z-NS	0.84	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
		718257	3558396		Z-NS		Z-NS	3.93	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
117.05	0.59	718556	3554396		Z-NS	1.33	Z-NS	1.21	Z-NS	1.01	Z-NS	1.06	Z-NS	1.11	Z-NS	1.27	Z-NS
		718592	3552751		Z-NS		Z-NS	0.38	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
		719283	3551773		Z-NS		Z-NS	0.40	Z-NS	0.31	Z-NS	0.35	Z-NS		Z-NS		Z-NS
	0.75	720535	3552018		Z-NS		Z-NS	1.59	Z-NS		Z-NS	1.19	Z-NS	1.2	Z-NS	1.01	Z-NS
		722147	3552156		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
117.62	0.45	715725	3560563		Z-NS		Z-NS	0.84	Z-NS	0.72	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
116.99	0.78	716534	3562429		Z-NS	0.9	Z-NS	0.96	Z-NS	1.07	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
	0.65	717663	3563267		Z-NS		Z-NS	1.24	Z-NS	1.2	Z-NS	1.25	Z-NS	1.21	Z-NS	1.32	Z-NS
		723768	3573275		Z-NS		Z-NS	0.97	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
105.64	0.73	723105	3574250	1.28	Z-NS	0.88	Z-NS	0.93	Z-NS		Z-NS	0.73	Z-NS	0.81	Z-NS	0.82	Z-NS
105.2	0.78	725670	3577505	1.93	Z-NS	1.18	Z-NS	1.42	Z-NS	1.33	Z-NS	0.89	Z-NS		Z-NS		Z-NS
104	0.35	721880	3577560		Z-NS		Z-NS	1.30	Z-NS	1.33	Z-NS	0.6	Z-NS	0.74	Z-NS		Z-NS
104	0.63	720116	3578111		Z-NS		Z-NS	1.30	Z-NS	1.29	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
104.37	0.64	725577	3580005		Z-NS	1.48	Z-NS	0.98	Z-NS	0.87	Z-NS	0.21	Z-NS		Z-NS		Z-NS
104.7	1	724991	3579056	2.06	Z-NS		Z-NS	1.48	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
104.72	0.9	724281	3577915	2	Z-NS	1.78	Z-NS	1.56	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
104.27		723648	3576809	1.8	Z-NS	0.94	Z-NS	1.16	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
	0.88	723341	3543870		Z-NS		Z-NS	1.38	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
106.13	0.88	722815	3574095	1.45	Z-NS	0.9	Z-NS	0.98	Z-NS	0.85	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
118.6	0.68	716404	3558846		Z-NS	0.89	Z-NS	0.95	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
117.83	0.63	716487	3569870		Z-NS	0.67	Z-NS	0.71	Z-NS	0.67	Z-NS	0.61	Z-NS	0.49	Z-NS	0.56	Z-NS
128.98		721335	3547251		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
118.37		716904	3556108		Z-NS	0.69	Z-NS	0.53	Z-NS		Z-NS	0.72	Z-NS	0.75	Z-NS	0.77	Z-NS
118.55		715928	3555997		Z-NS	0.76	Z-NS	0.62	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
		715696	3553674		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
119.36	0.85	717822	3557053		Z-NS	0.92	Z-NS	1.15	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
122.02	0.9	716536	3552141		Z-NS	2.32	Z-NS	2.28	Z-NS	2.45	Z-NS	2.86	Z-NS	2.77	Z-NS	2.85	Z-NS
123.94	0.86	716823	3551235		Z-NS	1.57	Z-NS	1.25	Z-NS	1	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
124.34	0.76	716966	3550240		Z-NS	2.54	Z-NS	2.70	Z-NS	2.25	Z-NS	3.42	Z-NS	3.81	Z-NS	3.77	Z-NS
125	0.65	717297	3549250		Z-NS	3.03	Z-NS	3.04	Z-NS	3.15	Z-NS	3.66	Z-NS	3.74	Z-NS	3.99	Z-NS
144	0.8	716529	354758		Z-NS		Z-NS		Z-NS	15.6	Z-NS	16.44	Z-NS		Z-NS		Z-NS
129	0.9	718302	3547523		Z-NS	10.98	Z-NS	11.39	Z-NS	11.47	Z-NS	12.17	Z-NS	12.03	Z-NS	12.11	Z-NS
115.02	0.69	720162	3542942		Z-NS		Z-NS	1.15	Z-NS	1.27	Z-NS	1.34	Z-NS	0.89	Z-NS	1.49	Z-NS
115.61	0.71	719889	3541575		Z-NS	0.97	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
130.34		720436	3541846		Z-NS	1.14	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
130.01		721498	3541623		Z-NS	1.13	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
114.56		718517	3543669		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
107.75		718672	3541939		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
131.43	0.8	718180	3540455		Z-NS	1.52	Z-NS	1.66	Z-NS	1.6	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
132		717366	3539770		Z-NS	0.96	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
131.03	0.93	716665	3540444		Z-NS	0.39	Z-NS	0.93	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
132.55	0.92	717422	3542258		Z-NS		Z-NS	1.67	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
103.82		717462	3538926		Z-NS		Z-NS	0.96	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
130.83		716401	3537688		Z-NS	0.98	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
131.41	0.8	714902	3536675		Z-NS	2.07	Z-NS	1.49	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
		715497	3537990		Z-NS	1.6	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
	0.65	722416	3541871		Z-NS	1.1	Z-NS	1.43	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
129.07	1.63	724432	3541387		Z-NS	0.89	Z-NS	0.60	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
130.02	0.89	724673	3540572		Z-NS	0.54	Z-NS	0.60	Z-NS	0.59	Z-NS	0.51	Z-NS	0.43	Z-NS		Z-NS
		728145	3539399		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
131.462		724804	3536945		Z-NS	0.81	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
130.68		723739	3537863		Z-NS	1.4	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
		724476	3534461		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
		724249	3533431		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
		723870	3532092		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
128	0.75	723386	3533946		Z-NS		Z-NS	2.73	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
		723345	3532836		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
		724430	3535000		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
135	1.04	723377	3534558		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
132.9	0.88	714520	3535893		Z-NS	3.62	Z-NS	3.73	Z-NS	3.62	Z-NS	3.42	Z-NS	3.46	Z-NS	3.4	Z-NS
135.51	0.8	714291	3534849		Z-NS		Z-NS	6.68	Z-NS	6.8	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
		714004	3533893		Z-NS		Z-NS	7.01	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
	1.04	713659	3532770		Z-NS	7.76	Z-NS	8.22	Z-NS	7.88	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
139.09	1.07	713242	3531742		Z-NS		Z-NS	9.81	Z-NS	9.66	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
137.69		714324	3531505		Z-NS	10.08	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS
136.23		714671	3532577		Z-NS	7.37	Z-NS	7.84	Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS		Z-NS

Annexe 4: Bilan de l'auto-surveillance des eaux de la STEP de Ouargla en 2017.

2017			MOIS											NADIA BOUIDIA	
			JANVIER	FEVRIER	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOÛT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE		DÉCEMBRE
PARAMÈTRES	VOLUME Du Mois	Entrée STEP (Eau brute)	903540,00	1028280,00	/	1177780,00	1204480,00	1176110,00	1235485,00	1211026,92	1275500,00	929030,00	1075530,00	1074520,00	1117389,27
		Sortie STEP (Eau épurée)	854670,00	952010,00	/	1095860,00	1118470,00	1091240,00	1189136,00	1129319,67	1185837,93	879930,00	1016760,00	956290,00	1042629,42
	DEBIT	Entrée STEP (Eau brute)	37647,50	42845,00	/	39259,33	40149,33	42003,93	39854,35	39065,38	42516,67	42228,64	35851,00	39797,04	40110,74
		Sortie STEP (Eau épurée)	35611,25	39667,08	/	36528,67	37282,33	38972,86	38359,23	36429,97	39527,93	39969,55	33892,00	35418,15	37423,55
	MES	Entrée STEP (Eau brute)	106,33	181,00	204,66	123,50	157,67	124,00	183,33	112,50	109,00	91,00	180,00	385,00	163,17
		Sortie STEP (Eau épurée)	57,67	57,33	68,33	51,00	78,67	73,50	72,00	65,67	69,00	67,67	39,00	76,00	64,65
		Rendement	45,76	68,33	66,61	58,70	50,10	40,73	60,73	41,63	36,70	25,64	78,33	80,26	54,46
	DCO	Entrée STEP (Eau brute)	313,33	297,00	284,00	304,00	314,33	353,33	387,50	359,00	324,00	262,93	460,00	447,00	342,20
		Sortie STEP (Eau épurée)	80,00	93,67	110,20	93,55	137,80	109,40	109,15	102,87	109,07	100,73	102,73	95,20	103,70
		Rendement	74,47	68,46	61,20	69,23	56,16	69,04	71,83	71,35	66,34	61,69	77,67	78,70	68,84
	DBO5	Entrée STEP (Eau brute)	85,00	120,00	101,66	100,00	126,67	136,67	115,00	160,00	153,33	195,00	290,00	230,00	151,11
		Sortie STEP (Eau épurée)	10,00	16,67	36,00	26,00	35,00	42,50	40,00	58,67	44,00	28,00	97,00	38,00	39,32
		Rendement	88,24	86,11	64,59	74,00	72,37	68,90	65,22	63,33	71,30	85,64	66,55	83,48	74,14
	NNH4	Entrée STEP (Eau brute)	/	/	/	/	25,40	29,20	31,75	24,20	30,40	30,60	36,80	33,40	30,22
		Sortie STEP (Eau épurée)	/	/	/	/	29,60	27,80	24,92	25,20		29,80	35,40	38,20	30,13
		Rendement	#VALEUR!	#VALEUR!	#VALEUR!	#VALEUR!	-16,54	4,79	21,51	-4,13	100,00	2,61	3,80	-14,37	12,21
	NNO2	Entrée STEP (Eau brute)	0,1150	/	0,1190	/	0,1080	0,1440	0,1470	0,0620	0,1300	0,2040	0,2300	0,2440	0,15
		Sortie STEP (Eau épurée)	0,0330	/	0,0760	/	0,0460	0,0960	0,1850	0,0500	0,0860	0,0420	0,0380	0,0840	0,07
		Rendement	71,30	#VALEUR!	36,13	#VALEUR!	57,41	33,33	-25,85	19,35	33,85	79,41	83,48	65,57	45,40
	NNO3	Entrée STEP (Eau brute)	0,2200	/	0,2300	/	0,1820	0,1140	0,6950	0,2100	0,5880	0,8960	0,6600	0,8920	0,47
		Sortie STEP (Eau épurée)	0,0300	/	0,1300	/	0,1520	0,2540	0,3200	0,1200	0,4220	0,4180	0,3720	0,1100	0,23
		Rendement	86,36	#VALEUR!	43,48	#VALEUR!	16,48	-122,81	53,96	42,86	28,23	53,35	43,64	87,67	33,32
	NT	Entrée STEP (Eau brute)	/	/		/	35,40	52,60	68,50	48,60	10,70	96,40	48,20	67,20	53,45
		Sortie STEP (Eau épurée)	/	/		/	91,60	65,20	66,25	42,80	32,60	60,00	41,80	86,00	60,78
		Rendement	#VALEUR!	#VALEUR!	#DIV/0!	#VALEUR!	-158,76	-23,95	3,28	11,93	-204,67	37,76	13,28	-27,98	-43,64
	P-PO4	Entrée STEP (Eau brute)	/	/	/	/	3,28	3,54	2,80	2,20	0,33	/	4,48	4,46	3,01
		Sortie STEP (Eau épurée)	/	/	/	/	2,16	1,11	2,28	2,14	2,76	0,778	0,704	3,30	1,90
		Rendement	#VALEUR!	#VALEUR!	#VALEUR!	#VALEUR!	34,15	68,64	18,57	2,73	-736,36	#VALEUR!	84,29	26,01	-71,71
	PT	Entrée STEP (Eau brute)	/	/	/	/	4,48	4,50	2,98	2,66	3,54	3,84	3,62	5,44	3,88
		Sortie STEP (Eau épurée)	/	/	/	/	3,40	2,62	2,82	2,66	3,04	2,60	2,50	3,38	2,88
		Rendement	#VALEUR!	#VALEUR!	#VALEUR!	#VALEUR!	24,11	41,78	5,37	0,00	14,12	32,29	30,94	37,87	23,31
	O2 dissous	Entrée STEP (Eau brute)	1,12	0,64	0,64	1,11	0,70	0,47	0,30	0,26	/	0,59	1,08	0,93	0,71
		Sortie STEP (Eau épurée)	7,85	3,34	3,01	2,82	1,99	1,02	1,21	1,00	/	1,39	2,87	1,88	2,58
	SAL	Entrée STEP (Eau brute)	15,05	9,38	8,87	8,46	9,21	7,50	9,22	13,03	9,41	10,14	13,86	15,42	10,79
		Sortie STEP (Eau épurée)	8,35	8,87	7,18	8,08	8,99	8,70	8,95	9,62	8,96	8,96	10,87	12,70	9,19
	CE	Entrée STEP (Eau brute)	24788,18	13739,50	14789,03	13935,19	15649,14	12986,84	14249,47	20950,91	16019,05	16895,00	23186,32	24800,00	17665,72
		Sortie STEP (Eau épurée)	14517,73	14438,50	11985,19	13856,90	15282,14	14871,05	15156,32	16213,18	15,20	15287,27	18463,16	21340,00	14285,55
	T	Entrée STEP (Eau brute)	20,06	21,99	23,38	25,27	28,26	30,92	31,18	31,82	30,08	28,54	23,37	20,13	26,25
		Sortie STEP (Eau épurée)	12,46	15,42	19,06	21,21	25,38	27,44	28,71	28,84	25,96	23,62	17,89	13,73	21,64
	PH	Entrée STEP (Eau brute)	7,36	7,35	7,37	7,89	7,70	7,54	7,58	7,31	7,45	7,52	7,58	7,37	7,50
		Sortie STEP (Eau épurée)	7,49	7,45	7,43	7,56	7,97	7,93	8,12	7,99	7,66	7,64	7,53	7,26	7,67