

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

N° d'enregistrement :/.....



THESE

Présentée pour l'obtention du Diplôme de
Doctorat ès Sciences
En sciences agronomiques

**Contribution à l'étude des impacts de la
réutilisation agricole des eaux usées épurées sur la
nappe phréatique : cas de la région de Ouargla**

Par :

BOUHANNA Amal

Soutenue publiquement le : 01/07/2021

Devant le jury :

Jury	Nom et prénom	Grade	Etablissement
Président	CHELOUFI Hamid	Professeur	Université de Ouargla
Directeur de thèse	DADDI BOUHOUN Mustapha	Professeur	Université de Ouargla
Co-directeur de thèse	IDDER Mohamed Tahar	Professeur	Université de Ouargla
Examineur	BENBRAHIM Fouzi	M.C.A.	Ecole Normale Supérieure de Ouargla
Examineur	BENHADDYA Mohammed Lamine	D.R	CRSTRA Tougourt
Examinatrice	KOUL Naima	M.R.A.	CRSTRA Tougourt

Année universitaire : 2020 / 2021

***Dédicaces et
Avant-propos***

Dédicace

À

Mes chers parents

À

Mon cher Epoux

Et

À

Toute ma famille et mes proches

Anaël

Avant-propos

Tout est bien, qui finit bien.

**Merci Allah (mon dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve.
Elhamdou li'ellah**

Je commencerai évidemment par présenter mon immense gratitude et mes remerciements les plus sincères à M. le professeur **DADDI BOUHOUN Mustapha**, Enseignant-chercheur au Département des Sciences Agronomiques, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université KASDI Merbah Ouargla, d'avoir proposé et dirigé ce travail, Je lui atteste ma profonde gratitude pour son encadrement, ses encouragements, ses conseils, ses orientations et surtout sa patience. Je n'oublierai jamais mon Co-promoteur le Professeur **IDDER Tahar** pour son soutien indéfectible et sa présence attentionnée durant tous les moments difficiles.

Mes sincères remerciements vont aussi à Monsieur **CHELLOUFI Hamid** pour m'avoir honoré de par sa présence en présidant de jury de soutenance de mon Doctorat.

Aux Messieurs et Dame, les membres de jury, **BENBRAHIM Fouzi**, **BENHADDYA Mohammed Lamine** et **KOUL Naima**, pour avoir accepté de se déplacer et venir examiner et scruter de si près le contenu de ce travail.

Mes remerciements vont aussi A. **M. CHAABNNA Ahmed**, maitre-assistant à l'Université KASDI Merbah Ouargla pour son aide, son appui, et son important apport dans la réalisation et la finalisation de ce document.

Mes remerciements à Monsieur **DJIDEL Mohammed**, maitre-assistant, au Département de Géologie Université de KASDI Merbah Ouargla, pour son aide précieuse afin de finaliser ce travail.

Je n'oublie pas toutes les personnes du laboratoire **CRSTRA Touggourt.**, le laboratoire physico-chimique de l'**ADE** et le laboratoire **LAC BOUBLEL**.

Je saisis cette occasion pour exprimer mon profond respect et ma reconnaissance à l'ensemble des enseignants du **Département des Sciences Agronomiques** de l'Université KASDI Merbah Ouargla, pour avoir participé à ma formation.

Enfin, que tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, soient assurés de ma profonde gratitude.

Amal

Résumés

Résumé

Contribution à l'étude des impacts de la réutilisation agricole des eaux usées épurées sur la nappe phréatique : cas de la région de Ouargla

Notre travail a porté sur l'étude des impacts de la réutilisation agricole des eaux épurées dans la cuvette d'Ouargla sur les eaux de la nappe phréatique. Une étude comparative a été menée entre parcelles irriguées conventionnellement, parcelles non irriguées et autres irriguées avec des eaux non conventionnelles au niveau d'un périmètre de mise en valeur. Notre approche d'investigations administratives et sur le terrain, ainsi que l'étude expérimentale sur la pollution des eaux phréatiques nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

Les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette recherche montrent que la nappe phréatique dans la zone d'étude est peu profonde inférieure à 3m, excessivement salée ($94,10 \pm 15,29$ mS/cm) et peu alcaline ($7,70 \pm 0,09$). Toutefois, elle présente une pollution organique modérée à forte ($1,5 < \text{IPO} < 3,5$). Parallèlement, l'irrigation par les eaux épurées a influé l'augmentation de concentrations des germes microbiens des eaux phréatiques ($35,6 \cdot 10^2$ germes/100ml), ainsi que ses teneurs en métaux lourds notamment le cadmium ($0,213$ mg/l).

Au stade de cette étude, nous avons constaté que les eaux épurées posent quelques problèmes d'ordre physique, physico-chimique, chimique et biologique pour les eaux phréatiques. La valorisation de ces eaux non conventionnelles traitées en agriculture nécessite une législation particulière qui prend en considération les particularités sanitaires et environnementales à Ouargla. Toutefois, la réutilisation des eaux épurées est recommandée pour combler le déficit hydrique après l'amélioration de leur qualité notamment par voie biologique.

Mots clés : Eaux épurées, agriculture, Nappe phréatique, Ouargla, Sahara.

ملخص

مساهمة في دراسة آثار إعادة الاستخدام الزراعي لمياه الصرف الصحي المعالجة على المياه الجوفية بورقلة

ركز عملنا على دراسة آثار إعادة الاستخدام الزراعي للمياه المعالجة في حوض ورقلة على المياه الجوفية. أجريت دراسة مقارنة بين أراضي زراعية مسقية بالمياه العادية، أراضي زراعية غير مسقية وأخرى مسقية بالمياه المعالجة على مستوى محيط استصلاح زراعي. سمح لنا نهج الدراسة المتبع من خلال التحقيقات الإدارية والميدانية وكذلك الدراسة التجريبية حول تلوث المياه الجوفية بالتوصل إلى بعض الاستنتاجات.

تظهر النتائج الرئيسية التي تم الحصول عليها كجزء من هذا البحث أن منسوب المياه في منطقة الدراسة ضحل يقل عن 3م، شديد الملوحة ($94,10 \pm 15,29 \text{mS/cm}$)، و ليس قلويًا ($7,70 \pm 0,09$). ومع ذلك، فيوجد به تلوث عضوي يتراوح بين المعتدل إلى العالي ($1,5 < \text{IPO} < 3,5$). في الوقت نفسه، فقد أثر الري بالمياه المعالجة على زيادة تركيزات الجراثيم الميكروبية في المياه الجوفية (معدل $35,6 \times 10^2 \text{germes/100ml}$) وكذلك مستويات المعادن الثقيلة، لاسيما الكاديوم ($0,213 \text{mg/l}$).

لاحظنا في هذه المرحلة من الدراسة، أن استخدام المياه المعالجة أدى لحدوث بعض التغيرات الفيزيائية، الفيزيو-كيميائية، الكيميائية والبيولوجية للمياه الجوفية. من جهة أخرى، فإن تسمين هذه المياه المعالجة الغير تقليدية في الزراعة يتطلب تشريعاً خاصاً يأخذ بعين الاعتبار الخصائص الصحية والبيئية المتوفرة في ورقلة. مع ذلك، فإن إعادة الاستخدام الزراعي لهذه المياه المعالجة بهدف تكملة النقص في المورد المائي طريقة يوصي بها الخبراء بشدة، شريطة المرور على مرحلة يتم فيها تحسين جودتها، لاسيما بواسطة الوسائل البيولوجية.

الكلمات المفتاحية: المياه المعالجة، الزراعة، المياه الجوفية، ورقلة، الصحراء.

Abstract

Contribution to the study of the impacts of the agricultural reuse of treated wastewater on the groundwater in Ouargla

Our work focused on the study of the impacts of the agricultural reuse of the treated water on groundwater in Ouargla basin. A comparative study was conducted between plots irrigated conventionally, no irrigated and irrigated with unconventional water at an agricultural perimeter. Our approach of administrative and field investigations as well as the experimental study on groundwater pollution allowed us to make some conclusions.

The main results obtained in this research shows that the groundwater in the study area is shallow at 3m, excessively salty ($94,10 \pm 15,29 \text{mS/cm}$) and not very alkaline ($7,70 \pm 0,09$). However, it presents moderate to high organic pollution ($1,5 < \text{IPO} < 3,5$). At the same time, irrigation with treated wastewater has influenced the increase in the concentrations of microbial germs in groundwater ($35,6 \times 10^2 \text{germes/100ml}$) as well as the levels of heavy metals, particularly cadmium ($0,213 \text{mg/l}$).

At the stage of this study, we found that treated water poses some physical, physico-chemical, chemical and biological problems for groundwater. The valorization of these unconventional waters in agriculture requires a particular legislation which takes into sanitary and environmental repercussions in Ouargla. However, the reuse of treated water is recommended to make up the water deficit after the improvement of their quality, particularly by biological means.

Keywords: Treated wastewater, agriculture, Groundwater, Ouargla, Sahara.



Listes

A horizontal scroll with a light beige background and a dark brown border. The scroll is partially unrolled, with the left and right edges showing the rolled-up sections. The word "Listes" is written in a bold, black, italicized serif font in the center of the unrolled portion. A soft grey shadow is cast beneath the scroll.

Liste des figures

Figure 1. Limites géographiques de la Wilaya de Ouargla (D.P.A.T. 2019)	8
Figure 2. Environnement de la cuvette de Ouargla (I.G.N., 1960 in Daddi Bouhoun, 2010)	9
Figure 3. Diagramme ombrothermique de Gaussen de la région d'Ouargla	13
Figure 4. Climmagrame d'Emberger de la région de Ouargla	14
Figure 5. Coupes transversales et longitudinales de la cuvette de Ouargla (Rouvellois-Brigol, 1975).	18
Figure 6. Cadre géologique du bas Sahara (Guendouz et <i>al.</i> , 2003 in Slimani, 2016).....	21
Figure 7. Relief géologique de la région de Ouargla Superposition de la carte géologique de G. Busson au MNT (d'après Djidel, 2008).....	22
Figure 8. Carte de risque salinisation de la cuvette de Ouargla (Hamdi-Aïssa et Girard, 2000).....	27
Figure 9. Coupe hydrogéologique synthétique de Sahara septentrional (UNESCO. 1972).	32
Figure 10. Zone d'étude	59
Figure 11. Modèle de profil réalisé	66
Figure 12. Méthode de recherche et dénombrements des coliformes fécaux et totaux, Streptocoque fécaux et totaux au laboratoire de la Prévention de Ouargla.....	79
Figure 13. Composition du périmètre au début de l'essai	86
Figure 14. Composition du périmètre à la fin de l'essai.....	86
Figure 15. Variation temporelle du pH et conductivité des eaux	97
Figure 16. Variation temporelle de la charge cationique des eaux d'irrigation.....	99
Figure 17. Variation temporelle de la charge anionique des eaux d'irrigation	102
Figure 18. Variation temporelle des polluants minéraux des eaux d'irrigation	105
Figure 19. Faciès chimique des eaux d'irrigation selon le diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF.	110
Figure 20. Faciès géochimique des eaux d'irrigation selon le diagramme de Piper	111
Figure 21. Classification de l'US Salinity Laboratory des eaux d'irrigation	112
Figure 22. Classification des eaux d'irrigation selon le diagramme de Willox.....	113
Figure 23. Variation du niveau statique de la nappe phréatique en Hiver 2015.....	119
Figure 24. Variation du niveau statique de la nappe phréatique en Hiver 2017.....	120
Figure 25. Variation du niveau statique de la nappe phréatique en Hiver 2018.....	121
Figure 26. Variation du niveau statique de la nappe phréatique en Hiver 2019.....	122
Figure 27. Variation du niveau statique de la nappe phréatique en Été 2015	123
Figure 29. Piézométrie de la nappe phréatique en Hiver 2015.....	126
Figure 30. Piézométrie de la nappe phréatique en Hiver 2017.....	127
Figure 31. Piézométrie de la nappe phréatique en Hiver 2018.....	128
Figure 32. Piézométrie de la nappe phréatique en Hiver 2019.....	129
Figure 33. Piézométrie de la nappe phréatique en Été 2015	130
Figure 34. Piézométrie de la nappe phréatique Été 2019	131
Figure 35. Variation de pH des eaux phréatiques des eaux phréatiques entre 2015-2019	133
Figure 36. Variation de pH des eaux phréatiques pendant les périodes des hautes eaux	134
Figure 38. Variation moyenne de la salinité des eaux de la nappe phréatique entre 2015-2019.....	139
Figure 39. Variation moyenne de la Salinité des eaux pendant les périodes des hautes eaux.....	140
Figure 43. Variation spatiotemporelle de l'oxygène dissous des sites non irrigués	142
Figure 44. Variation spatiotemporelle de l'oxygène dissous des sites irrigués par les eaux épurées.....	142
Figure 46. Variation moyenne de Calcium des eaux phréatiques entre 2015-2019.....	144
Figure 47. Variation moyenne de Calcium pendant les périodes des hautes eaux	144
Figure 49. Variation moyenne de Magnésium des des eaux phréatiques entre 2015-2019.....	146

Figure 51. Variation moyenne de Magnésium pendant les périodes des hautes eaux.....	147
Figure 52. Variation moyenne de sodium des eaux phréatiques entre 2015-2019.....	148
Figure 53. Variation moyenne de sodium pendant les périodes des hautes eaux	149
Figure 54. Variation moyenne de sodium pendant les périodes des basses eaux.....	149
Figure 55. Variation moyenne de potassium des eaux phréatiques entre 2015-2019	150
Figure 56. Variation moyenne de potassium pendant les périodes des hautes eaux	151
Figure 57. Variation moyenne de potassium pendant les périodes des basses eaux	151
Figure 61. Variation moyenne de bicarbonates des eaux phréatiques entre 2015-2019.....	155
Figure 62. Variation moyenne de bicarbonates pendant les périodes des hautes eaux	155
Figure 64. Variation moyenne de sulfates des eaux phréatiques entre 2015-2019	157
Figure 65. Variation moyenne de sulfates pendant les périodes des hautes eaux	157
Figure 66. Variation moyenne de sulfates pendant les périodes des basses eaux	157
Figure 67. Variation moyenne de la sodicité des eaux phréatiques.....	158
Figure 70. Variation moyenne d'ammonium des eaux phréatiques entre 2015-2019.....	164
Figure 73. Variation moyenne de nitrites des eaux phréatiques entre 2015-2019.....	165
Figure 74. Variation moyenne de nitrites pendant les périodes des hautes eaux	165
Figure 75. Variation moyenne de nitrites pendant les périodes des basses eaux	166
Figure 76. Variation moyenne de nitrates des eaux phréatiques entre 2015-2019.....	167
Figure 77. Variation moyenne de nitrates pendant les périodes des hautes eaux.....	168
Figure 78. Variation moyenne de nitrates pendant les périodes des basses eaux.....	168
Figure 79. Variation moyenne de Phosphate des eaux phréatiques entre 2015-2019.....	171
Figure 80. Variation moyenne de phosphate pendant les périodes des hautes eaux	172
Figure 81. Variation moyenne de phosphate pendant les périodes des basses eaux	171
Figure 82. Variation spatiale de DBO ₅ et DCO des sites irrigués par les eaux épurées.....	171
Figure 83. Variation spatiale de DBO ₅ et DCO des sites irrigués par les eaux conventionnelles	172
Figure 84. Variation spatiale de DBO ₅ et DCO des sites non irrigués.....	172
Figure 85. Variation d'indice de pollution organique des eaux étudiées	173
Figure 86. Variation spatiale de l'IPO des eaux phréatique	175
Figure 87. Variation d'indice de biodégradabilité des eaux étudiées.....	176
Figure 88. Variation spatiale de l' d'indice de biodégradabilité des eaux phréatique.....	177
Figure 89. Variation spatiale d'indice de qualité microbiologique des eaux phréatiques	185

Liste des tableaux

Tableau I. Données climatiques de la région de Ouargla entre 2002 et 2019 (O.N.M., 2019).....	10
Tableau II. Besoins théoriques en eau d'irrigation de quelques cultures (Bouhanna, 2014)	11
Tableau III. Population de la cuvette de Ouargla (D.P.A.T., 2019).....	15
Tableau IV. Débits des eaux potables exploitées et les eaux quantités des eaux de rejets	41
Tableau V. Longueur de réseau d'assainissement et taux de raccordement de la cuvette de Ouargla (D.P.A.T, 2019).....	42
Tableau VI. Caractéristiques hydo-chimiques de la nappe phréatique dans la zone de Said Otba entre 1996 et 2013	60
Tableau VII. Classes d'indice de biodégradabilité.....	80
Tableau VIII. Classes d'indice de pollution organique.....	80
Tableau IX. Classes de pollution microbiologique selon Bovesse et Depelchin, 1980 in Djidel et al., 2008.....	81
Tableau X. Calcul des doses pratiques réelles dans les stations d'études.....	91
Tableau XI. Résultats des calculs des besoins théoriques en eau d'irrigation	93
Tableau XII. Récapitulatif du Bilan hydrique dans la zone d'étude	94
Tableau XIII. Estimations de l'infiltration efficace dans le périmètre.....	95
Tableau XIV. Propriétés physico-chimique des eaux d'irrigation.....	96
Tableau XV. Résultats de la densité des germes bactérienne des eaux d'irrigation	114
Tableau XVI. Concentrations de quelques métaux lourds dans les eaux phréatiques	178
Tableau XVII. Densité bactérienne des eaux phréatique de la zone d'étude en Décembre 2018	180

Liste des photos

Photo 1. Affleurement des eaux usées dans la ville de Ouargla et Ain-Baida (Février 2020).....	43
Photo 2. Etapes de traitement des eaux usées dans la station d'épuration de Ouargla	55
Photo 3. Modalité des sites dans la zone d'étude (A. Irriguées par les eaux épurées ; B. périmètre agricole irriguées par les eaux conventionnelles ; C. Station non cultivés; D. Pompage des eaux épurées du canal)	58
Photo 4. Morphologie du sol	61
Photo 5. Flore de des palmeraies.....	63
Photo 6. Station abandonné irriguées par les eaux usées épurés.....	63
Photo 7. Etapes de réalisation et installation des piézomètres	67
Photo 8. Echantillonnage des eaux.....	72
Photo 9. Spectrophotomètre d'absorption atomique	77

Liste des abréviations

CE : Conductivité des Eaux

D.P.A.T : Direction de **P**lanification et de l'**A**ménagement du **T**erritoire

DBO₅: la **D**emande **B**iochimique en **O**xygène 5 jours.

DCO : **D**emande **C**himique en **O**xygène

EC : Eaux **C**onventionnelle

EH (Equivalent Habitant) : notion utilisée pour exprimer la charge polluante d'un effluent par comparaison avec celle d'un habitant.

EUE, EUT : Eaux Usées Traitées

FAO : Food and Agricultural Organisation (Organisation des Nations Unies Pour l'Alimentation et l'Agriculture)

L.A.C : Laboratoire d'**A**nalyses et de **C**ontrôle

MES : les matières en suspension

O.N.M : Office National de **M**étéorologie

OMS : **O**rganisation Mondiale de la Santé

REUE : Réutilisation des eaux usées épurées

STEP : Station d'épuration

NC / SNI : Sites non cultivé et non irrigué

Liste des annexes

- Annexe 1. Classes retenues pour la description des faciès géologiques (U.N.E.S.C.O., 1972).
- Annexe 2. Description géologiques et hydrogéologique de la région (Djidel, 2008)
- Annexe 3. Carte piézométrique de la nappe phréatique Novembre 1998 (Chachoua, 2008)
- Annexe 4. Carte piézométrique de la nappe phréatique Avril 2002 (Bonnard et Gardel, 2003)
- Annexe 5. Carte piézométrique de la nappe phréatique Novembre 2003 (Bonnard et Gardel, 2004)216
- Annexe 6. Carte piézométrique de la nappe phréatique Novembre 2007 (Slimani, 2016)
- Annexe 7. Récapitulatif de principales voies de traitements des eaux usées et des boues
- Annexe 8. Recommandations microbiologiques de l'OMS 1989 pour les eaux usées destinées à l'irrigation (O.M.S., 1989)
- Annexe 9. Recommandations microbiologique pour la REUE en agriculture (Journal Officiel de la République Algérienne, 2012)
- Annexe 10. Recommandations physico-chimiques pour REUE en agriculture (Journal Officiel de la République Algérienne, 2012)
- Annexe 11. Valeurs mensuelles de radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère (Iga) et durée mensuelle du jour (H) pour la latitude nord 32° (Ollier et Poiree, 1983).
- Annexe 12. Coefficients cultureux des cultures (Doorenbos et Pruitt, 1975).
- Annexe 13. Tableaux de MAC GRADY pour le calcul de l'NPP dans la dilution (3 tube/dilution) (Norme ISO 7218 :1996(F)
- Annexe 14. Guide et interprétation de la qualité des eaux d'irrigation (Ayers, 1977 in Daddi Bouhoun, 1997)
- Annexe 15. Directives de la F.A.O. (1974) concernant la qualité physicochimique des eaux destinées à l'irrigation (Tamrabet, 2011).
- Annexe 16. Classification des eaux d'irrigation selon leurs conductivités électriques (Durand, 1983)
- Annexe 17. SAR et degré d'alcalinisation des sols (Servant, 1975).
- Annexe 18. Liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées (Journal Officiel, 2012).
- Annexe 19. Hydrochimie de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla d'après ANRH entre 2010 et 2014
- Annexe 20. Analyse Factorielle Discriminante (AFD) avec XLSTAT 2014.5.03
- Annexe 21. Synthèse des comparaisons multiples par paires (Newman-Keuls (SNK))
- Annexe 22. Qualité physicochimique des eaux phréatiques par site dans le périmètre agricole Nord de la STEP de Ouargla Sid Otba (entre 2015-2019)
- Annexe 23. Variation spatiotemporelle moyens de la qualité physicochimique des eaux phréatiques dans le périmètre agricole Nord de la STEP de Ouargla (entre 2015-2019)

Table des matières

N°	Titre	Page
	Introduction générale	1
	<i>Chapitre I. Cadre d'étude</i>	
	Introduction	7
1.	Cadre géographique	7
2.	Cadre climatologique	9
2.1.	Température :	10
2.2.	Précipitations	12
2.3.	Vents	12
2.4.	Humidité	12
2.5.	Evaporation :	12
2.6.	Insolation :	12
2.7.	Classification climatique de la région	13
2.7.1.	Diagramme d'ombrothermique du Gaussen et Bangauls	13
2.2.2.	Climmagrame d'Emberger	13
3.	Cadre démographique	15
4.	Cadre géologique	19
4.1.	Etude stratigraphique à l'échelle régionale	19
4.2.	Litho-stratigraphie à l'échelle locale	21
4.3.	Tectonique	23
5.	Cadre Hydrographique	23
5.2.	Oued N'sa	23
5.3.	Oued M'zab	24
5.4.	Les crues	24
6.	Cadre pédologique	25
6.1.	Ressources édaphiques à l'échelle du Bas-Sahara	25
6.2.	Ressources édaphiques de Ouargla	25
6.3.	Impact du climat sur les sols	28
6.4.	Effet de la géologie sur les sols de la région	28
	<i>Chapitre II. Ressources en eau et risque de pollution</i>	29
1.	Quelques Définitions	29
2.	Ressources en eau à échelle mondiale	30
3.	Ressources en eau en Algérie	30
4.	Ressources en eau de la cuvette de Ouargla	31
4.1.	Nappe du Continental intercalaire	31
4.2.	Nappes du Complexe terminal	32
4.2.1.	Nappe du Miopliocène (nappe des sables) :	32
4.2.2.	Nappe du Sénonien (nappe des calcaires) :	32
4.3.	Nappe phréatique	33
4.3.1.	Nappe phréatique de la région d'étude	33
4.3.2.	Piézométrie et fluctuation de la nappe phréatique	34
4.3.3.	Vulnérabilité de la nappe phréatique vis-à-vis la pollution	34

5.	Ressources en eau non conventionnelles	35
5.1.	Epuration des eaux usées à l'échelle mondiale	36
5.2.	Epuration des eaux usées à l'échelle national	37
5.3.	Gestion des eaux non conventionnelles à Ouargla	37
5.3.1.	Période antérieur	37
5.3.2.	Périodes postérieur	39
5.3.3.	Etude critique de la gestion des eaux résiduaires	41
	Chapitre III. Réutilisation agricole des eaux épurées	44
1.	Cadre réglementaire	45
1.1.	Réglementation moniale	46
1.1.1.	Normes de réutilisation OMS et Californiennes	46
1.1.2.	Recommandation USEPA	46
1.2.	Réglementation algérienne	47
2.	Bienfaits et défauts de la réutilisation des eaux épurées	47
3.	Réutilisation des eaux usées en Algérie	48
4.	Agriculture de la cuvette de Ouargla	49
4.1.	Agriculture Oasienne	49
4.2.	Agriculture de Mise en valeur	49
5.	Réutilisation des eaux épurées à Ouargla	50
Conclusion		51
	Chapitre IV. Matériels d'étude	53
1.	Choix de la région d'étude	53
2.	Choix de la zone d'étude	53
3.	Présentation des sites d'études	53
3.1.	Présentation de la station d'épuration	53
3.2.	Procédé de traitement des eaux usées	54
3.3.	Gestion de la station d'épuration de Ouargla	56
3.4.	Présentation de périmètre agricole	57
3.4.1.	Situation géographique	57
3.4.2.	Choix des sites d'étude	58
3.4.4.	Gestion des exploitations	61
3.4.5.	Gestion de l'irrigation	62
3.4.6.	Biodiversité du périmètre d'étude	62
3.4.7.	Impact des eaux usées épurées sur le sol agricole	63
	Chapitre V. Méthodes d'étude	65
1.	Approche méthodologique	65
1.1.	Situation actuelle de périmètre	65
1.2.	Etude de la gestion des eaux d'irrigation	68
1.3.	Etude d'impact de l'irrigation par les eaux épurées sur la nappe phréatique	71
1.4.	Interprétation des résultats	73
1.5.	Recommandations d'aménagements	73
2.	Méthodes des analyses	74
2.1.	pH des eaux:	74
2.2.	Conductivité Electrique	74

2.3.	Oxygène dissous	75
2.4.	DCO	75
2.5.	DBO ₅	75
2.6.	Sodium et potassium	75
2.7.	Calcium et Magnésium	75
2.8.	Chlorures	75
2.9.	Bicarbonates	76
2.10.	Sulfates	76
2.11.	Nitrates	76
2.12.	Ammonium	76
2.13.	Phosphates	76
2.14.	Nitrite	76
2.15.	Métaux lourds	76
2.16.	Analyses bactériologiques	77
2.17.	Indices de pollution	80
	Chapitre VI. Situation actuelle du périmètre agricole	83
	Introduction	83
1.	Investigations administratives	83
2.	Gestion de l'espace agraire	84
3.	Gestion de l'exploitation	85
3.1.	Activité de l'exploitant	85
3.2.	Gestion de l'irrigation-drainage	85
3.2.1.	Eaux d'irrigations valorisées	85
3.2.2.	Système d'irrigation	86
3.3.3.	Durée d'irrigation	87
3.4.	Gestion de la fertilisation	87
3.5.	Obstacles physiques	88
3.6.	Commercialisation	88
4.	Contraintes de la REUE en agriculture	88
4.1.	Contraintes naturelles	88
4.2.	Contraintes institutionnelles	89
4.3.	Contraintes socioéconomiques	89
4.4.	Autres contraintes	89
	Conclusion	90
	Chapitre VII. Gestion des eaux d'irrigation	91
	Introduction	91
1.	Etude quantitative des eaux d'irrigation	91
2.	Paramètre du bilan hydrique	94
3.	Etude qualitative des eaux d'irrigation	95
3.1.	pH des eaux	96
3.2.	Salinité des eaux	97
3.3.	Dureté des eaux	98
3.4.	Cations solubles	99
3.4. 1.	Sodium	99

3.4. 2.	Calcium	100
3.4. 3.	Magnésium	100
3.4. 4.	Potassium	101
3.5.	Anions solubles	102
3.5. 1.	Chlorure	102
3.5. 2.	Sulfates	103
3.5. 3.	Bicarbonates	103
3.6.	Sodicité des eaux d'irrigation	104
3.7.	Pollution minérale des eaux d'irrigation	104
3.7. 1.	Ammonium	104
3.7.2.	Nitrates	105
3.7.3.	Nitrites	106
3.7.4.	Phosphates	106
3.8.	Métaux lourds	107
3.8.1.	Chrome	107
3.8.2.	Plomb	107
3.8. 3.	Cuivre	108
3.8. 4.	Cadmium	108
3.8. 5.	Fer	108
3.8. 6.	Cobalt	108
3.9.	Pollution organique des eaux	108
3.10.	Faciès géochimique des eaux	109
3.10. 1.	Selon Schoeller-Berkaloff	109
3.10. 2.	Selon PIPER	110
3.11.	Classification des eaux	111
3.12.	Microbiologie des eaux d'irrigation	113
Conclusion		116
Chapitre VIII. Impact des eaux épurées sur la nappe phréatiques		117
Introduction		117
1.	Variation de niveau de la nappe	117
1.1.	Niveau statique	117
1.2.	Piézométrie de la nappe phréatique	125
2.	Qualité hydro-chimiques des eaux phréatiques	132
2.1.	Potentiel d'Hydrogène	132
2.2.	Salinité des eaux phréatiques	134
2.3.	Oxygène dissous	141
2.4.	Composition cationique des eaux phréatiques	143
2.4.1.	Calcium	143
2.4.2.	Magnésium	145
2.4.3.	Sodium	147
2.4.4.	Potassium	149
2.5.	Composition anionique des eaux	151
2.5.1.	Chlore total	151
5.2.	Bicarbonates	154

5.3.	Sulfates	156
2.6.	Sodicité des eaux	158
2.7.	Faciès chimiques des eaux	158
2.8.	Pollution minérale des eaux	162
2.8.1.	Ammonium	162
2.8.2.	Nitrites	164
2.8.3.	Nitrate	166
2.8.4.	Phosphates	168
2.9.	Paramètres de pollution organique	170
2.10.	Indice de pollution organique	172
2.11.	Indice de biodégradabilité	176
2.12.	Pollution en métaux lourds	178
2.12.1.	Fer	178
2.12.2.	Crome	178
2.12.3.	Cobalt	179
2.12.4.	Cadmium	179
2.13.	Microbiologie des eaux phréatiques	179
2.13.1.	Coliformes totaux	180
2.13.2.	Coliformes fécaux	181
2.13.3.	Streptocoques totaux	181
2.13.4.	Streptocoques fécaux	182
2.13.5.	Clostridium sulfito-réducteurs	182
2.13.6.	Indice de qualité microbiologique	183
Conclusion		186
Chapitre IX. Recommandations d'aménagements		187
1.	Actions à échelle national	187
2.	Actions à échelle régionale	188
3.	Perspectives de recherches	190
Conclusion générale		193
Références bibliographiques		197
Annexe		-



Introduction générale

Introduction générale

Ressource vitale pour tous les êtres vivants, elle est malheureusement devenue aujourd'hui une denrée rare et précieuse, menacée par une pollution qui prend des dimensions de plus en plus importantes, liée notamment aux activités humaines, l'eau est un bien public et une partie du patrimoine où sa protection est d'intérêt général.

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S, 2012), la gestion durable de l'eau est l'un des principaux axes du développement durable. Chartzoulakis et Bertaki, (2015), ont considéré l'eau comme ressource la plus critique pour une agriculture durable dans le monde. Aissata (2010), a signalé que la consommation en eau est menacée par une nette augmentation et une pollution accrue, la situation mondiale des ressources en eau est devenue critique. Plus d'un milliard de personnes dans le monde n'a pas accès à l'eau potable et près de deux milliards et demi, soit le tiers de la population mondiale, seront confrontés à une pénurie d'eau d'ici 2025. Toutefois, les régions où les ressources non renouvelables (telles que les eaux souterraines fossiles, qui ne sont jamais une source durable) continuent de diminuer sont devenues hautement vulnérables et dépendantes des transferts d'eau provenant des régions riches en eau (Banque mondiale, 2012 ; Mekonnen et Hoekstra, 2016 ; W.W.A.P. 2017).

D'un autre côté, l'Afrique héberge 15 % de la population mondiale, mais ne dispose que de 9 % des ressources en eau renouvelables, réparties de manière inégale dans l'ensemble de continents (Wang et *al.*, 2014). L'écart entre la disponibilité et la demande en eau se creuse rapidement, surtout dans les villes, où la population urbaine devrait quasiment quadrupler d'ici 2037 (Banque mondiale, 2012). Le W.W.A.P (2017), a déclaré que le secteur agricole est responsable de 70 % des prélèvements d'eau de la planète, des augmentations importantes de la demande en eau sont prévues de plus pour la production industrielle et énergétique, où l'urbanisation accélérée et l'expansion de l'approvisionnement en eau et des réseaux d'assainissement municipaux contribuent à la demande accrue.

Au cours des cinquante dernières années, les surfaces irriguées ont plus que doublé, le cheptel total a plus que triplé, et l'aquaculture en eaux intérieures a été multipliée plus de vingt fois. Mateo-Sagasta et *al* (2015), a ajouté que les besoins en eau des municipalités représentent 11 % des prélèvements de ressources en eau à travers le monde où seulement 3 % de ce total est consommé, les 8 % restants étant rejetés sous forme d'eaux usées, ce qui représente 330 km³ par an, dont pourrait servir dans l'irrigation agricole de 40 millions d'hectares (avec environ 8 000 m³ par hectare), soit 15 % de toutes les terres irriguées.

Toutefois, la F.A.O. (2003) a déclaré que l'eau usée et d'autres eaux de mauvaise qualité sont importantes dans le contexte de la gestion globale des ressources en eau. W.W.A.P., (2017), a ajouté que pour faire face à la demande en augmentation constante, les eaux usées prennent de l'ampleur en tant que source d'eau alternative fiable.

Historiquement, les eaux de surface ont été utilisées comme un moyen pour l'évacuation directe des eaux usées, cette pratique a reculé dans la plupart des pays développés depuis la fin du XIXe siècle et le début du XXe siècle avec l'essor des systèmes de collecte et de traitement des eaux usées (U.N.E.P, 2015 ; Jaramillo et Respeto, 2017). En revanche, la F.A.O. (2003) a démontré que le déversement sauvage des eaux usées dans le milieu naturel est à l'origine de graves problèmes de pollution biologique des nappes souterraines et des eaux de surface. Pour limiter les risques de pollution, l'organisation mondiale d'alimentation préconise de plus en plus à travers le monde, de réutiliser les eaux usées après un traitement partiel ou total. D'ailleurs, la F.A.O. (2003) a additionné que les eaux usées domestiques sont une source précieuse d'eau et de nutriments en agriculture, si elles sont traitées de façon adéquate et appliquées en toute sécurité.

La réutilisation des eaux épurées en agriculture peut apporter des bénéfices considérables à la santé humaine et animale, et notamment une nutrition améliorée, les systèmes d'utilisation d'eau usée, lorsqu'ils sont correctement planifiés et contrôlés, peuvent avoir un impact environnemental et sanitaire positif, à côté de rendements agricoles accrus. Cependant, cette pratique peut également avoir des effets néfastes sur l'environnement. D'après O.M.S., (1989) ; Benabdallah et Nabeurt, (2003) ; Baumont et *al* (2004) ; Rotbardat (2011) ; Belaid, (2010) et Ounoki et *al*. (2014), les eaux de rejets peuvent contenir de nombreuses substances, sous forme solide ou dissoute pouvant affecter l'environnement, notamment l'entraînement des éléments toxiques à la plante, tels que le plomb, le mercure, le cadmium, le brome, le fluor, le chrome et le sélénium où ces substances peuvent à travers les produits irrigués avec des eaux usées, entrer dans la chaîne alimentaire. Cependant, le risque est extrêmement petit lors d'un usage des eaux usées domestiques.

D'autres risques environnementaux peuvent être constatés sur le sol tel que la salinisation, l'alcalinisation et la réduction de la perméabilité du sol et l'accumulation d'éléments potentiellement toxiques (F.A.O., 2003). D'après Belaid (2010), d'autres effets peuvent être remarqués sur les eaux souterraines, entre autres la dégradation de la qualité

des eaux souterraines par les constituants de l'eau usée (salinisation, alcalinisation et pollution causée par les nitrates, les phosphates ou les micropolluants.

En Algérie, le ratio ressources en eau par habitant et par an qui était de 1 500 m³ en 1962 n'était plus que de 720 m³ en 1990, de 630 m³ en 1998 et de 500 m³ en 2013, traduisant ainsi le décalage par rapport à la croissance démographique (Mozas et Ghosn, 2013). Les potentialités hydriques naturelles de l'Algérie sont estimées à 18 milliards de m³ par an. L'irrigation occupe une place importante dans la consommation d'eau (62 % de la demande totale du pays). La demande en eau potable, qui a considérablement augmenté depuis les années 1970, représente quant à elle 35 % de la demande totale. D'après Mozas et Ghosn (2013), la nouvelle politique du pays concernant l'eau s'est structurée autour de deux axes stratégiques dont la première repose sur le développement de l'infrastructure hydraulique : barrages, transferts, stations de dessalement d'eau de mer, stations d'épuration... etc., et la deuxième intéresse aux réformes institutionnelles du secteur de l'eau qui vise à promouvoir une meilleure gestion de la ressource.

Selon Hamar (2018), l'Algérie a entamé depuis une décennie un vaste programme de construction de stations d'épurations et réutilisation des eaux épurées pour sauvegarder la qualité de l'environnement en général et la qualité des eaux en particulier. Les expériences algériennes en matière de réutilisations des eaux traitées à des fins agricoles sont très limitées. La mise en place du périmètre d'irrigation à partir des eaux traitées demandera une attention particulière et une coordination avec tous les acteurs et les autorités. Selon O.N.A (2020), durant l'année 2019, un volume de 12.325.269 m³ d'eaux épurées a servi à l'irrigation de 11.045 hectares de terres agricoles. De plus, durant l'année 2020, où sur les 154 stations d'épuration exploitées par l'O.N.A. (STEP) à travers 44 wilayas, 16 stations sont concernées par la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture.

Ouargla, comme toutes les oasis sahariennes, doit son existence et sa potentialité, dans un milieu aussi hostile que le désert a souffert depuis des années de problème des excédents hydriques (Idder, 2007). En revanche, la surexploitation des ressources en eau et le manque de dispositifs de gestion rationnelle des excédents hydriques, dans un contexte naturel aussi difficile et fragile que celui de Ouargla, ont provoqué une généralisation du phénomène de remonté de la nappe phréatique et salinisation des sols irrigables de la palmeraie. Ce qui traduit par un paysage pédologique caractérisant la cuvette de Ouargla dominé principalement par les caractères d'halomorphie et d'hydromorphie et créés de

sérieux problèmes écologiques (A.N.R.H. 2000 ; Messaitfa et Chaich, 2004 ; Hamdi Aissa 2001 ; Daddi Bouhoun, 2010 ; Idder et *al.*, 2018).

Dans cette région, la nappe phréatique est de 0 à 8 m (Messaitfa et Chaich, 2004). Elle repose sur un niveau épais imperméable qui occupe le fond de la vallée de la région et l'isole les nappes sous-jacentes. Selon Moulla et Guendouz (2003), leur alimentation s'est faite sur les affleurements perméables, par infiltration des eaux de ruissellement apportées par les oueds. Un apport non négligeable se fait par l'impluvium du Grand Erg oriental les crues, les eaux de drainage et aussi par les remontées naturelles en provenance des aquifères plus profonds et les fuites dans les ouvrages hydrauliques (Rouvillois-Brigol, 1975 ; Aissani et *al.*, 2013). Le recours aux eaux souterraines plus profondes par la multiplication des forages d'exploitation captant les aquifères du continental intercalaire (CI) et du complexe terminal (CT) destinés aux besoins d'irrigation et d'alimentation en eau potable a accéléré la remontée des niveaux hydrostatiques des nappes phréatiques à Ouargla. Cette situation d'excès d'eau a perturbé l'écosystème oasien et a engendré des problèmes environnementaux nuisibles notamment pour l'agriculture (salinité des sols, dégradation des palmeraies par asphyxie, etc.).

La pollution de la nappe phréatique à Ouargla et sa vulnérabilité à la pollution est discutée par nombreux travaux à cause des nuisances exprimées par la présence de cette nappe peu profonde sur une cuvette sans exutoire comme celui de Ouargla. On cite les travaux de Guendouz et *al.*, 1992 ; A.N.R.H., 1994 ; Hamdi-Aissa et Fedoroff, 1997 ; Djidel, 2008 ; Djidel et *al.*, 2008 ; Slimani 2006 ; Slimani et Guendouz, 2015 ; Slimani, 2016.

Pour faire face aux nuisances environnementales générées par le problème d'excédents hydriques dû aux rejets des eaux usées urbaines et agricoles, la région de Ouargla est bénéficiée d'un grand projet d'assainissement des eaux usées, de leurs traitement et évacuation des eaux traitées vers l'exutoire Sebkhet Sefioune à 20 km de centre-ville (Bouhanna, 2014 ; Nader, 2014 ; Bouhanna et *al.*, 2015 ; Bouhanna et *al.*, 2019). Parmi les principaux objectifs de ces projets est la réutilisation agricole des eaux épurées (Bonnard et Gardel, 2004). Les premières tentatives de réutilisation agricole des eaux usées épurées sont pratiquées dans un périmètre de mise en valeur situé au nord de la station d'épuration de Ouargla après sa mise en œuvre en 2009 (Bouhanna 2014 ; Bouhanna et *al.*, 2015).

Les impacts environnementaux de cette pratique sur les sols et les palmiers dattiers sont expérimentés à travers quelques travaux menés dans le périmètre précité. Selon

Bouhanna (2014), la réutilisation agricole des eaux épurées pendant 3 à 4 ans a avoir entrainé une légère diminution du pH eau, une augmentation de la salinité, la sodicité et la fertilité des sols cultivés. Parallèlement Bouhanna et *al.* (2019), ont déclaré que cette pratique à des impacts positifs sur l'enrichissement de palmier en azote, en revanche aucun effet significatif n'est distingué des concentrations en sodium et en chlore des plantes.

Toutefois, les impacts de la réutilisation agricole des eaux épurées sur la nappe phréatique restent peu étudiés. Notre recherche se propose à étudier cette problématique suite à une étude préliminaire en magister (Bouhanna, 2014). Elle a comme objectif d'apprécier l'effet de la réutilisation agricole des eaux usées épurées sur la nappe phréatique à Ouargla. L'approche méthodologique consiste à :

- Étudier la qualité des eaux non conventionnelles générées par la station d'épuration de Ouargla ;
- Apprécier l'impact des eaux usées épurées sur la nappe phréatique des en zones irriguées et non irriguées.
- Proposer des recommandations d'aménagement, à la lumière des résultats de recherche et des connaissances acquises à Ouargla.

Le travail est scindé en trois parties complémentaires à savoir :

1. Première partie : cadre de l'étude et problématique. Nous exposons une étude bibliographique qui présente l'importance mondiale et nationale de la pratique de réutilisation agricole des eaux épurées, ainsi que leurs impacts environnementaux. De plus, on a essayé à travers cette partie d'illustrer l'importance des eaux épurées dans le cycle de gestion de l'eau. Parallèlement on a procédé à une présentation de la nappe phréatique à Ouargla et sa relation avec le sujet de réutilisation des eaux usées.

2. Deuxième partie : matériel et méthodes d'étude. Elle présente les sites expérimentaux et la méthodologie d'étude adoptée.

3. Troisième partie : résultats et discussion. Elle présente les principaux résultats obtenus à travers la présente recherche.

Partie I :
Cadre d'étude et
problématique

Chapitre I. Cadre d'étude

Ce chapitre est consacré à la présentation des connaissances et diverses informations acquises sur la région d'étude. Il (Le chapitre) constitue un bilan d'un nombre important de s travaux et d 'études réalisés dans la région à travers les années. De plus, on s'est référé aux nouvelles données recueillies des différents organismes dans la région. Les données collectées ont été suffisantes pour traiter la thématique de la recherche proposée.

1. Cadre géographique

La wilaya de Ouargla est située dans le désert au Nord-est du Sahara algérien (Fig. 1), s'étalant sur une superficie de 163 323 km². Elle est limitée au Nord par les Wilayas de Djelfa, Biskra et d'El-Oued, à l'Est par la Tunisie, au Sud par la Wilaya de Illizi et Tamanrasset, à l'Ouest par la Wilaya de Ghardaïa. Actuellement la wilaya de Ouargla occupe une place importante dans l'économie nationale par l'industrie d'hydrocarbures et la production agricole ainsi que l'immense réservoir en eaux souterraines.

La Cuvette de Ouargla (Fig. 2), autrement l'oasis de Ouargla, chef-lieu de la wilaya très large de la vallée de Oued M'ya (Rouvillois-Brigol, 1975). Elle est située entre 31° 54'' à 32°10''N et 5°15'' à 5°27''E (Slimani, 2015), installée sur une superficie de 99 000 km² (A.N.R.H., 2000). Limitée au Nord par Sebkhet Sefioune, au Sud par les dunes Sedrata, à l'Ouest par le versant Est de la dorsale du M'Zab et limitée à l'Est par la linge du Erg Touil et Arfidji.

Les communes qui font partie de la cuvette de Ouargla sont : Ouargla, N'goussa, Rouissat, Ain El Beida et Sidi Khouiled (D.P.A.T., 2012).

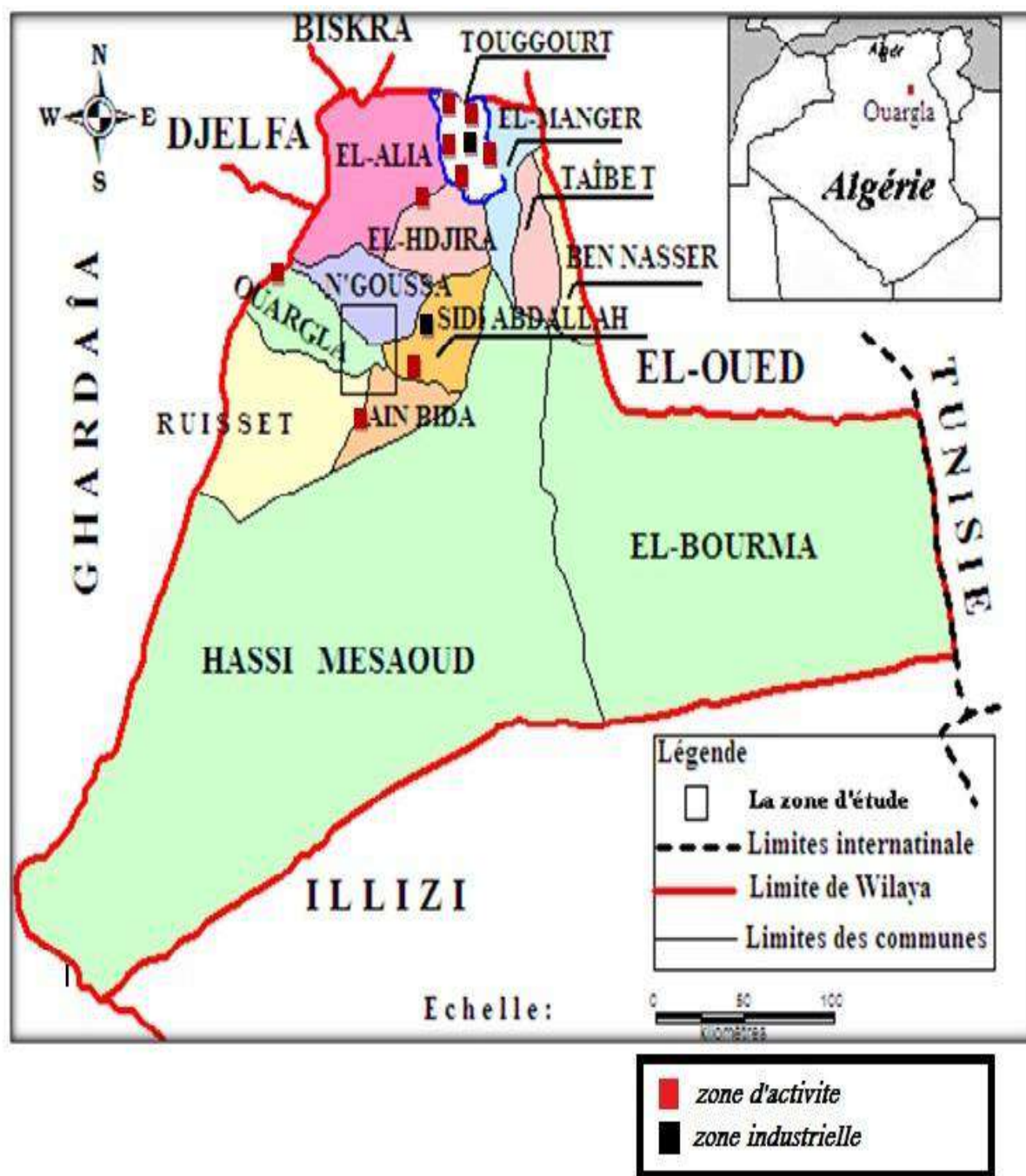


Figure 1. Limites géographiques de la Wilaya de Ouargla (D.P.A.T. 2019)

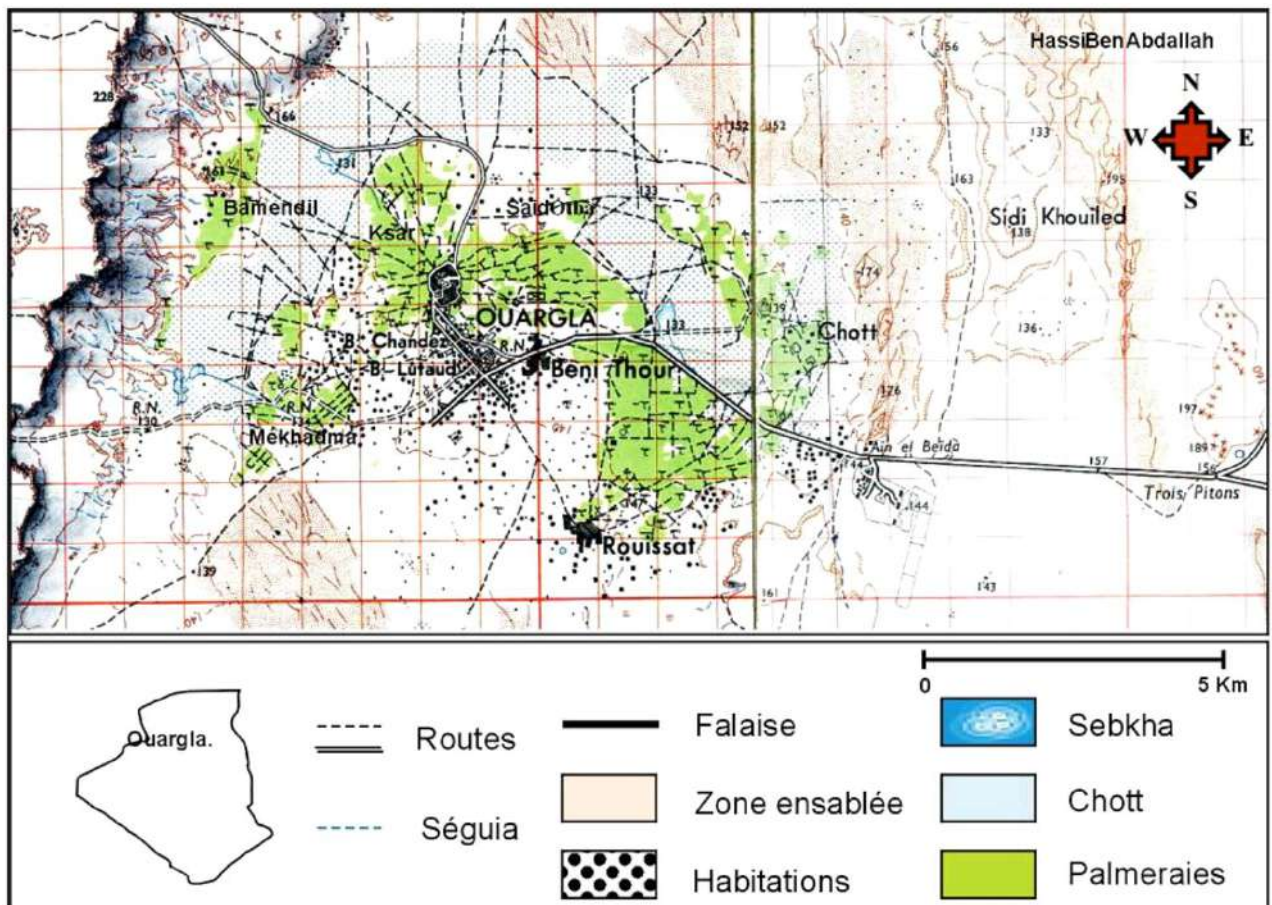


Figure 2. Environnement de la cuvette de Ouargla (I.G.N., 1960 in Daddi Bouhoun, 2010)

2. Cadre climatologique

D'après Rouvillois-Brigol, (1975), l'aridité s'exprime non seulement par des températures élevées en été et par la faiblesse des précipitations, mais surtout par l'importance de l'évaporation due à la sécheresse de l'air. Celle-ci y contraste en saison froide avec l'humidité du sol. Dubief (1953), a signalé que Ouargla présente un climat désertique avec un hiver froid et un été chaud. Les données climatiques de la région de Ouargla sont apportées de l'office national de la météorologie de Ouargla (O.N.M). Ces données sont celle qui concerne les périodes 2002 et 2019. Les résultats sont consignés dans le tableau (I). L'étude climatique de la région nous à offert un aperçu sur la relation entre les composantes des systèmes agricoles dans la région d'étude ainsi que l'importance des ressources en eaux en agriculture et l'efficacité de système d'épuration des eaux usées.

Tableau I. Données climatiques de la région de Ouargla entre 2002 et 2019 (O.N.M., 2019).

Paramètres	Température (°C)			P (mm)	Hr (%)	E (mm)	I (h)	V (m/s)
Mois	Min	Max	Moy					
Janvier	4.96	18.70	12.06	2,30	55.25	19.95	208.06	8.40
Février	6.34	20.88	13.58	7,46	50.73	143.79	216.77	9.61
Mars	10.34	25.73	18.70	6,51	45.87	198.70	237.68	10.89
Avril	14.73	29.13	22.73	0,61	36.97	256.92	245.63	12.15
Mai	19.53	36.60	27.18	1,81	26.30	318.96	257.73	12.90
Juin	24.94	40.18	31.97	0,19	23.48	373.12	207.24	12.9
Juillet	27.19	43.25	35.45	0,05	21.45	419.01	263.71	10.32
Août	26.83	41.91	34.00	0,86	24.95	96.84	272.83	10.62
Septembre	23.75	37.24	30.82	7,96	31.92	280.68	231.39	2.50
Octobre	18.36	31.66	26.25	8,22	37.78	225.72	231.15	8.91
Novembre	10.34	23.90	16.64	4,38	51.07	134.90	197.25	7.00
Décembre	5.62	18.84	11.59	1,77	58.39	117.71	189.53	7.35
Moyen/cumul	16.08	30.67	23.41	42,11*	38.68	2559.35*	2759.02*	9.41

* cumul T° max : Température maximale T° min : Température minimale

P : Précipitations Hr : Humidité relative de l'air V moy : Vitesse moyenne de vent

E : Evaporation I : Insolation

2.1. Température : A Ouargla les températures sont en moyenne très élevées. La température moyenne annuelle est de 23,41 °C, dont la plus élevée enregistrée pendant le mois le plus chaude Juillet avec une moyenne de 35,45 °C. Par contre, le mois le plus froid est Décembre avec une moyenne de 11.59 °C. (Tabl. I). Ces températures élevées durant presque toute l'année sont très avantageuses pour l'efficacité du traitement des eaux usées par lagunage. Ce paramètre climatique est un facteur très important car il agit directement sur la vitesse des réactions biologiques, l'activité biologique du milieu est d'autant plus importante que la température augmente.

Nombreuses études ont montré que les pathogènes ont tendances à s'inactiver avec l'augmentation des températures et leurs survies est plus faibles à hautes températures. (Beaupoil et *al.*, 2010 ; F.A.O.,2003 ; Bradford et *al.*, 2008).

2.2. Précipitations : Les formes des précipitations les plus observés dans les régions sont la pluviométrie et les rosés pendant la période hivernale. La pluviosité est discontinue à travers les saisons et les années, avec une sécheresse presque absolue de mois de mars jusqu'au mois d'août. Le mois le plus pluvieux est Octobre avec un maximum de 8.22 mm, suite aux

inondations de 2017 où les volumes des précipitations atteignent le 22 mm. Le volume de cumule annuel des précipitations est de l'ordre de 42.11mm (Tabl. I). Ce cumule est pratiquement stable durant les années, la moyenne interannuelle est de l'ordre de 44 mm/an entre 1909- 2015 (Dubief 1953, O.N.M. 1975-2015 in Slimani, 2015). D'après les études nationales et internationales réalisées, la sécheresse permanente à longueur d'année favorise les performances d'épuration des eaux usées par lagunage aéré.

Bouhanna (2014), a calculé les besoins théoriques en eau d'irrigation de quelques cultures dans la région d'étude (Tableau II) avec la formule de Blaney et Criddel et celle de Turc. La comparaison entre les cumules des précipitations (Table. I) et les doses d'irrigations nécessaires a montré l'importance de la pratique d'irrigation. En conclusion, l'irrigation est nécessaire pour tous les systèmes de culture dans la région.

Tableau II. Besoins théoriques en eau d'irrigation de quelques cultures (Bouhanna, 2014)

Mois	ETP1 BLANY et CRIDEL	ETP2 Turc	Kc orge	Kc luzerne	Kc palmier dattier	ETM1 (mm) (Orge)	ETM2 (mm) (Luzerne)	ETM3 (mm) Palmier dattier
						ETP1 * Kc	ETP1 * Kc	ETP2 * Kc
Janvier	80	64,09	1,15	1,2	1	92	96	64,09
Février	85	79,27	1,15	1,2	1	97,75	102	79,27
Mars	118	111,34	1,15	1,2	1	135,7	141,6	111,34
Avril	135	143,79	0,25	1,2	1	33,75	162	143,79
Mai	169	161,71	/	1,15	1	/	194,35	161,71
Juin	190	169,99	/	1,15	1	/	218,5	169,99
Juillet	200	189,82	/	1,15	1	/	230	189,82
Août	190	180,76	/	1,15	1	/	218,5	180,76
Septembre	155	143,42	/	0,4	0,95	/	62	136,249
Octobre	130	113,09	0,3	1,2	0	39	156	0
Novembre	95	81,63	1,15	1,2	0	109,25	114	0
Décembre	84	57,96	1,15	1,2	0	96,6	100,8	0
Cumul annuel	1631	1496,89	/	/	/	604,05	1795,75	1237,019

D'après Ozenda, (1991), l'irrégularité du régime des pluies et l'insuffisance des précipitations, permet l'existence de longues périodes sans une goutte d'eau qui provoque des sécheresses permanentes. Ces conditions sont aggravées encore du fait que la plupart des déserts sont situés dans les régions tropicales, donc soumis à de fortes températures, et qu'ils sont parcourus par des vents continuels, toutes ces conditions climatiques affectant la réparation du couvert végétal dans ces régions.

2.3. Vents : Les données présentées dans le tableau I indiquent que les vents dans la cuvette de Ouargla sont fréquents à longueur d'année avec une vitesse moyenne annuelle de 9.41m/s et vitesse maximale de 12,9m/s pendant les mois de Mai et Juin. La vitesse et la direction des vents dans la région d'étude peuvent causer des mouvements tourbillonnants qui assurent un brassage de la masse d'eau à travers l'agitation désordonnée et favoriser l'oxygénation des eaux des lagunes.

2.4. Humidité : les régions sahariennes sont connues par leurs taux d'humidité atmosphérique faibles. Le taux d'humidité relative varie d'une saison à l'autre, il atteint son maximum au mois de décembre 58,39% et une valeur minimale au mois de juillet estimée à 21,45% et une moyenne annuelle de 38,68% (Table. I). Ce faible taux d'humidité durant presque toute l'année influe sur l'intensité d'évaporation des lagunes qui peuvent induire l'élévation des concentrations des eaux épurées en sels et en matières dissoutes.

2.5. Évaporation : En zones arides, l'évaporation et l'évapotranspiration sont les mécanismes majeurs de pertes d'eau. Dans le Sahara, l'évaporation atteint des valeurs considérables. (Merabet, 2011). L'intensité de l'évapotranspiration chez les cultures est influencée directement par l'évaporation, c'est une relation proportionnelle. La région est connue par l'évaporation trop considérable suite aux températures élevées et des vents fréquents chauds et violents (Rouvillois- Brigol, 1975 ; Hamdi-Aissa et al, 2004). Elle est de l'ordre de 2559,35 mm/an avec une valeur maximale de 419,01 mm ou mois juillet et une valeur minimale de 19,95 mm ou mois de janvier (Tabl. I). D'après Idder, (1998), l'intensité excessive de l'évaporation dans la région d'étude influencer négativement l'efficacité du traitement des eaux usées par lagunage, car elle favorise l'augmentation de la charge des eaux, par voie de conséquence, diminue la qualité des effluents, ce qui est confirmé à travers nos travaux de magister pendant la campagne 2012-2014.

2.6. Insolation : En raison du peu de nébulosité de l'atmosphère, les déserts reçoivent une quantité de lumière solaire relativement très forte (Ozenda., 1991). La région de Ouargla reçoit un cumul annuel d'insolation de 2759.02 h/an (Tabl I), avec des différences de la moyenne mensuelle allant de 272.83 h pendant le mois d'août à 189.53 h pendant le mois de décembre (Tabl I).

2.7. Classification climatique de la région

2.7.1. Diagramme ombrothermique du Gaussen et Bangauls

Ozenda (1991) ; Gaussen et Bangauls ont cherché à exprimer l'aridité par un chiffre qui soit d'autant plus élevé que le climat est lui-même plus sec, qui traduise le caractère dominant du milieu saharien, à savoir la présence d'une longue période sèche. Ces auteurs nomment « mois secs » les mois pour lesquels la pluviosité (exprimée en millimètres) est inférieure au double de la température (exprimée en degrés centigrades), (échelle $P = 2T$), et la période sèche, celle qui est constituée par plusieurs mois secs consécutifs. D'après Ramade (2003), les périodes d'aridité sont celles où la courbe pluviométrique est au-dessous de la courbe thermique.

Le diagramme ombrothermique de la région de Ouargla indique que de 2002 à 2019, la période sèche est permanente sur toute l'année avec un maximum d'aridité en été (Fig. 3).

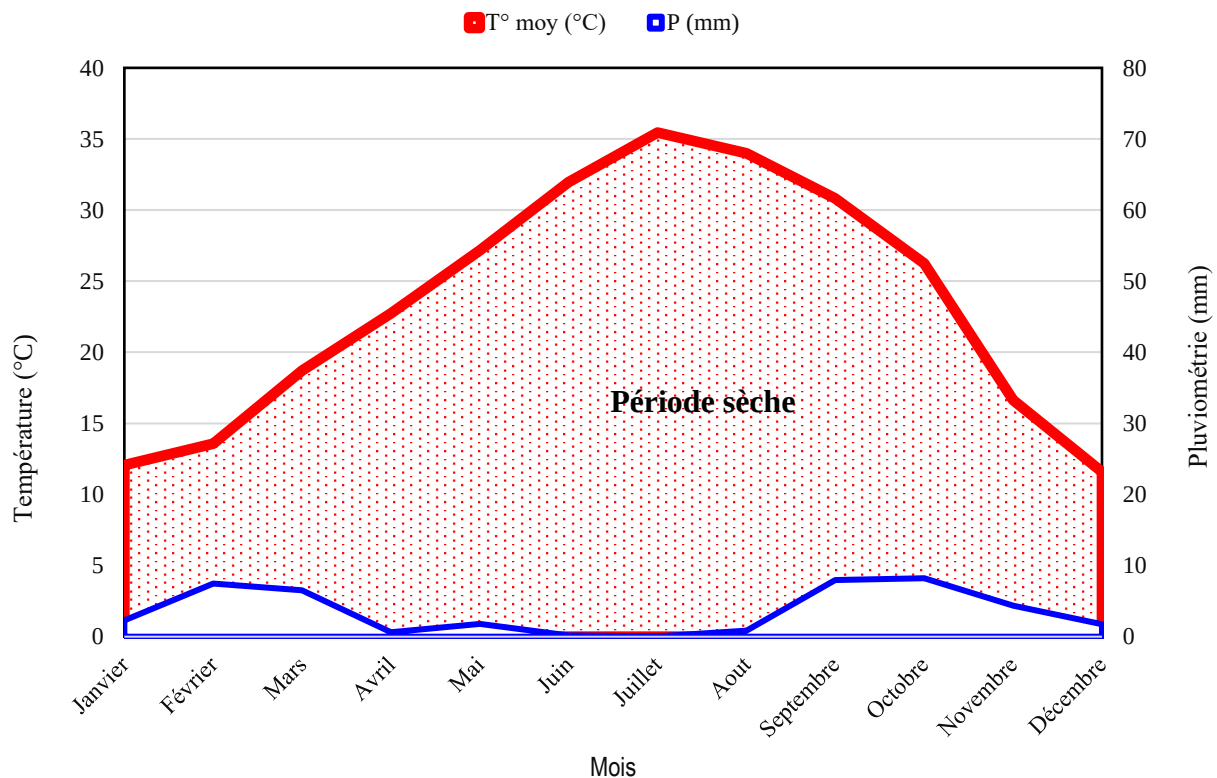


Figure 3. Diagramme ombrothermique de Gaussen de la région d'Ouargla

2.2.2. Climmagrame d'Emberger

Emberger a cherché à améliorer cette notion en montrant que l'aridité dépend aussi de l'amplitude thermique annuelle, c'est-à-dire de l'écart entre la température maximum du mois le plus chaud et la température minimum du mois le plus froid, il a proposé d'exprimer

l'aridité par une formule applicable aux pays méditerranéens et au Sahara septentrional (Ozenda, 1991).

Généralement, pour classer le bioclimat des régions méditerranéennes, le quotient pluviométrique d'Emberger (Q) spécifique à ces régions tient en compte les précipitations et les températures. Il est donné par la formule d'Emberger in Idder (1998), comme suite :

$$Q = 2000 P / M^2 - m^2$$

P : pluviométrie moyenne annuelle en mm ;

M : température maximale du mois le plus chaud ;

m : température minimale du mois le plus froids ;

Notre région d'étude (Ouargla) se situe dans l'étage bioclimatique saharien à hiver doux (Fig. 4) puisque le $Q = 3,80$.

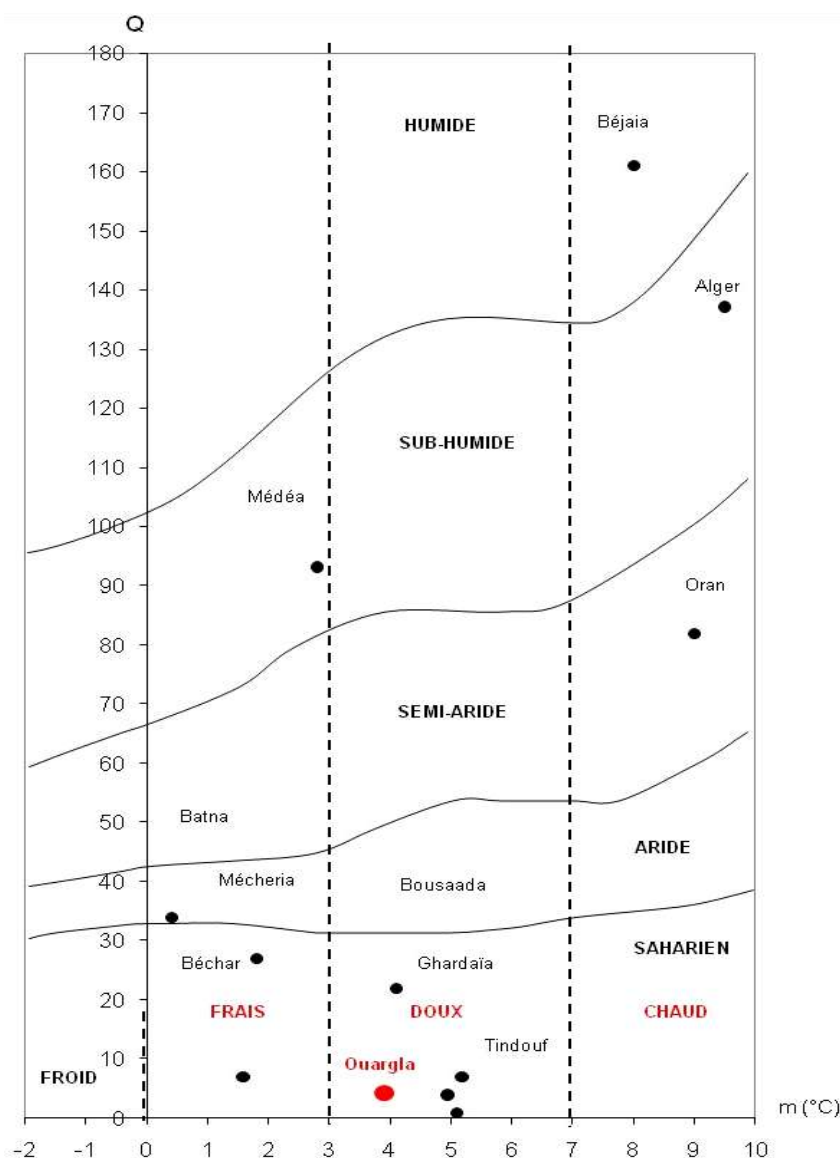


Figure 4. Climmagrame d'Emberger de la région de Ouargla

2.7.3. Indice d'aridité de DE MARTONNE

L'indice d'aridité de DE Martonne (I_M) exprimé par la formule suivante (Ozenda, 1991 ; Idder, 1998) :

$$I_M = P / T + 10$$

P : la pluviosité moyenne annuelle, exprimée conventionnellement en mm.

T : Températures Moyenne annuelle en °C

Cet indice permet de définir les intervalles climatiques suivants :

- $0 < I_M < 5$: climat désertiques aréiques
- $5 < I_M < 20$: climats très secs à secs
- Pour $I_M > 30$: climats humides

Ce coefficient, d'un usage constant en géographie, Il est d'autant plus faible que le climat est plus aride (Ozenda, 1991). Pour la région d'étude, $I_M = 0,10$, ce qui situe la région de Ouargla dans l'intervalle des climats désertiques traduisant une aridité nettement exprimée.

3. Cadre démographique

A la fin du XIX^{ème} siècle, Ouargla n'occupait qu'un rang très modeste au Sahara, apparaissant comme une annexe de Oued Righ. Mais le développement des recherches pétrolières à partir de 1954, et la découverte en 1956 à 80 km au Sud Est de Ouargla du gisement de Hassi Messaoud, va précipiter l'oasis dans nouveaux courants économiques (Rouvillois-Brigol., 1975). En plus de sa situation géographique au Nord du Sahara, de ce fait, elle est devenue progressivement un pôle administratif et industriel pour le Sahara. La ville est aussi une ville de garnison, siège de la 4^{ème} Région Militaire (Bouhanna, 2014). La population résidente dans toute la cuvette est de 282.489 habitants pour l'année 2019 (D.P.A.T., 2019). La grande partie de la population est concentrée dans la commune de Ouargla et Rouissant (Tabl. III).

Tableau III. Population de la cuvette de Ouargla (D.P.A.T., 2019)

Commune	Population 2008	Population 2019	Taux accroissement %
Ouargla	133 024	156 767	1,5
Rouissant	58 112	74 199	1,5
Sidi Khouiled	8 803	16 522	5,4
Ain- Beida	19 039	25 446	2,8
N'goussa	16 581	20 839	2,2
Totale pop C Ouargla	235 559	282 489	2,68

Le peuplement de Ouargla est divers par ses origines et varié dans ses modes de vie (Rouvillois-Brigol, 1975). La population de la cuvette de Ouargla a grimpé de 133.024 habitants en 2008 à 282.489 habitants en 2019 (D.P.A.T., 2019). L'expansion rapide de la ville de Ouargla ainsi que les accroissements démographiques se traduisent par des augmentations considérables des besoins en eaux pour les activités vitales quotidiennes de la population. Selon la D.P.A.T. (2018), les ressources mobilisées sont estimées à 221.824m³/jour dans la cuvette. La dotation moyenne est estimée à 384,2l/j/H. Les débits exploités atteignent 1.281L/Sec pour les eaux potables et l'industrie.

La croissance démographique dans la région d'étude va influencer d'une façon directe le croissement des taux des ressources en eaux conventionnelles mobilisées, ainsi que les taux des eaux usées générées.

4. Cadre géomorphologique

La ville de Ouargla et ses palmeraies sont situées dans une large cuvette qui constitue l'aboutissement de l'artère hydrographique de Oued Mya (Idder, 1998). La région présente une dissymétrie Est-Ouest assez nette, la limite vers l'Ouest est marquée par une falaise qui se termine par un plateau de la Hamada pliocène (plateau des Canntra), s'abaisse légèrement en Est où on trouve des composées de formation dunaires (Erg Touil et Erg Boukhenza), l'altitude varie de 220m en dessus à 160m en bas de la vallée fossile (quaternaire) (Fig. 5) (Rouvillois-Brigol, 1975). Concernant les glacis, d'après Hamdi-Aissa (2001), le versant Ouest de la cuvette, présente quatre niveaux étages de glacis caractéristiques, le plus ancien recoupe le sommet de la bordure du plateau en buttes, son altitude s'abaisse de 225m à l'Ouest jusqu'à 200m environ à l'est. Les glacis de 180m et 160m plus visibles se caractérisent par l'affleurement du substrat gréseux du Miopliocène, le glacis de 160m a été fortement démantelé lors de la formation du dernier glacis de 140m d'altitude environ.

Les bas-fonds de la cuvette sont occupés par des alluvions. Ce sont des terrains inondables de la sebkha qui s'allongent en forme de croissante, au nord de la ville depuis l'Est vers l'Ouest (Idder, 1998). Selon Leger (2003), Le chott correspond à la bordure de la sebkha est constitué de sable siliceux et/ou gypseux et des sols gypseux à des croûtes gypseuses de surface et de subsurface. Ces formations morphologiques constituent les niveaux les plus bas du paysage (103 à 131 m) et occupent environ 25.000 hectares de la cuvette (Idder, 1998). De plus, le bas-fond se caractérise par la présence d'une nappe phréatique permanente, très peu profonde (1 à 5m) dans le chott, qui affleure en surface au centre de la sebkha.

Pour les dayas, ce sont des petites dépressions circulaires, résultant de la dissolution locale des dalles calcaires ou siliceuses qui constituent les Hamadas (Ozenda, 1991).

Concernant le cadre topographique de la région d'étude, le profil longitudinal (Fig. 5), de la vallée à une pente générale très faible Sud-Ouest vers Nord-Est inférieur à 1‰ qui n'est pas constante (52m dénivelée pour 55km). D'après Rouvillois-Brigol (1975), cette pente varie de 2‰ du pied de Djebel abbad à la rive nord de la sebkha de Ouargla, et devient au Nord de la sebkha 1,8‰ après le massif dunaire au sud de la palmeraie de N'goussa où l'altitude est de 117m, en fin la pente devient presque planée de 0,6‰ après le seuil de N'goussa jusqu'aux rives de la Sebkhet Sefioune.

L'analyse des états géomorphologiques et topographiques ont argumenté que la cuvette de Ouargla situées dans une dépression sans exutoire qui favorise la stagnation des eaux. Ce qui exige, l'installation des systèmes de drainage efficaces des eaux usées afin de préserver les ressources naturelles. Djidel (2008) a déclaré que la carte topographique de Ouargla à échelle de 1/100.000e montre que l'altitude descend de 147m vers 102m à distance de 45km dans Sebkhet Sefioune où est prévue l'évacuation des rejets d'eaux de la ville de Ouargla.

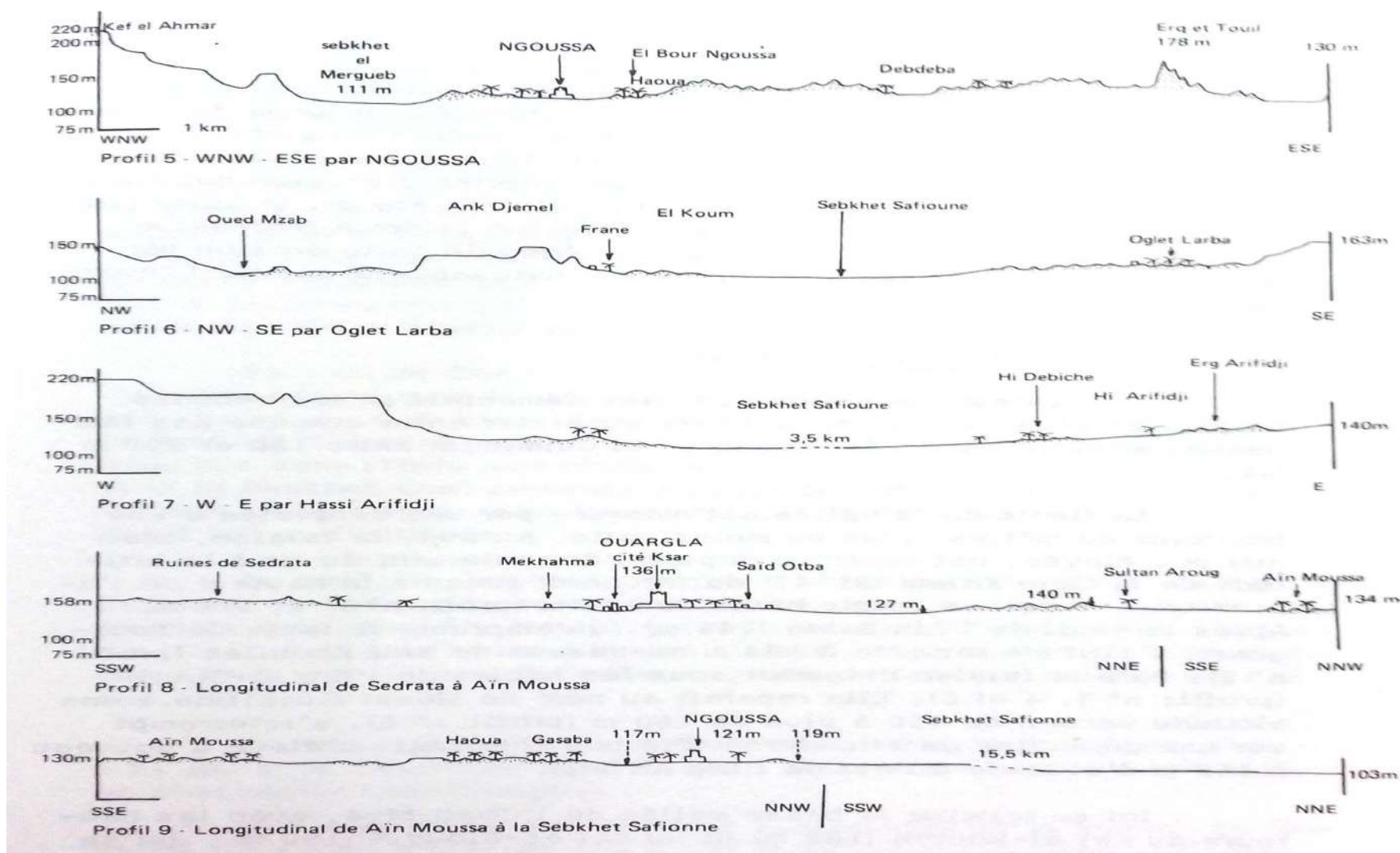


Figure 5. Coupes transversales et longitudinales de la cuvette de Ouargla (Rouvillois-Brigol, 1975).

4. Cadre géologique

4.1. Etude stratigraphique à l'échelle régionale

Vers la fin de l'Ordovicien, le Sahara algérien se trouve relativement près du pôle Sud où se développe un inlandsis qui va fondre ensuite. De ce fait, la paléogéographie de la région à cette époque et au Silurien inférieur est particulièrement intéressante. Un cadre biostratigraphique ayant été établi auparavant, basé principalement sur les graptolites (Diplograptides), a tenté de reconstituer étage par étage, l'évolution de la région (Legrand, 1999 : Legrand 2003).

La région de Ouargla fait partie du Bas-Sahara algérien. Des caractérisations de phénomènes géologiques, stratigraphiques et tectoniques de tout le Bas-Sahara sont étudiés, afin d'entamer l'étude de la géologie de la région, en raison de l'ampleur de ces phénomènes litho-stratigraphiques qui la caractérise. D'après Slimani (2016), la litho-stratigraphie détermine la nature des roches et dans une certaine mesure, leurs propriétés hydrodynamiques. La conceptualisation du système hydrogéologique s'appuie donc sur les données litho-stratigraphiques. Les pétroliers divisent la plateforme saharienne en un certain nombre de bassins répartis dans trois provinces : province occidentale, orientale et triasique qui dépasse 4500 m d'épaisseur dans sa partie septentrionale. Elle est caractérisée par une importante formation d'évaporite.

Au Sahara algérien, les travaux de Busson (1970) et de Fabre (1976), constituent les références de base pour une bonne compréhension de la géologie du Sahara algérien. Les nappes de cette zone sont limitées à la base du Trias.

Le Trias montre une grande variation de faciès et des épaisseurs. Cet étage est divisé en grandes unités lithologiques distinctes qui sont de bas en haut : le Trias argilo-gréseux inférieur (Grès de Nezla), le Trias carbonaté, le Trias argilo-gréseux supérieur (Grès de Tartrat), le Trias argileux et le Trias salifère (Busson., 1970).

Le Bas-Sahara se présente comme une vaste cuvette limitée à l'Ouest par la dorsale du Mزاب, au Sud par les hamadas du Tadmait et de Tinghert et à l'Est par les plateaux du Dahar tunisien. Ses bordures, de hauteur modeste, s'inclinent en pente douce vers la partie déprimée matérialisée par l'axe SSW-NNE des Oueds M'ya et Oued Righ. Vers le Nord au contraire, dressée au-dessus d'une dépression longitudinale occupée par des chotts et dont le fond est inférieur au niveau de la mer. Une haute barrière composée des Monts des Ouled Nail, de l'Aurès et des Nememcha en constituant la limite (O.S.S., 2002).

D'après l'étude BRL-B.N.E.D.E. R, (1999) ; Trompette (1995) ; on peut distinguer de bas en haut, trois ensembles géologiques (Fig. 6) :

- ✓ Les terrains paléozoïques affleurent au sud, entre les plateaux du Tademaït et Tinghert et le massif du Hoggar, mis en place à l'Archéen et lors de l'Orogenèse burnéenn ;
- ✓ Les terrains du Mésozoïque et Cénozoïque, constituent l'essentiel des affleurements des bordures du bas Sahara.,
- ✓ Des dépôts continentaux de la fin du Tertiaire et du Quaternaires, occupent le centre de la cuvette.

Selon Bel et Demargne (1961), C'est ainsi que les formations du Crétacé inférieur datées du Berriasien à l'Albien ont été regroupées sous le terme « Continental intercalaire ». Le terme « Continental terminal » désigne les formations datées du Sénonien au Miopliocène. Les séries datées du Trias au Malm ont été regroupées sous le Jurassique. Les étages datés du Primaire et les formations du socle sont regroupés sous le nom de Paléozoïque. Les données brutes des coupes de forages ont été réorganisées selon cette échelle qui se présente de haut en bas comme suit :

1. Quaternaire ;
2. Continental terminal ;
3. Turonien ;
4. Cénomanien ;
5. Continental intercalaire ;
6. Jurassique ;
7. Trias ;
8. Paléozoïque.

La région a connu au cours de son histoire géologique des longues phases de sédimentation alternativement marines et continentale. D'après Djidel (2008), la disposition des formations sédimentaires dans la cuvette du Bas-Sahara favorise ainsi une circulation souterraine des eaux précipitées sur les affleurements en auréoles concentriques du pourtour. L'alternance de terrains perméables et imperméables assure en outre leur mise en charge à mesure qu'elles s'écoulent vers les parties déprimées. Ces conditions géologiques particulièrement favorables sont à l'origine de la formation des nappes souterraines qui alimentent les oasis.

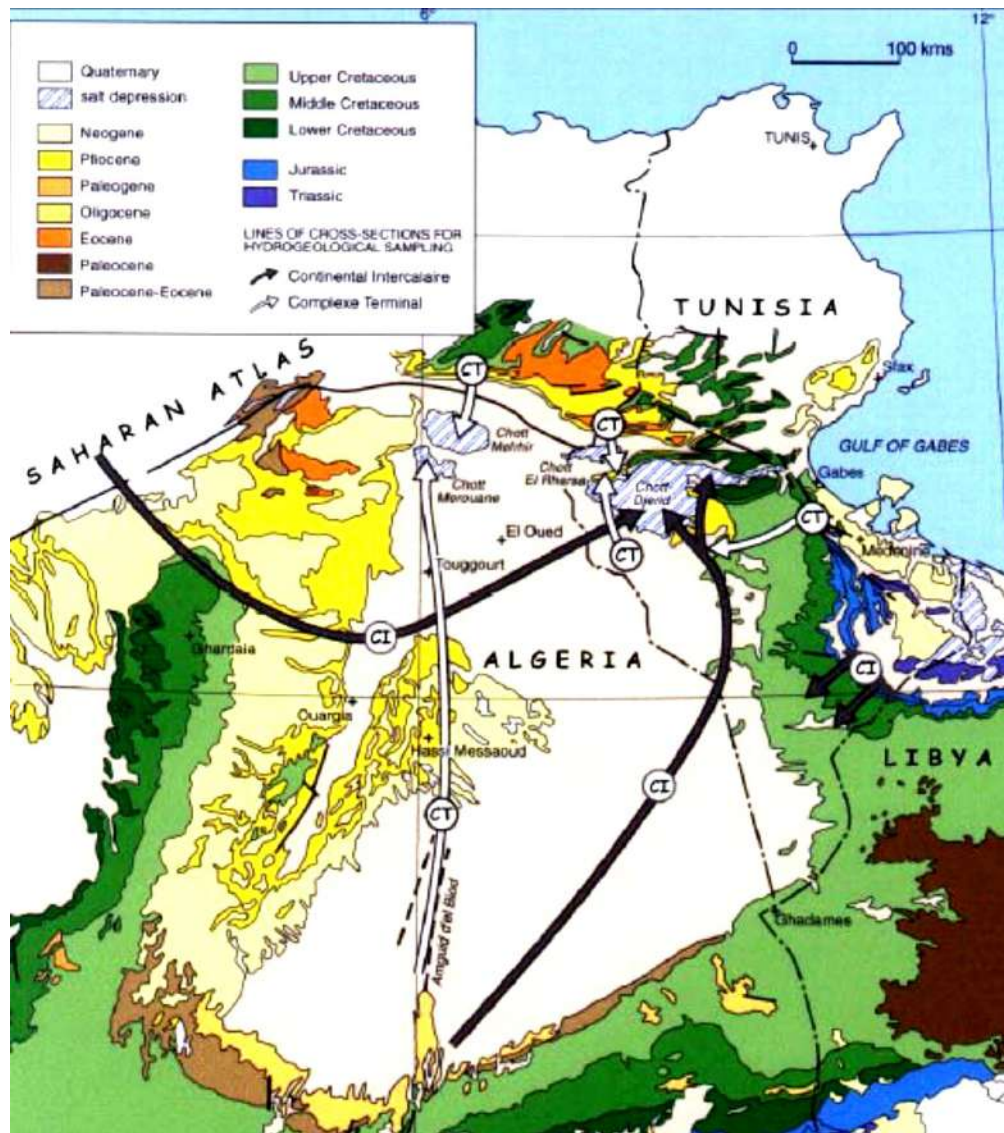


Figure 6. Cadre géologique du bas Sahara (Guendouz et *al.*, 2003 in Slimani, 2016)

U.N.E.S.C.O. (1972), dans le projet ERSS a caractérisé les données lithologiques et simplifier les descriptions des faciès géologiques. Les descriptions détaillées de faciès sur les logs de forages ont été regroupées en huit classes répertoriées sur l'annexe 1.

4.2. Litho-stratigraphie à l'échelle locale

La cuvette de Ouargla a connu au cours de son histoire géologique de longues phases de sédimentation alternativement marines et continentales. Les travaux d'exploration géologique prennent beaucoup d'ampleur à partir des années 50 suite aux prospections pétrolières qui ont permis de mettre en évidence d'importants gisements d'hydrocarbures dans le Sahara algérien (Cornet et *al.*, 1969 ; Rouvillois-Brigol, 1975), mais à l'heure actuelle, la connaissance détaillée de la géologie de la région de Ouargla demeure fragmentaire. Selon Rouvillois-Brigol (1975), aucun sondage profond n'ait atteint la base Primaire à Ouargla.

En effet, dès le Secondaire, des mouvements verticaux d'ensemble ont affecté le socle Précambrien et Primaire provoquant notamment l'effondrement progressif de sa partie centrale, suivant un axe passant approximativement par la vallée de l'Oued Righ et par le tronçon supérieur de la vallée de l'Oued Mya (Gouskov, 1952 ; Rouvillois-Brigol, 1975). L'argile à gypse et de sel du Permo-Trias, puis les gris et les sables et les argiles Jurassique et du Crétacé inférieur, la base est formée de dépôts marins du Primaire et le toit d'argiles marines du Cénomanién. Dans la région de Ouargla les bancs de gypse (évacorites) caractérisent l'étage avec une épaisseur de 100 à 200m.

Les données de forages pétroliers et celles des forages hydrauliques permette la description des coupes géologiques et des formations lithologiques à Ouargla. Sur la région de Ouargla seuls les terrains du Miopliocène affleurent (Fig. 7), ils sont recouverts par une faible épaisseur de dépôts quaternaires (Ergs et Dunes) (Beuf et *al.*, 1971 ; Cornet, 1964). L'annexe 2 résume les caractéristiques géologiques des formations lithologiques de la région de Ouargla.

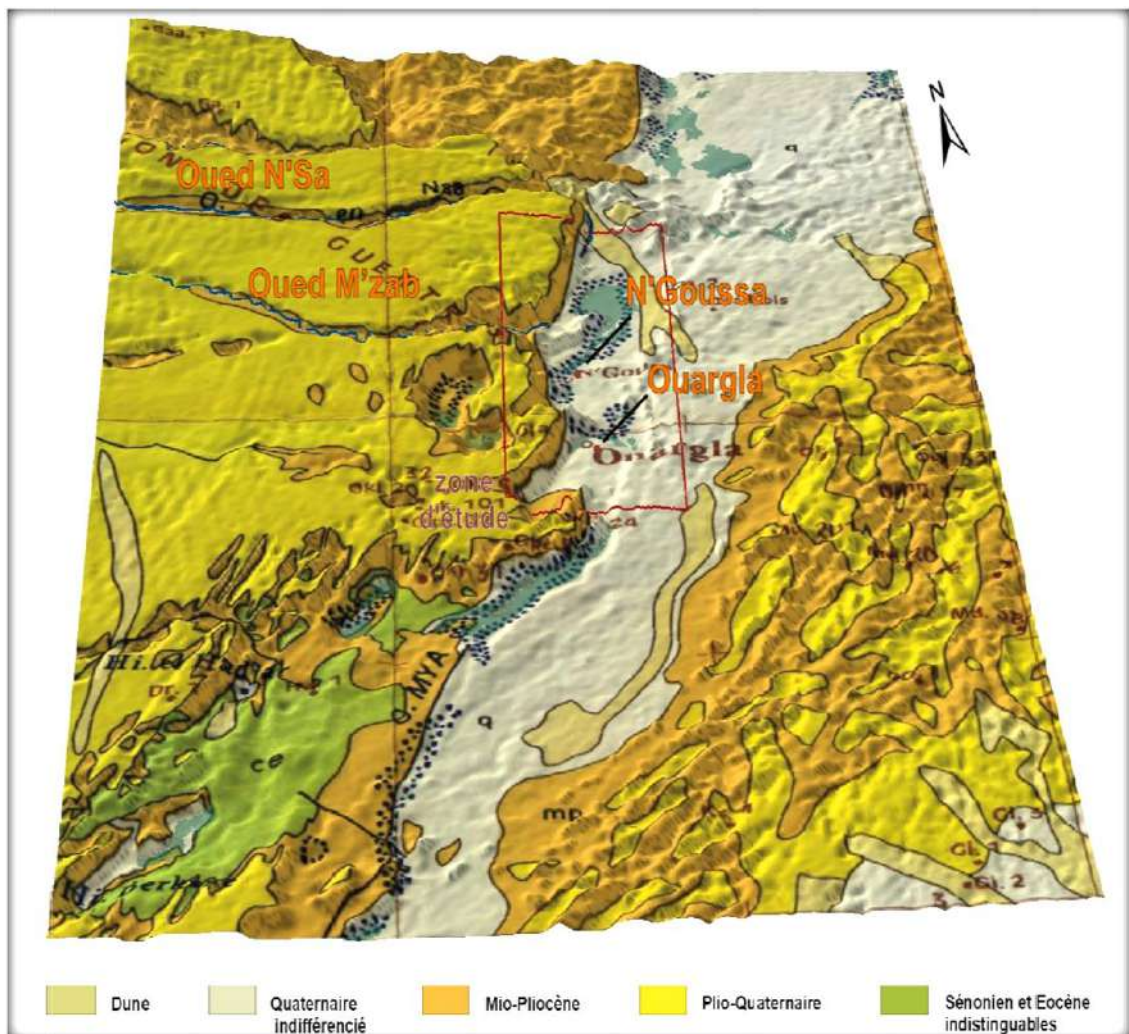


Figure 7. Relief géologique de la région de Ouargla (d'après Djidel, 2008)

4.3. Tectonique

La cuvette d'Ouargla fait partie de la dépression d'Oued M'ya. Cette dernière, occupe la plus grande partie du bas-Sahara. L'épaisseur totale de la couverture sédimentaire atteint 400 m dans la partie Sud et la partie Ouest de la dépression, et elle augmente dans la partie Nord jusqu'à 6000 m. Dans son ensemble la dépression d'Oued M'ya est une structure dissymétrique assez plate (Aliev et *al.*, 1972). Dans son ensemble, cette dépression est le résultat de mouvements compressifs N0-SE et N-S du Mésozoïque et du Cénozoïque ainsi que de la réactivation à partir du Sénonien d'anciens accidents tectoniques hercyniens. En effet, les études géo-structurale régionale montrent que la dépression est structurellement affectée par les failles hercyniennes du Hoggar à partir du Combien jusqu'au Sénonien inférieur. Ces failles sont orientées Sud-Est/Nord-Ouest et traversent la région de Ouargla à l'Est ; elles seraient à l'origine des communications entre les différents aquifères dans cette zone (Guendouz et *al.*, 1992,).

5. Cadre Hydrographique

L'hydrographie de la cuvette de Ouargla se caractérise par son endoréisme (Dubief, 1953). Les réseaux hydrographiques constituent les eaux de surface. Selon Hamdi-AISSA. (2001), différents bassins versants (M'ya, M'zab et N'sa), forment le réseau hydrographique de la région qui aboutit à la Sebkhet Sefioune, Nord de la cuvette de Ouargla.

5.1. Oued Mya

Il draine le versant Nord-Est du plateau de Tadmait. Le bassin de l'Oued Mya est en forme d'une vaste gouttière relevée au sud avec une inclinaison très faible vers le Nord-Est, il s'étend sur 19800 km². Le cours fossile de l'oued Mya inférieur est jalonné par de vastes sebkhas jusqu'à Ouargla, distant de 200 km environ du point extrême atteint par les dernières crues (Dubief, 1953 ; Hamdi- Aissa, 2001).

5.2. Oued N'sa

Considérés comme fonctionnels et peuvent avoir une ou deux crues par an. Ces deux oueds drainent le versant des piedmonts Sud-Est de l'Atlas saharien et coulent donc de l'Ouest vers l'Est-Sud-est jusqu'à Sebkhet Sefioune. D'après Rouvillois-Brigol (1975), il semble qu'aux VIII^{ème} à X^{ème} siècle, les eaux de Crue de l'Oued M'zab et peut être de l'Oued N'sa atteignant parfois les rives de Sebkhet Sefioune permettant quelques cultures de céréales sur les terres d'épandages.

5.3. Oued M'zab

Il passe par la ville de Ghardaïa. Il est constitué à l'amont par la confluence de trois importants oueds : El Abiod, Laadhira et Areguedane. A une dizaine de kilomètres en aval de Ghardaïa, se trouve un deuxième centre de rencontre (Zelfana), à droite oued Noumerat et à gauche Oued Hasseï. L'Oued M'zab prend naissance dans la région de Botma Touila à une altitude de 750 m et il coule sensiblement d'Ouest en Est sur 325 km environ, et se termine à Sebkhet Sefioune (Dubief, 1953). Selon Rouvillois-Brigol (1975), les barrages construits dans le Mzab ont depuis longtemps absorbé ces crues.

5.4. Les crues

Les écoulements superficiels jouent un rôle primordial dans l'alimentation des nappes phréatiques (Slimani, 2016). Dans les régions arides et semi-arides, les fréquences de celle-ci sont très variables dans le temps, ainsi que et les variations interannuelles observées sont très importantes.

D'autre part, d'après Oueld Belkhir (2002), les vitesses d'écoulement instantané des eaux dans les oueds sahariens ont fait l'objet de peu de mesures. Il est possible d'observer des fronts de propagation en forme de houle, lors des pluies qui tombent partiellement sur le bassin versant, et lorsque le lit de l'oued est asséché. Les premières eaux écoulées sont en effet absorbées par les sédiments, les sables et les graviers, qui couvrent le lit de l'oued sur plusieurs mètres d'épaisseur. Dans le cas contraire, et lorsque les pluies tombent sur l'ensemble du bassin, les écoulements latéraux en aval saturent le lit, avant l'arrivée de l'écoulement massif des eaux. En revanche, Dubief (1953), a signalé que la vitesse de la crue d'octobre 1951 sur oued N'sa à Hassi Khefif, à son embouchure dans la Sebkhet Sefioune, coule "à la vitesse d'un cheval au trot", alors que la hauteur atteint 1,6 m et la largeur 30 m.

La période de retour des crues sur l'Oued N'sa et M'zab qui atteignent Sebkhet Sefioune, ont été évaluées à 8 ans, et les crues importantes se produisent le plus fréquemment de Mars à Mai et de Septembre à Décembre, disons au printemps et à l'automne, les mois de fréquences les plus faibles ou nulles Janvier, Juillet et Août (Oueld Belkhir, 2002).

6. Cadre pédologique

Le sol est un support pour les cultures et un réservoir pour les eaux et les éléments nutritifs, il assure le stockage des éléments nécessaire à la vie des végétaux et leur réapprovisionnement (Dubost, 2002).

6.1. Ressources édaphiques à l'échelle du Bas-Sahara

Les Sahara septentrional comprennent deux grandes zones à savoir : Erg occidental et Erg oriental. La roche mère des sols de cette région est du continental intercalaire, elle se caractérise par des formations gréseuses plus ou moins compactes avec des passés argileux. Cependant, ces formations sont hétérogènes ; elles présentent une texture le plus souvent sableuse à limono-sableuse avec des dépôts marneux, à l'égard de l'absence du caractère calcarifères et la présence plus ou moins du caractère de salinité (Khadraoui, 1995 ; Berkel 2006).

Selon Toutain (1977), les sols sahariens peuvent être classés en trois groupes :

- ✓ Les sols détritiques : reg, sol sablonneux et graveleux, dune et ergs ; très bonne infiltration, peu d'emmagasiner 2g/100g de sable.
- ✓ Les sols limono-argileux : terrasses des vallées, zones d'épandage des crues ;
- ✓ Les sols salés : sebkhas et chotts.

D'après Dutil (1971), la particularité des sols du Sahara est leur régime hydrique du type aride. Leur fraction minérale est constituée, dans sa quasi-totalité, de sable. La fraction organique est très faible en général très inférieur à 1 %.

6.2. Ressources édaphiques de Ouargla

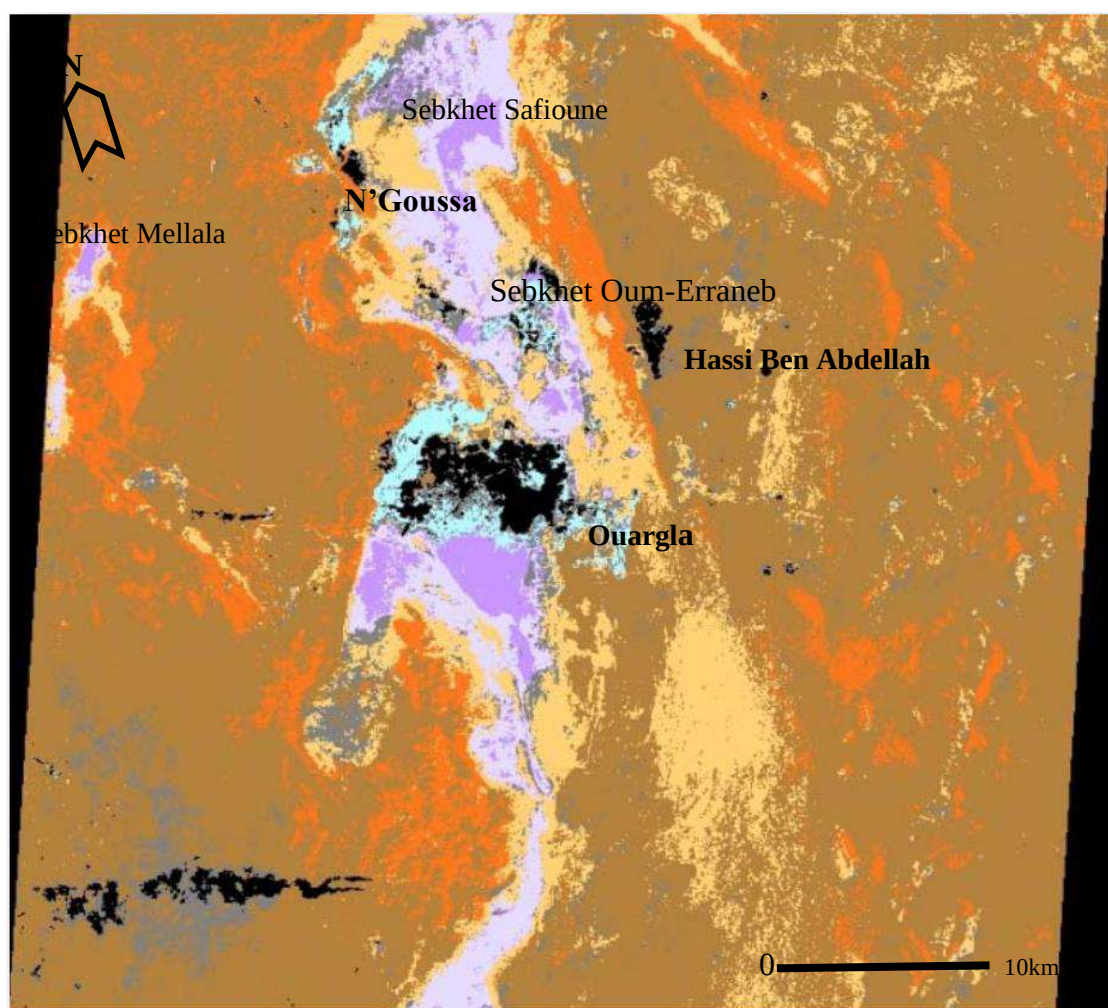
Au sud de cette région le Grand Erg Oriental s'étend largement, traversé du Nord au Sud par le long couloir du Gassi Touil qu'emprunte la route Ouargla - Hassi Messaoud - In Aménas. En dehors du Gassi Touil, le Grand Erg est pratiquement impénétrable. Le Gassi Touil est le plus important des couloirs de l'Erg oriental. Il met en relation la cuvette de Hassi Messaoud au nord avec les plateaux du Tinghert au Sud. Il est limité par des alignements dunaires d'orientation Nord/Sud et Nord-ouest/Sud-est, qui dominent de 60 à 100 mètres des dépressions dont le fond est soit sableux, soit composé d'un reg avec des affleurements de croûtes calcaires soumis à une érosion éolienne intense. Les zones dépressionnaires comme la Sebkhet Sefioune et surtout le chott de Ouargla sont des zones d'hydromorphie qu'il est impossible de drainer efficacement. L'irrigation et l'exploitation des nappes aquifères

alimentent une nappe phréatique très salée et très gênante pour les palmeraies bordières du chott et pour les installations urbaines de Ouargla (Djidel, 2008).

En revanche, le paysage pédologique de la cuvette de Ouargla est dominé principalement par le caractère salin. Le second caractère qui prédomine à Ouargla est celui de l'hydromorphie. La manifestation saline la plus visible est celle de la sebkha. Les sols irrigués de la palmeraie sont le plus souvent très salés, ou plutôt, ils le sont devenus à la suite de l'intervention anthropique puisque l'irrigation se fait avec une eau relativement minéralisée, seule ressource disponible certes, et qu'elle est associée à un lessivage drainage déficient (Idder, 2007).

Selon Halillet (1993) ; Berkel (2016), les sols de Ouargla sont légers à prédominance sableux et à structure particulière, Ils sont caractérisés par un faible taux de matière organique, un pH alcalin, une faible activité biologique, une forte salinité et une bonne aération, On distingue dans la région trois types de sol : Sol sal sodique, Sol hydro morphe, Sol minéral brut. Concernant le risque de la salinité des sols de la région, Hamdi-Aïssa et Girard (2000), ont proposé une carte régionale à petite échelle (1/300 000) de risque salinisation en six unités dans la cuvette de Ouargla (Fig. 8) :

1. Sols présentent un très faible risque de salinisation. Sols quasiment inaptes à la mise en valeurs (Hamada, Reg, pseudo-Reg, ...etc.). Certains glakis (en pseudo-Reg) à état de surface graveleux et sable grossier sont mis en culture dans les rives de la vallée de l'Oued Mya. La salinisation est secondaire, issue de l'irrigation.
2. Sols présentent un faible risque de salinisation ; ils correspondent aux formations éoliennes (dunes, Nebkha, ...etc.).
3. Sols à risque de salinisation moyen : sols gypseux à croûtes gypseuses de surface et de sub-surface. La nappe phréatique salée (conductivité électrique CE entre 5 et 10 dS.m-1) est à plus de 5 m de profondeur.
4. Sols à risque de salinisation élevé : Sols gypso-salins à croûte gypseuse de sub-surface. La nappe phréatique très salée (CE > 30 dS.m-1) est entre 1 et 2 m de profondeur. La salinisation secondaire issue de l'irrigation par une eau souterraine salée (nappe du Complexe Terminal à salinité > 3 g.l-1) s'ajoute à la salinisation primaire.
5. Sols à risque de salinisation très élevé. Sols salins de la sebkha. La nappe phréatique très salée (CE > 30 dS.m-1) est à moins de 1 m de profondeur. Le centre de la sebkha est partiellement inondé par affleurements de la nappe, notamment en hiver. La salinisation secondaire s'ajoute à la salinisation primaire.
6. Affleurements rocheux du grès du Mio-Pliocène.



1. Sols à très faible risque de salinisation ; (Hamada, reg, pseudo-reg, ...etc.).
2. Sols à faible risque de salinisation ; formations éoliennes (dunes, Nebkha, ...etc.).
3. Sols à risque de salinisation moyen. Sol gypseux à croûtes gypseuses de surface et de sub-surface. La nappe phréatique salée (CE entre 5 et 10 dS.m-1) est à plus de 5m de la surface du sol.
4. Sols à risque de salinisation élevé. Sol gypso-salin. La nappe phréatique très salée (CE > 30 dS.m-1) est entre 1 et 2m de la surface du sol.
5. Sols à risque de salinisation très élevé. Sol salin de la sebkha. La nappe phréatique très salée (CE > 30 dS.m-1) est à moins de 1m de la surface du sol. Le centre de la sebkha est partiellement inondé, notamment en hiver.
6. Affleurements rocheux du grès du Miopliocène « Regosols ».
7. Zones non classées.
8. Végétation, eaux, ombres, agglomération...etc

Figure 8. Carte de risque salinisation de la cuvette de Ouargla (Hamdi-Aïssa et Girard, 2000)

6.3. Impact du climat sur les sols

Selon Servant (1975), les facteurs climatiques servent à entraîner le transfert et le stockage des éléments solubles dans le sol, la distribution des sels en solution dans le sol résulte d'une part de l'évaporation, qui aura pour effet la concentration et l'accumulation des sels, et d'autre part des précipitations qui vont favoriser le phénomène de lessivage. D'après Dutil (1971), le régime climatique est idéal dans les régions sahariennes pour l'extériorisation des caractères de la salinité. Une simple analyse des caractéristiques climatiques de la cuvette de Ouargla (Tabl I, page 10), permet de déduire que le climat favorise l'accumulation des sels au niveau des sols suite aux précipitations faibles et irrégulières ainsi que les évaporations intensives.

6.4. Effet de la géologie sur les sols de la région

La région d'Oued Mya a connu à travers les années plusieurs reprises de la formation d'évaporites au Trias et au Sénonien. D'après Gaucher et Burdin (1974), au cours des divers épisodes tectoniques qu'a connu la région, ces formations sont imprégnées de sel et de gypse aux terrains, ont provoqué une diffusion importante de sel.

Chapitre II. Ressources en eau et risque de pollution

L'eau constitue l'élément vital de toute activité, de sorte que sans lequel aucune forme de vie n'est possible. L'eau recouvre 72% de la surface du globe pour un volume total estimé à 1 400 millions de km³. Au cours des siècles passés, l'homme n'a pas endommagé la disponibilité en l'eau. Mais, le monde moderne, les aménagements et la maîtrise de l'eau disponible dans la nature ont transformé le régime des eaux et perturbé leurs fonctions naturelles. Les sources en eau sont variables entre conventionnelles, on site les eaux souterraines, et non conventionnelles, qui correspond aux eaux usées épurées. Nous allons voir dans ce chapitre un aperçu sur les différentes ressources hydrologiques de notre région d'étude. Parallèlement, nous allons essayer de faire une synthèse bibliographique concernant la vulnérabilité de pollution des eaux souterraines, plus précisément la nappe phréatique.

1. Quelques Définitions

1.1. Bassin hydrologique : est délimité par les lignes de crêtes topographiques isolant le bassin versant d'un cours d'eau et de ses affluents. Il correspond en surface au bassin hydrographique. Tandis que, le bassin hydrogéologique correspond à la partie souterraine du bassin hydrologique (Beauchamp, 2006).

1.2. Aquifère : est un corps (couche, massif) de roches perméables comportant une zone saturée suffisamment conductrice d'eau souterraine pour permettre l'écoulement significatif d'une nappe souterraine et le captage de quantité d'eau appréciable. Un aquifère peut comporter une zone non saturée, et est homogène quand il a une perméabilité d'interstices (sables, graviers), la vitesse de percolation y est lente. Il est hétérogène avec une perméabilité de fissures (granite, calcaire) ; la vitesse de percolation est plus rapide (Castany, 1978 ; Margat, 1990).

1.3. Nappe : est l'ensemble des eaux comprises dans la zone saturée d'un aquifère, dont toutes les parties sont en liaison hydraulique (Castany, 1978 ; Margat, 1990).

1.4. Surface piézométrique d'une nappe libre : est la surface supérieure de la zone saturée de l'aquifère. Les mêmes cotes de cette surface forment des courbes de niveau appelées courbes iso-piézométriques car elles correspondent à des points de même charge hydraulique. L'eau de la nappe se déplace perpendiculairement aux courbes iso-piézométriques ; sa vitesse est inversement proportionnelle à la distance entre 2 courbes consécutives (Beauchamp, 2006).

1.5. Nappes libres : la surface piézométrique coïncide avec la surface libre de la nappe qui est surmontée par une zone non saturée (Castany, 1978)

1.6. Nappes captives : La nappe est confinée car elle est surmontée par une formation peu ou pas perméable ; l'eau est comprimée à une pression supérieure à la pression atmosphérique. A la suite d'un forage au travers du toit imperméable, l'eau remonte et peut jaillir (Castany, 1978).

2. Ressources en eau à échelle mondiale

A l'échelle mondiale, approximativement 97 %, de l'eau douce utilisable est eau souterraine. A les Nations Unis, 10 millions km³ d'eau sont trouvés sous terre, dont environ 4,2 millions km³ d'eau moins de 0,8 km de la surface de la terre. Environnement Canada estime que toute l'eau souterraine dans le monde couvrira la surface de la terre d'eau d'une profondeur de 120 m, et que toute l'eau de la surface couvrira la surface de la terre d'eau d'une profondeur de seulement 0,25 m (F.E.P.S., 2012). D'après, B.R.G.M. (2011), l'homme ne peut utiliser que moins d'1% du volume total d'eau présent sur Terre, soit environ 0,028 % de l'hydrosphère. Ceci englobe les cours d'eau, les réservoirs naturels ou artificiels (baies côtières, lacs, fleuves, cours d'eau, barrages...) et les nappes d'eau souterraine (aquifères) dont la faible profondeur permet l'exploitation à des coûts abordables.

De plus, B.R.G.M (2011) a signalé que près de 60 % des ressources naturelles renouvelables d'eau douce du monde sont partagés par 9 géants de l'eau : Brésil, Fédération de Russie, Indonésie, Chine, Canada, Etats-Unis, Colombie, Pérou et Inde. A l'autre extrémité, un certain nombre de pays disposent de ressources extrêmement faibles, voire quasi nulles : Koweït, Bahreïn, Emirats Arabes Unis, Malte, Libye, Singapour, Jordanie, Israël, Chypre. En effet, en 2025, 63% de la population mondiale devrait subir stress hydrique ou pénurie d'eau.

3. Ressources en eau en Algérie

Du Nord au Sud du territoire algérien, on distingue trois ensembles qui diffèrent par leur relief et leur morphologie : la chaîne du Tell et le littoral, la chaîne de l'Atlas qui longe les Hautes Plaines plus au Sud, et le désert saharien qui s'étend au-delà du massif de l'Atlas. Cette disposition du relief, marqué par des conditions climatiques différentes, détermine l'agriculture des régions et le volume des ressources en eau. D'après Mozas et Ghosn (2013), les potentialités en eau sont estimées à 18 milliards de m³/an en 2013 répartis en 12,5 milliards de m³/an dans les régions Nord dont 10 milliards en écoulements superficiels et 2,5

milliards en ressources souterraines (renouvelables), et 5,5 milliards de m³/an dans les régions sahariennes dont 0,5 milliard en écoulements superficiels et 5 milliards en ressources souterraines (fossiles). En revanche, Hamar (2018), a signalé que à l'horizon de l'année 2020 une des plus complexes problématiques du millénaire aura confronté le pays, les ressources en eau potentiellement mobilisables estimées à 15 milliards de m³/an, ce qui correspondrait à un seuil de moins de 400 m³/hab/an, (375) classant l'Algérie dans la catégorie des pays pauvres en ressources hydriques, voire en situation de rareté, aggravée par l'important déficit pluviométrique enregistré les 25 dernières années, évalué sur l'ensemble du pays à près de 30%.

4. Ressources en eau de la cuvette de Ouargla

La majeure partie du territoire algérien est un désert (87 %) où les précipitations sont quasi nulles, mais qui recèle d'importantes ressources fossiles d'eaux souterraines (Mozas et Ghosn., 2013). Saker et *al.*, (2011), le Sahara renferme d'importantes réserves d'eau souterraines qui sont à la base du développement agricole et urbain dans cette zone.

A Ouargla, les formations géologiques contiennent trois grands ensembles de formations aquifères séparés par d'épaisses séries évaporitiques ou argileuses. Le Continental Intercalaire (CI), le Complexe Terminal (CT) et la Nappe Phréatique (Fig. 9).

4.1. Nappe du Continental intercalaire

La nappe du Continental intercalaire (CI), dite Albien couvre les deux grands bassins sahariens : le bassin occidental en nappe libre et le Bas Sahara où la nappe est captive (S.A.S.S/O.S.S., 2002) (Fig. 9). Selon Cornet et Gouskov (1952), cette nappe couvre une superficie de 600 000 Km² et s'étend sur tout le bassin sédimentaire du Sahara septentrional de la vallée de l'Oued Saoura à l'Ouest, aux territoires tunisien et libyen à l'Est.

Cette formation continentale contenue dans des âges variables selon des endroits, elle est située dans le Crétacé inférieur à Ouargla. Leur profondeur atteint localement 2000 m et dont la puissance varie entre 200 et 400 m. A Ouargla, il est exploité entre 1150 m et 1350 m de profondeur, Les eaux de cette nappe sont moins minéralisées comparées à celles des autres nappes (Bonnard et Gardel, 2004). Le volume du CI évalué à 50000 milliards de m³ (UNESCO, 1972), et présente une température de l'ordre de 60°C, une pression de 25 kg.cm⁻² et un débit moyen de 50 l.s⁻¹ (Daoud et Halitim, 1994). La salinité moyenne de 2,4 dS.m⁻¹ ou 1,5 g.l⁻¹ (Guendouz et *al.*, 1992).

La nappe albienne fut exploitée pour la première fois à Ouargla en 1957 (Idder, 1998). Fin de l'année 2018, la cuvette de Ouargla contient 05 forages albienne en production avec un débit moyen de 230 l/s (1 à Ouargla, 03 à Rouissat et 01 à Ain Beida (D.P.A.T. 2018).

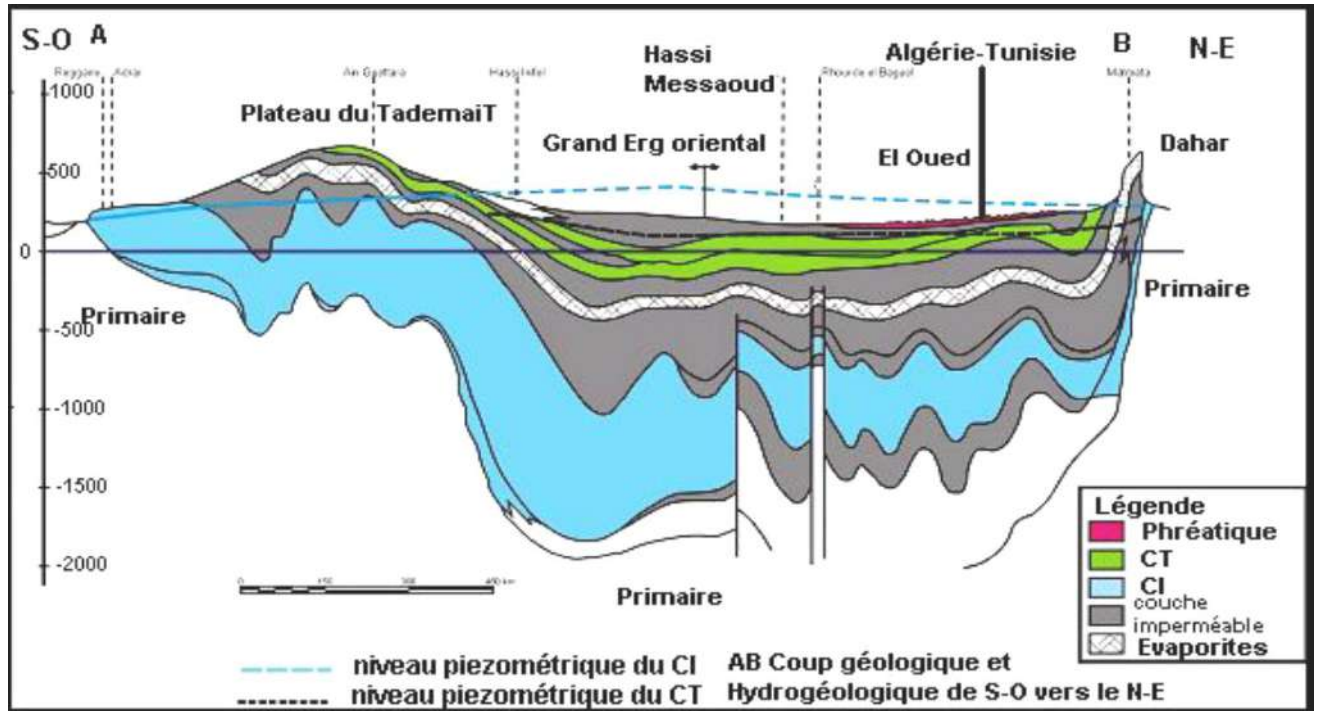


Figure 9. Coupe hydrogéologique synthétique de Sahara septentrional (UNESCO. 1972).

4.2. Nappes du Complexe terminal

Cette nappe de Complexe Terminal, s'étend sur une superficie de 350000 km² (Castany, 1982), regroupe deux formations des aquifères différents, qui de haut en bas sont : le Miopliocène, le Sénonien supérieur et l'Eocène inférieur (Sénonien pour Ouargla principalement) (Bonnard et Gardel, 2004).

4.2.1. Nappe du Mio-Pliocène (nappe des sables) : Nappe contenue dans les sables grossiers atteinte vers 30 à 60 m de profondeur (Bonnard et Gardel, 2004). Elle s'écoule du Sud-Sud-Ouest vers le Nord-Nord-Est en direction du Chott Melghir (Rouvillois-Brigol, 1975). Sa salinité est très variable, variant de 2 à 7 g/l et température varie entre 23 et 25 C° (Bonnard et Gardel, 2004). D'après Rouvillois-Brigol (1975), l'exploitation de la nappe Mio-pliocène est très ancienne et c'est elle qui a permis la création des palmeraies irriguées à Ouargla.

4.2.2. Nappe du Sénonien (nappe des calcaires) : nappe artésienne du Sénonien est exploitée dans les calcaires entre 140 et 200 m de profondeur. Le résidu sec varie entre 1,8 et 3,6 g/l (Bonnard et Gardel, 2003). Selon Rouvillois-Brigol (1975), le débit de cette nappe reste faible et sans commune mesure avec les possibilités de la nappe albienne.

Les nappes du Complexe Terminal sont essentiellement alimentées par les eaux de ruissellement qui proviennent des reliefs de la périphérie du bassin (U.N.S.C.O, 1972 ; SASS/OSS, 2002), ainsi que par les infiltrations qui s'effectuent à travers l'Erg Oriental (Bel et Dermagne, 1961 ; BRL-BNEDER, 1999).

4.3. Nappe phréatique

4.3.1. Nappe phréatique de la région d'étude

La nappe phréatique c'est une formation hydrogéologique, consistant en des nappes d'eau souterraines, donc synonyme d'aquifère dans la terminologie française, présente un taux de renouvellement variable qui dépend de la profondeur à laquelle elle se trouve (Ramade, 2003). Dans la région de Ouargla, cette nappe est contenue dans les sables alluviaux de la vallée, s'écoulant du Sud vers le Nord, suivant la pente de la vallée, sa profondeur varie de 1 à 8 m en fonction de l'altitude et de la saison (Rouvillois-Brigol, 1975), occupe tout le fond de la cuvette et l'isole des nappes artésiennes sous-jacentes (Bonnard et Gardel, 2004).

Sa frange capillaire surgit souvent à la surface du sol sous forme de chotts. Elle est relativement profonde au niveau des hautes altitudes (Ergs), et moins profonde à proximité des palmeraies irriguées. Le sens d'écoulement des eaux est en général d'orientation Sud-Nord (Bonnard et Gardel, 2004).

Selon Rouvillois- Brigol (1975) ; Bonnard et Gardel (2004) ; Khadraoui (2006), les eaux de la nappe phréatique sont fortement minéralisées. La salinité varie entre 7 et 25 g/l Rouvillois- Brigol (1975). Halillet, 1998 a signalé que cette nappe n'est pas utilisée ni pour l'alimentation en eau potable ni pour l'irrigation, cette inutilisation est justifiée par la teneur élevée en sels généralement. D'autre part, son niveau est proche de surface et il est devenu gênant pour la population est l'agriculture. D'après Hamdi-Aïssa (2001), la forte salinité des eaux phréatiques est due essentiellement à la présence des formations gypseuses et argileuses salées dans le sous-sol de certaines zones de l'oasis de Ouargla.

Le faciès des eaux phréatiques et des solutions de sols dans la cuvette de Ouargla est sulfaté calcique, celui-ci évolue vers un faciès sulfaté sodique/magnésien, puis chloruré sodique pour les échantillons les plus concentrés qui correspondent aux eaux de la nappe phréatique et aux solutions des sols de sebkhas (Hamdi-Aïssa., 2001). D'après les études d'A.N.R.H, 2001 in Daddi Bouhoun., (2010), le faciès chimique des eaux phréatiques est chloruré sodique à Mékhadma, Bamendil et à Saïd Otba. Cependant, la palmeraie de Beni Thour présente un faciès anionique sulfaté et un faciès cationique équilibré calcique, sodique et magnésique, mais la palmeraie du Ksar présente un faciès anionique chloruré et un faciès cationique équilibré sodique, calcique et magnésique.

Selon Moulla et Guendouz (2003) ; Chachoua (2008), la nappe phréatique est alimentée dans la cuvette de Ouargla par les eaux d'irrigation, les fuites de réseau d'AEP ainsi que les eaux usées et les rares précipitations qui contribuent à leur alimentation, ainsi que le cours supérieur des oueds du bassin du M'Zab présente des crues plus ou moins importantes pratiquement chaque année. Il est noté que les eaux disparaissent généralement avant d'atteindre l'oued Mya, une partie s'infiltrant. Selon Rouvillois-Brigol (1975), les eaux des crues infiltrées alimentent les nappes d'eau souterraine et peuvent réapparaître dans les points bas, ainsi que le ruissellement sur les pentes du bord de la vallée lors de pluies qui n'avaient rien d'exceptionnel peut s'infiltrer et alimenter la nappe phréatique.

4.3.2. Piézométrie et fluctuation de la nappe phréatique

D'après A.N.R.H (2000), trois sortes de renseignements sont utilisées pour l'étude de la nappe phréatique, à savoir la profondeur de l'eau, la piézométrie de la nappe et les données de variations chimiques de l'eau.

✓ **Profondeur de l'eau** : c'est le niveau statique de la nappe, correspond à la profondeur des eaux par rapport au sol qui permet de préciser les fluctuations des niveaux de la nappe ;

✓ **Piezométrie de la nappe** : La piézométrie permet de suivre la fluctuation de la nappe sous plusieurs facteurs naturels de températures et de précipitations, ou artificiels comme le pompage, l'irrigation et le drainage (Slimani, 2006). Elle est mesurée à l'aide de piézomètre qui est un puits d'observation dans lequel on peut mesurer le niveau de la nappe ou la charge piézométrique (Cosandey et *al.*, 2003).

L'étude des cartes piézométriques de la nappe phréatique au niveau de la cuvette de Ouargla réalisés en Novembre 1998, Avril 2002, Novembre 2003 et Novembre 2007 (Voir annexe 3.4.5.6.), nous ont permis de faire une allure de la piézométrie de cette nappe dans la zone d'étude. Les différentes cartes ont présenté presque la même allure à travers les années. Les écoulements souterrains suivent en général la topographie locale, avec une pente vers les sebkhas Est et Ouest. Cependant, des gonflements de niveau piézométrique considérable est distingué sous l'agglomération, qui s'étend même en amont, à l'endroit de zones faiblement urbanisées et sans eau courante.

4.3.3. Vulnérabilité de la nappe phréatique vis-à-vis la pollution

La vulnérabilité est le défaut de protection ou de défense naturelle de l'eau souterraine contre des menaces de pollution, en fonction des conditions hydrogéologiques locales,

autrement dit, la vulnérabilité est le terme utilisé pour représenter les caractéristiques du milieu naturel déterminant la sensibilité des eaux souterraines à la pollution (Vittecoq et al., 2010). D'un autre côté, la pollution des eaux souterraine peut être définie comme étant la dégradation artificielle de la qualité des eaux induit par l'activité humaine (Chalbaoui, 2000). Elle est due surtout aux rejets dans le milieu naturel de grandes quantités d'eaux usées brutes et souvent chargées en polluants toxique (Bouziani, 2000).

D'après Castany (1982), l'intensité de la pollution dépend des types de sols, influant sur le transfert des contaminations vers les nappes, des doses de polluants et des conditions climatiques de précipitation en particulier. Ils apportent un volume d'eau variable, que de la valeur de la migration des substances qui est le mécanisme principal de la propagation de la pollution dans le milieu souterrain.

Les études ont signalé que la nappe phréatique dans la région de la cuvette de Ouargla se distingue par une pollution d'origine domestique et forte salinité. En effet, et contrairement à l'ensemble des régions Sahariennes, cette formation n'est pas utilisée pour l'alimentation en eau potable (AEP). Son inutilisation est justifiée par les teneurs élevées en sels qui peuvent dépasser les 25 g/l à la périphérie des chotts. Cette formation présente un niveau d'eau peu profond, elle est devenue gênant pour les cultures et les habitations.

Le sujet de pollution des eaux la nappe phréatique est discutée par nombreux auteurs à l'échelle internationale, nationale et locale. Permis les études internationales qui ont traité la notion de la vulnérabilité des eaux phréatique vis-à-vis la pollution. On cite Albinet et Margat (1975), on France ; Hami et al., (1996) on Maroc ; Chippaux et al (2002), on Niamey, Niger ; EL Asslouj et al., (2007) on Chaouia, Maroc ; Degbey et al., 2010 on Benin ; Ahoussi Kouassi et al, (2013) Cote d'Ivoire ; Belghiti et al, 2013 in Meknès, Maroc ; ...ect.

A l'échelle nationale, le sujet de pollution des eaux phréatique est discuté par Derradji et al (2007), on Nord Est Algérie ; Bahroun and al, 2011 El Tarf, Algérie. D'autre part, la notion de la vulnérabilité à la pollution de la nappe phréatique à Ouargla est discutée par nombreux travaux. On cite les travaux de Guendouz et al., 1992 ; A.N.R.H., 1994 ; Hamdi-Aïssa et Fedoroff, 1997 ; Djidel, 2008 ; Djidel et al, 2008 ; Slimani, 2006 ; Slimani et Guendouz, 2015 ; Slimani, 2016.

5. Ressources en eau non conventionnelles

La plupart des activités humaines qui utilisent de l'eau produisent des eaux usées. Étant donné que la demande d'eau dans son ensemble augmente, la quantité d'eaux usées

produites, et leur charge polluante globale, sont en augmentation constante dans le monde entier. D'après W.W.A.P. (2017), dans tous les pays, à l'exception des plus développés, la grande majorité des eaux usées sont directement rejetées dans l'environnement, sans traitement adéquat, ce qui a des effets néfastes sur la santé humaine, les écosystèmes et la qualité des ressources en eau.

Une eau usée constitue l'ensemble des déchets liquides produits par l'homme au cours de ses activités domestiques, agricoles et industrielles. Les eaux usées sont généralement chargées de détritiques divers, de matières minérales dissoutes et de produits organiques en suspension (Der Hoek, 2007). Différents types de ces eaux non conventionnelles ont été illustrés par nombreux travaux de recherches, ils ont classé en fonction de l'origine des eaux et de leurs modes de collecte qui influencent beaucoup leurs compositions et leurs caractéristiques, à savoir les eaux usées domestiques, industrielles, pluviales et agricoles (Ouali, 1999 ; Frank, 2002 ; Messrouk, 2011 ; Mamadou, 2005).

D'après W.W.A.P., (2017), la composition des eaux usées municipales peut être très variable, et reflète la gamme des contaminants émis par les différentes sources domestiques, industrielles et commerciales.

5.1. Epuration des eaux usées à l'échelle mondiale

D'après les dernières statistiques de programme mondial pour l'évaluation des ressources, les pays à revenu élevé traitent environ 70% des eaux résiduelles municipales et industrielles qu'ils produisent. Ce pourcentage tombe à 38% dans les pays à revenu intermédiaire. Dans les pays à faible revenu, seuls 8% de ces eaux usées subissent un traitement. Ces estimations vont dans le sens de l'appréciation souvent citée selon laquelle il est probable que plus de 80% des eaux usées du monde soient rejetées sans traitement.

En effet, d'ici à 2030, les objectifs mondiaux sont l'amélioration la qualité de l'eau en réduisant la pollution, l'élimination de déchets et en réduisant au minimum les émissions de produits chimiques et de matières dangereuses et le recyclage ainsi que la réutilisation sans danger de l'eau.

Le traitement ou l'épuration des eaux usées consiste à décanter les éléments polluants particuliers et à extraire les éléments dissous qui sont transformés en matière sédimentable suite à un traitement approprié. Ainsi, à la sortie de la station, il résulte d'une part une eau épurée rejetée dans le milieu naturel, et d'autre part, il reste des sous-produits désignés sous le terme des boues résiduaires (Amir, 2005). Cette opération a comme objectif principal de

traitement des eaux usées est de produire des effluents traités à un niveau approprié et acceptable du point de vue risque pour la santé humaine et l'environnement (F.A.O., 2003).

Concernant l'itinéraire de traitement, les eaux usées passent par trois types de traitement ; prétraitement, traitement primaires, traitement secondaires et traitement tertiaires (Voir Annexe 7) (Jarde, 2002 ; Degremont, 2005 ; Karoune, 2008).

5.2. Epuration des eaux usées à l'échelle national

Parmi les principaux objectifs de gouvernement algérien la préservation des bassins des eaux souterraines et de surface dans le cadre des différents programmes de développement, à travers l'inscription de projets de stations de traitement des eaux usées à travers tout le territoire algérien.

Actuellement, l'Office National d'Assainissement assure la gestion des infrastructures de l'assainissement sur le territoire de 44 wilayas à savoir : Plus de 55.342 Km de réseaux d'assainissement, pour 1.147 communes, correspondant à environ 80 % du linéaire national, 499 stations de relevage et de drainage, 154 stations d'épuration, 76 stations à traitement intensif (boues activées), 75 stations à traitement extensif, (par lagunage aéré ou naturel) et 03 stations d'épuration à filtres plantés. Le volume des eaux traitées est estimé à 600 millions m³ à l'horizon 2020 (O.N.A. 2020).

5.3. Gestion des eaux non conventionnelles à Ouargla

La région d'étude est connue par deux formes des eaux non conventionnelles, les eaux agricoles de drainage et les eaux usées urbaines. La gestion de ces eaux résiduelles a passé par deux périodes où les mécanismes mobilisés sont différents.

5.3.1. Période antérieur

La cuvette de Ouargla a connu depuis longtemps le problèmes excédents hydriques. Nombreux travaux de recherche réalisés dans la zone ont traité le sujet et proposés des solutions (Idder, 1998 ; Touil, 2003 ; Slimani 2006 ; Idder, 2007 Chachua, 2008 ; Nezla, 2009 ; Idder et *al.*, 2011 ; Idder et *al.*, 2018).

D'après Rouvillois-Brigol (1975), depuis 1958, le niveau de la nappe phréatique ne cesse d'augmenter à cause des débits d'irrigation qui augmentent brusquement ainsi que le développement de la ville et de l'évacuation d'eau urbaine (1958 année de réalisation du premier forage Albien). Ce développement s'est poursuivi avec le début du pompage de la nappe Mio-pliocène en 1962. En effet, à partir de 1971 et suite à l'exode rural et une démographie galopante urbaine (de la ville de Ouargla), les premiers signes de destruction de la palmeraie au profit de l'urbanisation ont fait leur apparition (Touil, 2003).

D'après Idder (1998), le problème des excédents hydriques dont leur fondement due à la remontée de la nappe phréatique a fortement perturbé les équilibres naturels dans le milieu. Milieu déjà difficile, caractérisé par des nappes superficielles salées et peu profondes et des conditions topographiques qui ne facilitent pas l'évacuation des eaux usées. Ce c'est particulier dans les oasis situées dans des vastes cuvettes sédimentaires. Toutefois selon Touil (2003), les premiers travaux de drainage des eaux usées agricoles dans la cuvette de Ouargla se situent entre 1949 et 1952.

Bonnard et Gardel (2001), ont signalé que à travers cette période, le réseau de drainage s'étend sur une longueur totale d'environ 80 km, un canal collecteur à ciel ouvert, d'une longueur égale à 10,5 km traverse la sebkha de Bamendil ainsi que toute la partie Nord de Ouargla, on créant une ceinture de clôture à l'ancienne palmeraie de Ouargla, de plus les auteurs ont déclaré que ce drain n'a pas été réalisé suivant les normes requises puisque l'étude a proposé une largeur de drain à 12 m et non pas à 6 m, comme c'est le cas auparavant.

Les études qui sont menées ainsi que les observations faites sur l'état des réseaux de drainage ont été montré que la majeure partie des canaux sont inefficaces et à faibles capacité d'évacuation des eaux excédentaires ainsi que les drains quand ils sont existés, sont mal réalisés et leur hiérarchie est souvent aléatoire (de point de vue dimensionnement, écartements, profondeur et pente). Slimani (2006) a estimé le volume des eaux de drainage en 2006, qui atteint 9,26 millions de m³ par an.

Le volume des eaux usées urbaines de la cuvette de Ouargla a été évaluée par Slimani (2006), à 2,83 millions de m³ /an. Le réseau d'assainissement urbain de la ville de Ouargla est de type unitaire, les avantages de ce système sont la conception simple dont il est constitué d'un seul collecteur avec un seul branchement ainsi que pas de risque d'inversion de ce dernier. Les inconvénients sont lors d'un orage, les eaux usées sont diluées par les eaux pluviales avec l'apport de sable important à la station d'épuration. Le système d'assainissement couvrant les trois communes de Ouargla, de Rouissat et de Ain-Beida, s'étendait sur une longueur totale de 125 km en 2011. Sur ce réseau 20 stations de relevage ont été installées afin de surmonter les contraintes topographiques (Mensous, 2011). Ce système d'assainissement est connu de nombreuses difficultés. Selon Mensous (2011), seulement 67% des habitations de l'agglomération étaient raccordées au réseau, les autres disposent de systèmes d'assainissement autonome. Ajouté à cela, les grandes quantités des matières piégées dans les réseaux, évaluées à 8000 m³, donnant un taux de colmatage de 40% au réseau.

En ce qui concerne le traitement des eaux résiduaires, les eaux usées urbaines sont évacuées en transitant des stations de relevage à une station d'épuration par boues activées puis à une station principale de pompage, située au nord-est de la cuvette, les eaux étaient évacuées vers la sebkha d'Oum Erraneb avec la même charge polluante et ne subissaient aucune forme de traitement. Cette station d'épuration à boue activée de Ouargla a été réduite à assurer, seulement, le rôle de refoulement des effluents (Idder, 1998). Selon Idder et *al.* (2011), ces procédés sophistiqués de traitement des eaux ont connu des échecs et révélés inadaptés au contexte local.

De plus, d'autres conséquences de mauvaise gestion des eaux usées dans la cuvette de Ouargla ont été déclarées par les auteurs à savoir la santé des populations, qui est menacée par les plans d'eaux et les canaux de drainage qui sont comme des lieux pour le développement des anophèles, vecteurs du paludisme qui, pendant longtemps, ont fait des ravages au niveau de la cuvette de Ouargla. Ainsi que, la dégradation de la palmeraie suite aux dysfonctionnements des systèmes de drainages existants.

L'ancienne stratégie de gestion des eaux résiduaires dans la cuvette de Ouargla a inévitablement conduit à l'apparition des problèmes écologiques et environnementales. Pour atténuer ce problème, des nouvelles discussions sont menées par les pouvoirs publics et les décideurs dont la plus importante est rendant la Sebkhet de Sefioune la nouvelle zone d'exutoire (Slimani, 2006 ; Idder, 2007 ; Idder et *al.*, 2011).

5.3.2. Période postérieure

L'ancien état défavorable des systèmes d'assainissement et d'évacuation des eaux excédentaires dans la cuvette de Ouargla a sensibilisé les décideurs de déceler des solutions dans l'immédiat. Cette prise de conscience semble voir le jour pour le recours à la technique de traitement des eaux usées par lagunage (Idder et *al.*, 2011).

Un mégaprojet d'assainissement et de mesure de lutte contre la remontée des eaux de la nappe phréatique (Fig. 7) a été lancé, en décembre 2005 (Mensous, 2011). Les objectifs principaux d'assainissement fixés par l'Office National d'assainissement de Ouargla sont (Bonnard et Gardel, 2003 ; Mensous, 2011) :

- A.** Le projet d'assainissement de la ville de Ouargla prévoit le raccordement au réseau d'égout au taux de 100% à l'horizon 2015.
- B.** Les eaux de drainage agricoles soient progressivement collectées et évacuées d'une façon indépendante ;
- C.** Les eaux pluviales soient séparées des eaux usées ;
- D.** L'option zéro rejet d'eau usée soit atteinte avec l'abandon de l'assainissement autonome ;

- E.** Les eaux de la nappe en ville soient récupérées dans les drains qui surplombent les collecteurs d'assainissement ;
- F.** La Sebkhet Sefioune soit l'exutoire final de Ouargla.
- G.** La valorisation des effluents traités par leur réutilisation que ce soit dans l'agriculture (irrigation des palmeraies), dans l'aquaculture ou dans la conservation des plans d'eau d'Oum Erraneb et du Chott Ain Beida.

Au cours de la réalisation de ce projet, le rôle de maître d'ouvrage a été confié à l'ONA (Office National d'Assainissement) ; tandis que VINCI (entreprise française), DYWIDAG (entreprise allemande) et BUTEC (entreprise libanaise) ont assuré celui des maîtres d'œuvres (Mensous, 2011).

Le projet d'assainissement de la cuvette de Ouargla prévoit le raccordement au réseau d'égout au taux de 100% à l'horizon 2015 (Bonnard et Gardel., 2003) ainsi que l'élimination complète de l'assainissement autonome. Les principales caractéristiques de système de collecte des eaux résiduaires de Ouargla sont :

- A.** 33 stations de relevage et de pompage ;
- B.** 100 km de canalisation et conduite de refoulement ;
- C.** 3 stations d'épurations (pour les 3 daïra de Ouargla, Sidi Khouiled, N'goussa) ; Concernant l'épuration des eaux usées, Actuellement, il existe trois stations d'épuration des eaux de rejet urbain collectées, dans la cuvette de Ouargla (Bonnard et Gardel., 2003) :
 - 1. La station d'épuration par lagunage aéré de Ouargla :** s'étend sur une superficie de 80 hectares. La STEP de Ouargla se compose de trois niveaux dont le premier renferme quatre bassins d'aération, la deuxième se divise en deux bassins d'aération et le troisième niveau contient deux bassins de finition où de décantation sans aération. La station renferme 11 lits de séchage des boues. Sa capacité journalière est de 57000 m³ jusqu'à 2015. De ça à 2030, il aura lieu l'addition de quatre bassins, sera réparti comme suit :
 - 2 bassins pour le premier niveau ;
 - 1 bassin pour le deuxième niveau ;
 - 1 autre pour le troisième niveau ;
 - 2. La station d'épuration par lagunage aéré de Sidi Khouiled :** s'étend sur une superficie de 3.5 hectares, se compose de cinq bassins organisés en trois niveaux dont le premier se constitue de deux bassins d'aération, la deuxième renferme deux bassins d'aération et le troisième niveau se constitue par un bassin de finition sans aération. La station contient cinq lits de séchage des boues. Sa capacité journalière atteint 1094 m³ de-ci 2030.

3. La station de phyto-épuration par Phragmites de N'Goussa : s'étend sur une superficie de 2.5 hectares, se composé de quatre bassins homogènes aménager sur un seul niveau. Sa capacité journalière est 1750 m³ en 2030.

La gestion des eaux excédentaires agricole dans la cuvette de Ouargla est assurée actuellement par la SPED (Station de **P**ompage des **E**aux de **D**rainage). Cette organisation est responsable de la collecte et l'évacuation des eaux excédentaires de la palmeraie de la cuvette vers la Sebkhet de Sefioune par le biais d'un canal enterrer. L'action d'évacuation des eaux de drainage est effectuée alternativement, un jour de la semaine, les eaux sont évacuées vers la Sebkhet d'Oum Erraneb, cette action a pour but de conserver cette zone humide. Pour le reste de la semaine, l'évacuation étaient faite vers la Sebkhet de Sefioune.

5.3.3. Etude critique de la gestion des eaux résiduaires

A l'heure actuelle, le système de gestion des eaux résiduaires de la cuvette de Ouargla connu des dysfonctionnements, malgré les efforts des pouvoirs publics de remédier le problème d'excédents hydrique dans la région. En se basant sur la formule de Ouali, 1999 et les estimations de D.P.A.T (2019) des débits des eaux potables de la commune de Ouargla, Ain Beida et Rouissat (Table IV) pour estimer les débits moyens des eaux usées rejetées, et normalement atteindre la station d'épuration de Ouargla.

$$Q_{\text{moy/jr}} = Q_{\text{moy/j}} * K_r \quad (\text{Ouali, 1999})$$

Où $Q_{\text{moy/jr}}$: débit moyen rejeté (m³/j) ; $Q_{\text{moy/j}}$: débit moyen journalier d'AEP (m³/j) ; et

K_r : Coefficient de rejeté, varie entre 0,7 à 0,9.

Tableau IV. Débits des eaux potables exploitées et les eaux de rejets

Commune	Débits AEP (l/s)	Débits AEP (m ³ /j)	Débits des rejets moyens (m ³ /j)
Ouargla	700	61920	43344
Rouissant	400	34400	24080
Ain-Beida	40	3440	2408
Total	1140	99 720	69 832

Les volumes des eaux usées urbaines de la ville de Ouargla sont évalués à 69832 m³/j fin de 2019. Dans le même sens, la station d'épuration de Ouargla collecte et traite un volume moyen de 32000m³/j fin de 2019, selon les données déclarées par la direction de l'Office national d'assainissement (ONA) dans la région. Par simple comparaison entre les volumes des eaux de rejets et les volumes atteindre la station d'épuration, il apparait que cette dernière traite que la moitié des eaux de rejets. Par conséquent, le reste des eaux

usées sont rejetés dans l'environnement sans aucun traitement. Cela est lié selon toujours l'ONA aux aménagements qu'a connue les stations de relevage tous tour de la ville durant cette période.

Concernant la longueur de réseau d'assainissement, et le taux de raccordement dans la cuvette d'Ouargla, le tableau n° V présente le dernier recensement du D.P.A.T. (2019)

Tableau V. Longueur de réseau d'assainissement et taux de raccordement de la cuvette de Ouargla (D.P.A.T, 2019)

Commune	Longueur de réseau d'assainissement (km)	Taux de raccordement (%)
Ouargla	390	89
Rouissant	135	75
Ain-Beida	68	86
N'Goussa	36	80
Longueur totale pour cuvette	629	
Moyen de taux de raccordement		82%

L'analyse de données présentées dans le tableur n° V indique que le mégaprojet d'assainissement de la cuvette de Ouargla n'a pas encore atteint leurs objectifs tracés. En 2020, il y a 19% de la population de la cuvette n'ont pas bénéficié d'un raccordement de réseau d'assainissement, ce qui lui oblige d'installer des réseaux d'assainissement autonome, qui peuvent avoir des effets néfastes sur l'environnement. Les différences détectées entre les volumes des eaux de rejets et les volumes des eaux collectés par les réseaux d'assainissements ont engendré des sérieux problèmes au niveau des villes. Le réseau d'assainissement des eaux usées urbaines de la ville de Ouargla et Ain-Beida connues des dysfonctionnements répétitifs, ont engendré des marnes des eaux usées au centre-ville (voir Photo 1). Cela cause des vrais dérangements aux populations dans ces zones.



Photo 1. Affleurement des eaux usées dans la ville de Ouargla et Ain-Beida (Février 2020)

Toutefois, malgré les efforts de l'office National d'assainissement de Ouargla, ainsi que les efforts de pouvoir public, les moyens mobilisés et les budgets réservés pour atténuer le problème des excédents hydrique dans la cuvette de Ouargla, nombreux dysfonctionnement sont apparait toujours sur la surface. Pour cela, il faut mobilisés des solutions plus efficaces dans le médiate.

Chapitre III. Réutilisation agricole des eaux épurées

Dans le monde, une augmentation significative de la demande en eau est prévue dans les prochaines décennies. Outre le secteur agricole, qui est responsable de 70 % des prélèvements d'eau de la planète, des augmentations importantes de la demande en eau sont prévues pour la production industrielle et énergétique. L'urbanisation accélérée et l'expansion de l'approvisionnement en eau et des réseaux d'assainissement municipaux contribuent à la demande accrue. Face à la demande en augmentation constante, les eaux usées prennent de l'ampleur en tant que source d'eau alternative fiable, modifiant ainsi le paradigme de la gestion des eaux usées de traitement et élimination à réutilisation, recyclage et récupération de ressources. À cet égard, les eaux usées ne sont plus considérées comme un problème en quête de solution, mais plutôt comme une partie de la solution aux défis auxquels les sociétés doivent faire face aujourd'hui (W.W.A.P., 2017).

De plus, W.W.A.P (2017) a déclaré que s'elles sont traitées de façon adéquate et appliquées en toute sécurité, les eaux usées domestiques sont une source précieuse d'eau et de nutriments et d'amélioration de la nutrition minérale des cultures en agriculture. L'utilisation des eaux usées municipales est un modèle courant dans les pays du Moyen-Orient et d'Afrique du Nord, en Australie, et en Méditerranée, ainsi qu'en Chine, au Mexique et aux États-Unis. La pratique a connu un franc succès dans les zones urbaines et périurbaines, où les eaux usées sont facilement disponibles, gratuites en général, et où il existe à proximité un marché pour les produits agricoles.

D'après F.A.O. (1997), les eaux usées peuvent être utilisées directement ou indirectement dans l'agriculture. L'utilisation directe se rapporte à l'utilisation planifiée et délibérée d'eaux usées traitées ou non traitées à certaines fins bénéfiques, y compris l'irrigation, l'aquaculture et l'élevage. On parle d'utilisation indirecte lorsque les eaux usées traitées et partiellement traitées ou non traitées sont déversées dans les réservoirs, des cours d'eau et autres plans d'eau, y compris les eaux souterraines, qui fournissent de l'eau pour l'agriculture. La réutilisation des eaux usées traitées est une forme de valorisation d'un potentiel en eau très important. Cette valorisation permet d'alléger le recours aux eaux conventionnelles et essentiellement les eaux souterraines très vulnérables (Lahache Gafrej, 2005).

De plus, selon Mozas et Ghosn (2013), la réutilisation des eaux usées épurées afin de subvenir aux besoins en eau croissants du secteur agricole a longtemps été entravée en raison de la vétusté des stations d'épuration en Algérie. Dans la nouvelle politique de l'eau, elle est devenue un axe prioritaire et des investissements ont été consentis dans la réhabilitation des

anciennes stations et dans la construction de nouvelles. L'objectif déclaré des autorités est de comptabiliser 239 stations d'épuration des eaux usées (STEP) en 2014 correspondant à une capacité de 1,2 milliards de m³ par an d'eaux épurées. En revanche, 154 stations d'épurations des eaux épurées réparties sur 44 wilayas de territoire algérien sont en cours de production d'un volume totale 12 millions m³ d'eaux traitées en 2019 a déclaré par l'office national d'assainissement.

Le recours croissant à cette ressource d'eau non conventionnelle constitue une incitation supplémentaire pour améliorer les capacités d'épuration des eaux usées et augmenter le taux de raccordement des particuliers au réseau d'assainissement. Les priorités pour les autorités portent sur la définition précise des usages de cette ressource, sur la capacité des stations d'épuration et du réseau de transport d'eau épurée à répondre aux besoins hydrauliques et sur l'acceptation par les usagers de réutiliser des eaux usées traitées.

L'utilisation des eaux usées domestiques pour l'irrigation des terres agricoles est une pratique ancienne dans nombreux pays du monde (Scott et *al.*, 2007 ; Condom et *al.*, 2012). Elle est connue depuis la fin du 19^{ème} siècle (F.A.O., 2003). De plus, cette pratique commence à prendre l'ampleur à cause de la rareté des eaux conventionnelles surtout dans les régions arides et semi-arides (Scott et *al.*, 2007 ; Condom et *al.*, 2012). En termes de surface, plus de 20 millions hectares des terres agricoles sont irriguées par les eaux usées épurées travers le monde (Der Hoek, 2007). La réutilisation des eaux usées en agriculture présente un intérêt certain, des risques de réutilisation ainsi que des impacts positifs notamment négatifs sur les sols et les cultures. Le sujet des impacts des eaux épurées en agriculture est discuté par plusieurs auteurs à travers le monde (Ahoussi et *al.*, 2013 on Cote d'Ivoire ; Benajiba et *al.*, 2016 in Maroc ; Candela et *al.*, 2004 on Spain ; Choukr-Allah et Aghai, 2006 on Maroc ; Hassoune et *al.*, 2006 in Maroc ; Raj et *al.*, 2006 on Trichy ; Tang et *al.*, 2004 in China...ect

1. Cadre réglementaire

Selon Sterner (2003), s'agissant de la protection de l'environnement, la réglementation se rapporte généralement à l'utilisation de permis et licences, à l'application de normes en matière d'émissions et de qualité des eaux usées, ou au zonage pour l'utilisation des terres, elle régit également la création de systèmes de collecte et d'installations de traitement en fixant des normes appropriées en matière de traitement et de réutilisation à des fins différentes.

1.1. Réglementation moniale

A l'échelle internationale, la réutilisation des eaux usées épurées est une pratique très répandue. Nombreuses associations scientifiques ont mis des recommandations et normes pour une réutilisation de ces eaux sans danger. Parmi ces recommandations nous avons les recommandations OMS, Californienne, USEPA.

1.1.1. Normes de réutilisation OMS et Californiennes

Il existe deux grands groupes de normes : les recommandations de l'O.M.S., 1989 (annexe 8) et la réglementation californienne titre 22, (1978). L'objectif principal est d'éliminer les risques sanitaires. Ainsi, pour l'irrigation sans restriction, la pollution microbiologique des eaux usées utilisées doit, selon l'OMS, rester au-dessous de 1000 coliformes fécaux (CF)/100 ml et moins de 1 œuf d'helminthe/l. Le Titre 22 californien fixe des restrictions plus sévères, voire l'absence totale de germes-tests : moins de 2,2 coliformes totaux (CT)/100 ml (Abbou, 2010). Dans certains pays, les normes sont draconiennes pour les végétaux destinés à la consommation. L'Afrique du Sud exige une qualité d'eau potable pour cette application, l'état d'Arizona a introduit l'absence de virus comme nouveau paramètre microbiologique (F.A.O., 2003).

Selon Tamrabet (2011), certains pays comme l'Australie, l'Italie, le Canada, Israël et certains pays du Golfe Arabe adoptent dans les grandes lignes l'approche californienne dans leur réglementation de réutilisation des eaux usées. Dans d'autres pays où la réglementation et les directives nationales de réutilisation des eaux usées n'existent pas, ils font, souvent, référence aux recommandations de l'OMS.

L'O.M. S (2006), a publié les lignes directrices sur l'utilisation des eaux usées (WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater), qui tiennent compte des situations locales et privilégient les moyens à prendre pour réduire au minimum les risques sanitaires posés par ces eaux, l'approche encourage l'adoption de mesures relativement simples pour protéger la santé à tous les maillons de la chaîne alimentaire.

1.1.2. Recommandation USEPA

L'USEPA (United States Environmental Protection Agency) a publié en 1992, en collaboration avec l'USAID (United States Agency of International Development), ses propres recommandations sur la réutilisation des EUT, intitulées « Guidelines for Water Reuse ». Contrairement à l'OMS, ces recommandations ne sont pas basées sur des études épidémiologiques ni sur une estimation du risque, mais sur un objectif de zéro pathogène dans les eaux réutilisées. Ces normes microbiologiques sont donc beaucoup plus strictes. Dans ces recommandations plusieurs paramètres sont pris en compte : le pH, la Demande Biologique

en Oxygène (DBO₅), la turbidité ou les solides en suspension et les coliformes fécaux (Belaid, 2010).

1.2. Réglementation algérienne

Décret exécutif n°93-160 du 10 Juillet 1993 qui fixe les normes rejet spécifique à la réutilisation des eaux usées en agriculture (Hannachi, 2013).

Loi 05-12 de 4 août 2005 relative à l'eau fixe les principes et les règles applicables pour l'utilisation, la gestion et le développement durable des ressources en eau en tant que bien pour la collectivité nationale (Abbou, 2010).

Décret exécutif n° 07-149 du 3 Joumada El Oula 1428 correspondant au 20 mai 2007, susvisé, le présent arrêté a pour objet de fixer les modalités de la réutilisation des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation (Annexe 9 et 10). Les principaux axes de ce décret sont les modalités de concession d'utilisation des EUE, les risques liés à l'usage des EUE (interdictions, distance à respecter...), les contrôles sanitaires, le cahier des charges-type relatif à la REUE (J.O.R.A.D.P. 2012).

2. Bienfaits et défauts de la réutilisation des eaux épurées

Les applications de la réutilisation des eaux usées traitées sont nombreuses, qu'il s'agisse d'irrigation agricole, utilisations urbaines (nettoyage, espaces verts), industrielles (refroidissement, protection contre les incendies), d'usages récréatifs, d'entretien d'habitats naturels et de zones humides, ou de recharge de nappe (Ringot, 2010). D'après Mozas et Ghosn (2013), l'utilisation des eaux traitées peut bénéficier aux municipalités (espaces verts, lavage des rues, lutte contre les incendies, etc.), aux industries (refroidissement) et au renouvellement des nappes (protection contre l'intrusion des biseaux salés en bord de mer) et permet de lutter contre la pollution des ressources en eau (oueds, barrages, nappes phréatiques, etc.).

Les avantages de la réutilisation des eaux usées sont reconnus par de nombreux pays, ils sont inscrits dans leurs schémas directeurs de l'eau et dans leur politique nationale (Tamrabet, 2011). D'après F.A.O. (2003), Mozas et Ghosn (2013), la réutilisation apporte une contribution à la conservation de l'eau et de l'énergie et améliore la qualité de la vie, elle peut avoir un impact environnemental positif (Sols et Eaux souterraines), à côté de rendements agricoles accrus. Cependant, la réutilisation de l'eau usée peut également avoir des effets néfastes sur l'environnement et la santé publique.

Selon Mozas et Ghosn (2013), l'utilisation des eaux usées pour l'irrigation ajoute des nutriments, des matières solides dissoutes, des sels et des métaux lourds au sol. Au fil du temps, des quantités excessives de ces éléments peuvent s'accumuler dans la zone racinaire

avec des effets probablement nocifs sur le sol, de plus, l'utilisation à long terme des eaux usées pourrait provoquer une salinité des sols, leur engorgement, l'effondrement de leur structure, la réduction globale de leur capacité productive et une baisse des rendements agricoles. Parallèlement, l'utilisation des eaux usées a le potentiel aussi bien de recharger les nappes d'eau souterraines (externalité positive) que de polluer les ressources en eaux souterraines (externalités négatives). La percolation de l'excès de nutriments, des sels et des pathogènes présents dans le sol peut entraîner la dégradation des eaux souterraines. Toutefois, l'impact réel dépendra d'un ensemble de facteurs, et notamment l'ampleur de l'utilisation des eaux usées, la qualité des eaux souterraines, la profondeur de la nappe phréatique, le drainage du sol et les caractéristiques du sol (par exemple poreux, sablonneux). Dans les zones irriguées par des nappes d'eaux souterraines peu profondes, l'impact de l'irrigation par les eaux usées traitées de façon inadéquate sur la qualité des eaux souterraines est susceptible d'être considérable.

3. Réutilisation des eaux usées en Algérie

L'accroissement de la demande en eau pour la consommation humaine, industrielle, agricole et les sécheresses répétées, ont sensibilisé les décideurs à considérer les eaux usées comme une ressource hydrique appréciable, d'où la nécessité de réfléchir à un programme national d'épuration et de réutilisation des eaux usées (Abbou, 2010). Parmi les grands objectifs de la politique de gestion du secteur de l'eau, figurent la réhabilitation et la réalisation des systèmes d'épuration des eaux usées des zones agglomérées dont la population est supérieure à 100 000 habitants et des agglomérations situées à proximité des périmètres agricoles et des agglomérations à haut risque de pollution environnemental (Tamrabet, 2011). D'après le M.R.E (2018), l'Algérie a franchi de grands pas en matière de raccordement aux réseaux d'assainissement dont le taux est de 91% à travers le territoire algérien.

Selon O.N.A (2019), durant l'année 2019, un volume de 12.325.269 m³ d'eaux épurées a servi à l'irrigation de 11.045 hectares de terres agricoles, soit un taux de la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture (REUE) de 31 % du volume épurée. En revanche, le potentiel de la réutilisation des eaux usées épurées à des fins agricoles évoluera d'une manière significative, durant l'année 2020, où sur les 154 stations d'épuration exploitées par l'O.N.A. (STEP) à travers les 44 wilayas, 16 stations sont concernées par la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture. Le parc national des stations d'épurations est constitué de 154 STEP, dont 76 stations à traitement intensif (boues activées), 75 stations à traitement extensif, (par lagunage aéré ou naturel) et 03 stations d'épuration à filtres plantés.

4. Agriculture de la cuvette de Ouargla

4.1. Agriculture Oasienne

Les oasis sahariennes ont toujours constitué des espaces de vie ponctuels, exigus et dispersés. Elles étaient liées aux ressources hydrauliques superficielles et ou sub-superficielles. La seconde moitié du 20^{ème} siècle a introduit tout à la fois la connaissance de ressources profondes et les moyens pour les exploiter ce sont les prospections pour les hydrocarbures qui ont entraîné la découverte d'aquifères profonds au Sahara (Cote, 1998).

Le palmier dattier représentait pour les populations oasiennes le pivot de leur vie. Il assure une source d'alimentation, une rente commerciale, un matériel de confection et d'artisanat, et est utilisé dans la lutte contre l'ensablement. Actuellement, l'industrie pétrolière au Sahara et l'économie de marché ont perturbé la vie socio-économique et culturelle, avec un délaissement de la phœniciculture (Daddi Bouhoun, 2010).

La palmeraie de Ouargla a connu une extension maximum vers 1958, c'est l'année de réalisation du premier forage Albien. Ce développement s'est poursuivi avec le début du pompage de la nappe Mio-pliocène en 1962. A cette date la surface moyenne de la palmeraie était estimée à 2321,04 ha environ. A partir de 1971 et suite à l'exode rurale et une démographie galopante urbaine (de la ville de Ouargla), les premiers signes de destruction de la palmeraie au profit de l'urbanisation ont fait leur apparition. L'un des faits marquants, est la réalisation de certains grands projets dans la palmeraie, à savoir le projet de l'hôpital Boudiaf, la construction du stade 24 février et l'apparition de quartiers résidentiels. Les cités de Gharbouz, de Gara Nord et les lotissements Saïd Otba occupent une superficie dépassant 180 ha. Ajoutons à ce phénomène, la saturation du chott ; lieu de rejet de toutes les eaux de l'agglomération qui a provoqué la destruction d'une partie de la palmeraie vers le début des années quatre-vingt (Touil, 2003). Toutefois, d'après Daddi Bouhoun (2010), nombreuses palmeraies traditionnelles sont délaissées à cause de la remontée des eaux de drainage et de la salinisation des sols. Les palmeraies traditionnelles présentent des cultures intercalaires : arboriculture (figuier, olivier, abricotier), cultures fourragères (luzerne, orge et sorgho) et des cultures maraîchères.

4.2. Agriculture de Mise en valeur

Selon le dernier recensement de la D.P.A.T. de Ouargla (2019), la surface agricole totale (S.A.T) est allée de 868 497 ha en 2012 à 1 368 225 ha en 2019 dans la cuvette, parallèlement, la surface agricole utile (S.A.U.) allé de 10 023 ha en 2012 à 21 260 ha en 2019. En revanche, pendant la campagne agricole 2018/2019, cette dernière est subdivisée

entre les terres labourables qui présentent 12 580 ha et les cultures permanentes présentent 9 776 ha, dont Palmeraie 9273 ha et arboriculture fruitière 503 ha.

L'effectif du palmier dattier est évalué à 1 057 623 palmiers dans toute la cuvette, dont 844 426 palmiers en production (D.P.A.T., 2019). Les besoins en eaux d'irrigation de la palmeraie de Ouargla, estimés approximativement à 20 000 m³/ha/an (Bonnard et Gardel, 2003). L'introduction des eaux usées épurées pour satisfaire les besoins de la palmeraie en eaux d'irrigation peut être une solution envisageable afin de réserver les eaux de bonne qualité aux d'autres exploitations. Cependant Daddi Bouhoun (2010), a signalé que l'irrigation avec des eaux à forte salinité cause l'accumulation des sels dans le sol. Cette situation, conjuguée à la présence d'une nappe phréatique superficielle, aboutie à la diminution de rendement de palmier dattier et à la production des dattes de qualité médiocre.

Les superficies réservées à la mise en valeur sont estimées à 27 868 ha pour la totalité de la cuvette de Ouargla dont 12 424 ha sont réellement cultivés (D.P.A.T., 2019). Dans ces nouvelles zones agricoles, la phœniciculture est toujours les cultures dominantes. En revanche, quatre principales catégories des cultures sont pratiquées, les grandes cultures, les cultures fourragères, les cultures de plain champs et la plasticulture.

L'élevage camelin, caprin et ovin à Ouargla est une activité ancienne, elle a pris de l'ampleur avec les subventions de l'état, ces dernières ont touché aussi l'aviculture et l'élevage bovin. Les derniers recensements du D.P.A.T. en 2018 déclarent que pour les élevages camelins, caprins, ovins et bovins, le nombre des têtes pour toute la cuvette été successivement 16669, 74918, 56278, 217 têtes.

5. Réutilisation des eaux épurées à Ouargla

La pratique de réutilisation des eaux épurées dans la région de Ouargla est très récente. Après la mise en œuvre de la station d'épuration de la ville, quelques tentatives de création des périmètres de mise en valeur ont été menue dans la zone. Successivement, des travaux de recherches ont été menue dans cette zone afin d'expérimenter les possibilités de la réutilisation agricole des eaux épurées évacuées par la station ; on cite les travaux de Bouhanna, 2014 ; Bouhanna et *al.* 2015 ; Nader, 2014 ; Ngais, 2014). Actuellement cette pratique est presque inexistante dans la zone, cela est due aux nombreuses causes principalement la manque de coordination entre les différentes autorités concernées par le sujet de valorisation des eaux non conventionnelles (DSA, ANRH, DHW...ect).

Conclusion

La cuvette de Ouargla se situe dans une dépression sans exutoire, se caractérisé par un climat saharien, où des amplitudes thermiques importantes durant presque toute l'année sont constaté, avec des précipitations rares et irrégulières à travers les années. Ces conditions rendre l'irrigation obligatoire pour toute processus de production agricole. De plus, la forte évaporation favorise l'augmentation des besoins en eaux d'irrigation ainsi que l'accumulation des sels salines dans les sols cultivés notamment pendant la période estivale.

L'accroissement démographique et la création de nouveaux périmètres de mise en valeur ont conduit à la recherche de nouvelles ressources en eau conventionnelles de complexes terminales, et de continentale intercalaires. Où cet excès d'eaux favorise le gonflement de la nappe phréatique superficielles située dans les dépôts du Quaternaire sableuse. D'un autre côté, pour atténuer cette remonté des eaux phréatiques constaté dans la région il est recommandé d'utiliser rationnellement les eaux potables et agricoles. Aussi, voir la possibilité de la réutilisation des eaux non conventionnelles usées et de drainage après traitement, afin de réduire l'utilisation des eaux fossiles albiennes et la recharge de la nappe phréatique.

Dans la région de Ouargla, les eaux usées épurées sont utilisées dans un seul périmètre agricole de façon illégale. A partir de ce constat problématique et la rareté des recherches dans la région sur la réutilisation agricole des eaux épurées, la présente étude s'impose pour apprécier la variation spatiotemporelle de cette pratique, en termes de qualité et d'impact agro-environnementales. Dans ce contexte, l'étude des effets sur les eaux phréatiques s'avère nécessaire pour déterminer le niveau de dégradation de cette nappe superficielle de point de vue physique, physicochimique, chimique et biologique. Toutefois, vue le niveau des eaux phréatique, toutes dégradations peuvent avoir des conséquences sur la pérennité de la phœniciculture, présentant un enracinement profond. De plus, d'autres incidences négatives de la nappe phréatiques favorisent la dégradation des sols oasisien par hydromorphie et la chute des rendements.

Partie II :
Matériels et
Méthodes

Chapitre IV. Matériels d'étude

1. Choix de la région d'étude

Nous avons choisi de réaliser notre travail de recherche dans la cuvette de Ouargla, vue l'existence d'une nappe phréatique peu profond, ainsi que la pratique de la réutilisation agricole des eaux épurées. Cette région est connue parallèlement par les problèmes de salinisation par remontée des eaux phréatiques et l'irrigation-drainage sont peu efficace. La nappe phréatique dans la région de Ouargla est vulnérable vis-à-vis la pollution selon Guendouz et *al.*, 1992 ; A.N.R.H., 1994 ; Hamdi-Aïssa et Fedoroff, 1997 ; Djidel et *al.*, 2008 ; Djidel, 2008 ; Slimani, 2006. Slimani et Guendouz, 2015 aussi Slimani, 2016.

2. Choix de la zone d'étude

Notre étude expérimentale a été réalisée dans la cuvette d'Ouargla où se pose le problème de la dégradation de l'environnement hydro-édaphique par la remontée des eaux phréatiques suite aux rejets des eaux excédentaires dans un milieu oasien sans exutoire. Une solution a été proposée pour résoudre ce problème par le pompage des eaux excédentaires, le traitement des eaux usées dans une nouvelle station d'épuration au nord de la cuvette, et l'évacuation de toutes ces eaux vers Sebkhet Sefioune. Au nord de la station d'épuration, une nouvelle tentative de valorisation agricole des eaux traitées a débuté ces dernières années dans un périmètre de mise en valeur en amont de la station.

Pour apprécier les impacts spatiotemporels de l'irrigation par les eaux usées épurées dans une région désertique connue par leurs contraintes hydro-édaphiques, notre recherche est menée dans le périmètre de mise en valeur situé au nord la station d'épuration des eaux usées de Ouargla. Les sites d'études (Fig. 10), couvrent plusieurs périmètres présentent des modalités d'irrigation différentes. D'autre coté, notre étude a été réalisée en trois compagnes, entre 2015 et 2019. L'approche méthodologique adoptée pour la réalisation de cette étude est expliqué au chapitre V.

3. Présentation des sites d'études

3.1. Présentation de la station d'épuration

La station d'épuration des eaux usées de Ouargla est localisée dans la zone de Saïd Otba au Nord-est de Ouargla à l'amont de la station de refoulement principale entre les deux branches du drain principale (Bonard et Gardel, 2004). La station d'épuration s'étend

sur une superficie de 80 ha. Elle a été mise en service en 2009, elle a été réalisée par la société allemande Dwydag pour le compte de l'ONA. La station d'épuration des eaux usées de Ouargla est constituée de 08 bassins devisés en 03 niveaux avec 11 lits de séchage. Elle fonctionne selon le principe du lagunage aéré. A une capacité de 400.000 équivalent /habitant jusqu'à 2030, elle est dimensionnée pour un débit moyen de 74 027 m³/jour jusqu'à 2030.

En fin de 2019, le volume des eaux brutes arrivant à la station d'épuration de Ouargla est estimé à 11 680 000 m³/an, sur la base de 32000 m³/jour. Le volume de l'eau rejetée vers l'exutoire est évalué à 5 745 000 m³/an sur la base de 15000 m³/jour. Ce volume déclaré est faible par rapport à la capacité de la station, cela est lié aux aménagements des stations des relevages réalisées dans la ville de Ouargla.

3.2. Procédé de traitement des eaux usées

La station d'épuration des eaux usées de Ouargla fonctionne sur la base du procédé, de traitement biologique extensif par lagunage aéré. Le procédé de traitement est réalisé en plusieurs étapes, comme suit (STEP de Ouargla, 2012 : Bouhanna, 2014) :

1. Amenée des eaux usées à l'entrée de la station : Les eaux brutes arrivent à la station d'épuration par la baie de cinq stations de refoulement des régions du Chott, de Sidi Khouiled, du Ksar, de Douane et de la route N'Goussa (A ; photo 2).
2. Traitements préliminaires par le dégrillage et le dessablage qui subissent les eaux brutes afin de ne pas perturber le bon fonctionnement de la station d'épuration par des matières lourdes volumineuses ou difficilement biodégradables (B1 et B2 photo 2).
3. La deuxième phase est la phase d'aération, les eaux brutes sont déversées en amont dans 06 bassins de traitement par la baie d'un répartiteur (C ; photo2), Dans ces bassins la charge biodégradable de l'effluent est détruite par voie bactérienne en présence d'une aération mécanique du milieu (D ; Photo 2).
4. La phase de désinfection, appelées aussi lagunes de finition, son rôle est de réduire à des teneurs très basses les polluants peu ou pas éliminés (E ; Photo 2).
5. Le curage des boues se fait mécaniquement par pompage sur les lits de séchage (G ; photo2).
6. L'évacuation des eaux épurées vers l'exutoire qui est Sebkhet Sefioune (F ; photo2).

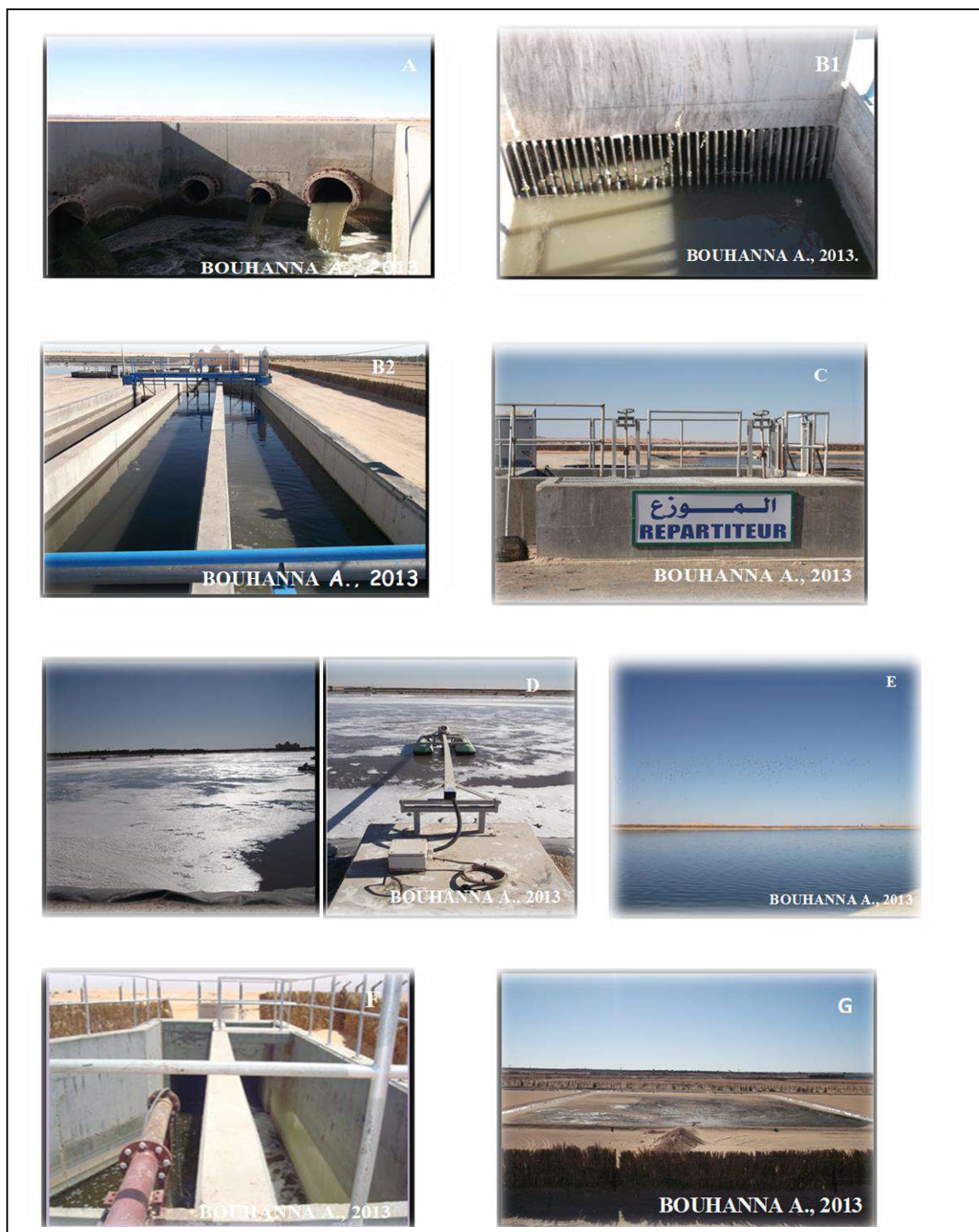


Photo 2. Etapes de traitement des eaux usées dans la station d'épuration de Ouargla

D'après Bonnard et Gardel (2004), les principaux objectifs de l'épuration de l'agglomération de Ouargla définis dans plan directeurs sont :

- Supprimer les nuisances et les risques actuels de contamination au niveau des zones urbanisées ;

- Protéger le milieu récepteur ;
- Se garder la possibilité de réutiliser les effluents épurés pour une irrigation restrictive.

3.3. Gestion de la station d'épuration de Ouargla

Le procédé de traitement par lagunage aéré est retenu pour l'épuration des eaux usées de la station d'épuration de Ouargla à cause de nombreuses raisons à savoir la disponibilité de l'espace pour l'installation de projet avec une topographie presque plane, ainsi que les conditions climatiques qui peuvent favoriser l'épuration des eaux (températures élevées et faibles précipitations).

Les eaux brutes arriveront à la station d'épuration par l'intermédiaire de conduites de refoulement, où ces conduites déboucheront dans un regard de dégazage. A partir de ce regard, les eaux brutes débouchent dans un canal regroupant les installations de dégrillage et de dessablage, cette phase est le prétraitement des eaux usées. Le système comprend un ensemble de 2 dégrilleurs automatiques disposés en parallèle. Ces ouvrages sont encastrés dans des chenaux en béton. Le dessablage sera réalisé par l'intermédiaire de trois canaux en parallèle de 2 m de large et 23m de long., où une pompe permettra l'extraction des sables vers un classificateur à sable. Successivement, en tête de station en aval des ouvrages de prétraitement, les effluents sont répartis entre les six lagunes du premier étage grâce à 1 répartiteur. Les eaux en cours de traitement transitent de façon gravitaire des lagunes aérées 1 vers les lagunes aérées 2 puis vers les lagunes de finition.

L'aération des eaux au niveau des lagunes de premier et deuxième étage s'est faite par la baie d'un système d'aération artificielle qui assure l'oxygénation des eaux usées ; il s'agit d'aérateurs flottants. En lagunage aéré, la majorité de l'oxygène utilisée par la biomasse épuratrice pour dégrader la pollution organique est apporté artificiellement grâce au fonctionnement d'aérateurs, ces aérateurs jouent aussi un rôle de brassage de la masse d'eau afin de permettre la diffusion de l'oxygène dans l'ensemble du volume de la lagune. La maintenance des équipements d'aération (révision, réparation...) est estimée à un coût annuel représentant 2% de l'investissement initial des équipements entretenus.

Les eaux épurées seront évacuées gravitairement vers le canal de drainage Est. Il est prévu dans ce projet de créer un piquage sur la conduite de sortie pour des besoins de réutilisation agricole. Cependant jusqu'à ce jour il n'avait aucune véritable initiative d'après les pouvoir public de création de sites légale de réutilisation agricole des eaux

épurées dans la zone. En revanche, quelques essais de réutilisation agricoles de ces eaux sont pratiqués sous serres au niveau de la station d'épuration de Ouargla.

D'un autre côté, la technique de déshydratation naturelle des boues sur les lits de séchage est adoptée dans ce projet. Le système consiste à sécher les boues à l'air libre sur des lits constitués d'une couche de sable lavé surmontant une couche de granulométrie plus importante, incluant le réseau de drainage. La gestion des boues concerne le curage et l'évacuation des boues sèches, selon Bonnard et Gardel (2004), le planning prévisionnel de curage des boues est fait avec une fréquence d'environ une fois tous les trois ans. En revanche, cette fréquence n'est pas réellement pratiquée dans la station, jusqu'à ce jour les boues sont collectées occasionnellement.

Concernant le suivi de la qualité des eaux, la station est équipée d'un laboratoire pour le suivi du fonctionnement de l'installation. D'après l'étude la surveillance du fonctionnement de l'épuration est réalisée par la mise en place d'un suivi analytique. Le bilan d'analyse porte DCO, DBO₅, MES, NTK, PT et CF hebdomadaire entrée et sortie station est nécessaire. D'après nos études et investigations la réalisation de ce bilan est effectué en fonction de la disponibilité des moyens, on y constate qu'aucun suivi de la qualité microbiologique des eaux de rejet est effectué à part quelques travaux de recherches universitaires réalisées ainsi que le suivi de la charge organique et les taux d'abattement n'est pas constantes.

3.4. Présentation de périmètre agricole

3.4.1. Situation géographique

Notre étude est menée au niveau du périmètre agricole de mise en valeur situé au nord de la station d'épuration d'Ouargla (32°0 00 et 32°2 00 N et 5° 21 00 et 5° 23 00 E) (Fig. 10). Notre périmètre s'étalant sur une superficie d'environ soixante-dix hectares. Cette nouvelle zone, où une section des agriculteurs a utilisé les eaux épurées évacuer par la station d'épuration à des fins agricoles est considérée comme un intervalle d'expérimentation, surtout pour la phœniciculture irriguée par les EUE.

Nous avons choisi ce périmètre pour la réalisation de cette étude selon leurs critères souhaités répondent aux objectifs de cette recherche, notamment la présence des périmètres ayant des différentes modalités d'irrigation (la pratique de réutilisation agricole des eaux épurées et les eaux conventionnelles), ainsi que nos connaissances collectées à travers notre travail de magister au niveau de même zone qui nous a permis d'exploiter le maximum des données disponibles.

3.4.2. Choix des sites d'étude

Le travail réalisé dans le périmètre agricole a concerné une section de celui-ci (Fig. 10), composé de trente-trois stations dont dix-sept stations irriguées par les eaux usées épurées, douze stations irriguées par les eaux conventionnelles et quatre stations non irriguées utilisées comme stations témoins (Photo 3). Notre recherche est effectuée en plusieurs étapes successives, qui seront expliqués ci-dessous. Ce choix des sites d'études est effectué selon plusieurs critères à savoir le niveau statique de la nappe phréatique dans le site. Le mode d'irrigation et les pratiques culturales adoptés dans les exploitations.

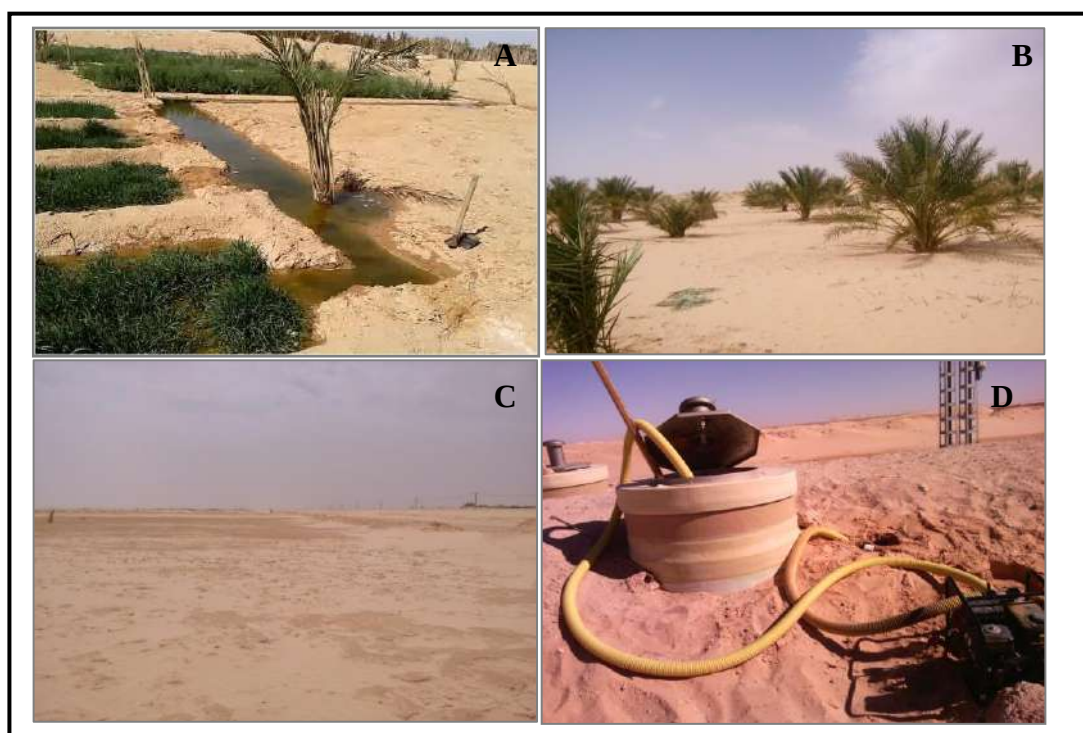


Photo 2. Modalité des sites dans la zone d'étude (A. Irriguées par les eaux épurées ; B. périmètre agricole irriguées par les eaux conventionnelles ; C. Station non cultivés ; D. Pompage des eaux épurées du canal)

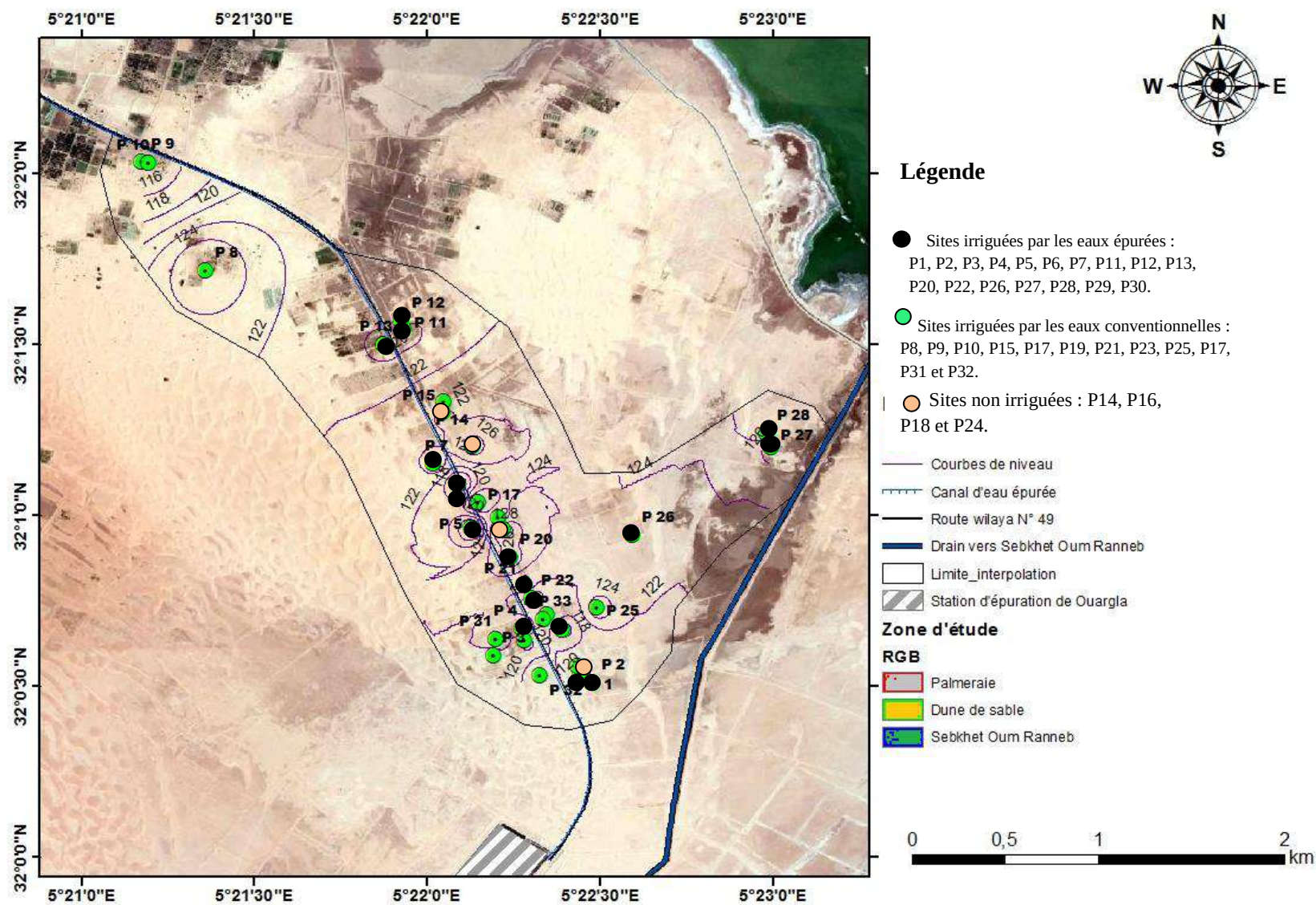


Figure 10. Zone d'étude

3.4.3. Environnement des sites d'étude

Le périmètre ciblé pour la réalisation de cette étude est limité par la palmeraie de Ain Moussa au Nord, par la station d'épuration des eaux usées de Ouargla au Sud, par Sebkhet Oum Erraneb à l'Est et à l'Ouest par les dunes de sables et la route Wilaya N°49 (Fig. 10). Cette zone présente une morphologie plane. Les palmeraies sont des propriétés privées, individuelles, avec des écartements entre palmiers variant entre 9 à 10 m. Les superficies des exploitations cultivées varient entre 2 et 4 hectares. Les brise-vents sont rudimentaires, les débris de palmier dattier (Djérid) peu efficaces. En revanche, les exploitations non irriguées constituent des grandes surfaces planes dépassant les 4 hectares en majorité. Les exploitations sont installées dans la zone depuis 2002. Notre section des périmètres choisis est installée entre 2002 et 2012.

Dans cette zone, deux modes d'irrigation sont pratiqués, l'irrigation par les eaux usées épurées pompées directement du canal de transfert des effluents de la STEP de Ouargla vers Sebkhet Sefioune (Photo 2, D), et l'irrigation par les eaux conventionnelles des forages.

En revanche, aucun système de drainage agricole n'est installé dans la zone, la chose qui peut influencer la remontée de niveau de la nappe phréatique. Le niveau statique de cette nappe superficielle dans la zone ciblée située entre 0 à 3 m. le tableau N°VI résume quelques caractéristiques hydro-chimiques de la nappe phréatique dans la zone d'étude d'après les campagnes d'analyses de l'agence nationale des ressources hydrauliques (A.N.R.H) entre 1996 et 2013.

Tableau VI. Caractéristiques hydro-chimiques de la nappe phréatique dans la zone de Saïd Otba entre 1996 et 2013

Compagnes Caractère	Juin- 1996	Novembre- 2003	Avril 2007	Mai- 2008	Juillet- 2009	Octobre- 2010	Mars- 2012	Juin- 2013
NS (m)	1,6	1,43	1,48	2,01	1,05	1,44	1,47	1,58
RS (mg/l)	391630	/	386356	181806	419408	207552	363660	/
CE (ms/cm)	/	203	164,7	179,5	173	156,5	171,5	199,9
pH	6,8	/	7,84	7,77	8,05	6,76	6,1	/
NO ₃ (mg/l)	/	0	0	/	/	1,5	0	/

Les études effectuées par l'agence nationale des ressources hydrauliques, sur les piézomètres de la zone de Saïd Otba, montrent que les eaux phréatiques sont très excessivement salées. Le pH est neutre à alcalin, peu profond et pauvre en nitrate.

D'après nos travaux de recherche, le sol des sites d'études a une texture sableuse (Bouhanna, 2014). La composition granulométrique de ces derniers est 69,38% à 60,09% sable grossiers, 38,36% à 29,03% sable fin, avec l'existence des horizons sablonneux-

limoneuse dans le sous-sol. Cette observation est confrontée par d'autres travaux réalisés dans la zone (Nader 2014 ; Ngais, 2014). Les concentrations moyennes de gypse dans les sols de périmètre d'étude sont inférieures à 0,52% et pauvres en azote totale et assimilables et en matière organique (Bouhanna, 2014).

3.4.4. Gestion des exploitations

Notre périmètre d'étude constitue la première initiative de la réutilisation agricole des eaux épurées dans la région de Ouargla. Quoique, cette pratique est illégale d'après l'office national d'assainissement et la direction des services agricole de Ouargla, mais reste un pas de valorisation de ces eaux non conventionnelles. En revanche, et avec la qualité médiocre de ces eaux, seuls quelques cultures sont pratiquées dans la zone. Les systèmes de production phœnicicoles et fourragère, sont les plus dominants suivant nombreuses raisons dont les principaux sont l'adaptabilité de ces cultures à la nature du sol sablonneux et les eaux salées. Les dunes de sables représentent les formes morphologiques les plus observées. Le caractère d'halomorphie et hydromorphie sont répandus dans cette zone (Photo 4).

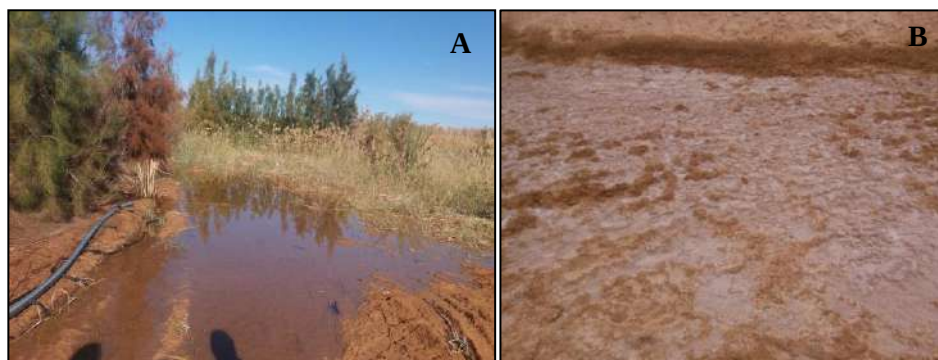


Photo 3. Morphologie du sol

Caractère d'hydromorphie (A) ; halomorphie des sols (B)

Concernant la fertilisation. Il est répondu que les sols sahariens connus par leurs structures particulières et leurs fragilités ainsi que leurs pauvretés en éléments fertilisants, ce qui implique l'utilisation des apports organiques et minéraux. Dans notre zone d'étude, la fertilisation organique est dominante et la quantité apportée diffère d'une exploitation à une autre. D'autres agriculteurs pratiquent les deux types de fertilisation organique et minérale. Ils utilisent les engrais composés (NPK) de façon principale. D'autre part, les pratiques culturales ainsi que tous les travaux au niveau de l'exploitation sont majoritairement réalisés par la main d'œuvre familiale (Bouhanna et al, 2015).

3.4.5. Gestion de l'irrigation

D'après nos travaux de recherche réalisés dans la zone d'étude, deux types des eaux d'irrigation sont utilisées dans la zone d'étude, les eaux usées épurées ou eaux non conventionnelles pompés du canal avec des moteurs vers les exploitations (Photo 2), et les eaux normales ou les eaux conventionnelles qui sont exploités par des forages collectives de la nappe du Miopliocène, dont la profondeur varient de 60 à 80 m. il faut signaler que le choix de l'irrigation avec les eaux usées épurées par les agriculteurs est fait en fonction de quelques raisons à savoir le manque des moyens de réalisation des forages des eaux conventionnelles.

En ce qui concerne les systèmes d'irrigation, la gestion des eaux d'irrigation dans les parcelles agricoles est faite par la baie de deux systèmes d'irrigation. L'irrigation par submersion, technique d'irrigation ancienne, le plus présenté dans la zone d'étude, connue par le non économisations des eaux et les pertes sont considérables notamment par évaporation et infiltration. Ces pertes peuvent présenter des risques de contamination des eaux souterraines. L'irrigation par le système localisé qui est considéré comme un système économiseur des eaux est exploité dans les nouveaux projets de mise en valeur. Dernièrement, l'utilisation de ce système d'irrigation localisé a connu une extension assez notable surtout pour l'irrigation des palmiers et des arbres fruitiers. Parallèlement, selon Bouhanna (2014), les doses mensuelles des arrosages, la durée et la fréquence sont difficilement mesurer, car elles dépendent de la gestion des agriculteurs, variables entre les stations en fonction des saisons et les cultures. Bouhanna et *al.* (2015), a signalé qu'elles sont d'une à quatre irrigations par mois en hiver et d'une à trois irrigations par semaine en été. Il faut signaler à ce niveau que la pratique de l'irrigation dans la zone d'étude s'est fait d'une façon anarchique, aucun intérêt n'est donné par les agriculteurs aux besoins des cultures durant leurs cycles développement.

3.4.6. Biodiversité du périmètre d'étude

Les familles de la faune observés dans les exploitations sont : formocidae, Coléoptère Concernant la flore, les plantes spontanées halophiles sont les plus répondeur *tamarix gallica* (famille des *Tamaricaceae*), *Phragmites communis* (famille des poaceae) et *Zygophyllum album* (famille des *Zygophyllacée*) (Photo 5).

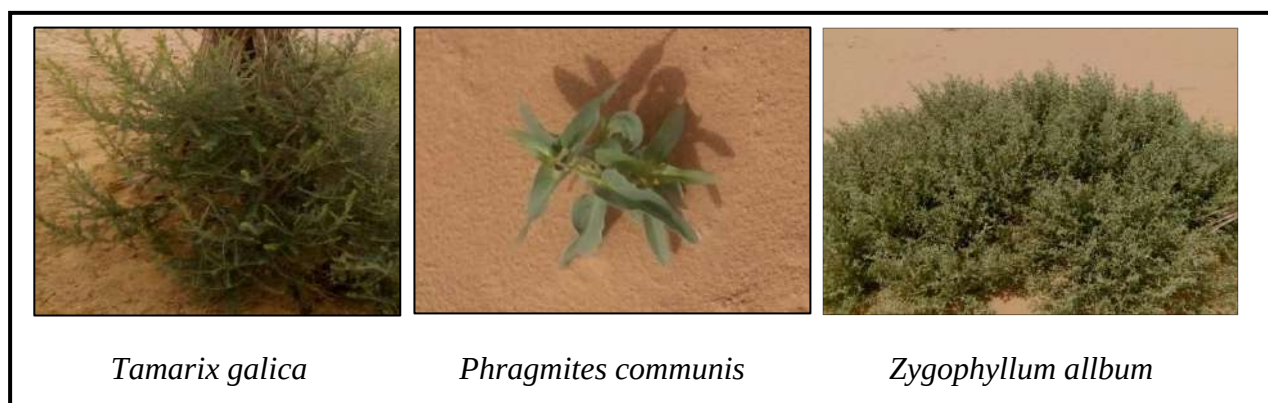


Photo 4. Flore des palmeraies

Un autre caractère est très observé dans le périmètre de mise en valeur Saïd Otba, notre zone d'étude est le caractère d'abondement des exploitations agricoles (photo 6), surtout les stations irriguées par les eaux épurées, cet abondement est dû aux nombreuses raisons à savoir la qualité médiocre des eaux d'irrigation épurées qui influencer le développement des pieds du palmier.



Photo 5. Station abandonné irriguées par les eaux usées épurés

3.4.7. Impact des eaux usées épurées sur le sol agricole

Quelques travaux de recherche réalisées dans la zone d'étude (Bouhanna, 2014 ; Nader, 2014 ; Ngais, 2014) ont montré que la réutilisation des eaux épurées a des effets sur les sols de la zone. D'après l'évaluation qualitative de l'effet de l'irrigation par les eaux usées traitées sur les sols du périmètre irrigué nord de la STEP de Ouargla réalisée par Bouhanna (2014), concernant la qualité physicochimique du sol (pH, salinité et la fertilité), l'irrigation par les eaux usées épurées semble avoir entraîné une légère diminution du pH eau du sol.

D'un autre côté, l'auteur a signalé que la pratique de réutilisation des eaux épurées pendant 3 à 4 ans a causé l'augmentation de la salinité du sol avec 1.096 dS/m par rapport aux sols irrigués par les eaux conventionnelles. Parallèlement, les sols des terrains nus dans la zone d'étude sont excessivement salés, cela est dû aux accumulations des sels grâce aux conditions du milieu saharien, connu par les grandes évaporations.

Parallèlement, les travaux de recherche réalisés dans la zone ont montré l'existence d'une tendance à l'accumulation des sels dans le sous-sol. Le lessivage des sels par dynamique descendante au niveau des sols irrigués est lié principalement au mode d'irrigation. La perméabilité du sol qui est améliorée par une texture sableuse dominant et l'absence de drainage dans les périmètres agricoles favorisent l'augmentation de la salinité et la sodicité des sols.

D'un autre côté, l'irrigation par les eaux usées épurées a entraîné une légère augmentation des teneurs des sols en carbone organique et les taux de matière organique, et a amélioré significativement le taux de phosphore assimilable dans les sols irrigués. Bouhanna (2014) a déclaré que l'augmentation des teneurs en phosphore dans les sites de réutilisation des eaux épurées est en rapport direct avec la mobilité du phosphore dans les sols. Il est répandu que les molécules de phosphore sont peu mobiles ce qui explique l'impact positif de l'irrigation par les eaux usées épurées sur les teneurs de cet élément dans les sols dans la zone d'étude.

Chapitre V. Méthodes d'étude

1. Approche méthodologique

Notre approche méthodologique consiste à caractériser les impacts de la réutilisation agricole des eaux épurées sur la nappe phréatique à Ouargla par la spécification des principaux paramètres physico-chimiques (salinité, sodicité et alcalinité), paramètres de pollution (matières azoté et matières phosphoré), charge organique (DBO₅ et DCO), charge en métaux lourds (Pb, Cu, Fe, Cr, Cd et Co), et la pollution microbiologique. Cette étude a été réalisée en plusieurs phases à savoir :

- 1. Phase I :** On y procédés à l'étude de la situation actuelle de périmètre à travers la réalisation des prospections administratives et au terrain, où on y procédés au choix des sites d'étude et l'installation des piézomètres ;
- 2. Phase II :** Etude de la gestion des eaux d'irrigation à travers l'étude de conduite de cette pratique au niveau de notre zone d'étude ainsi que la caractérisation de la qualité des eaux d'irrigation. Parallèlement on y procédés à l'étude de bilan hydrique aux niveaux des stations cultivées et irriguées.
- 3. Phase III :** On y intéressé par cette phase à l'étude de l'impact de l'irrigation avec les eaux épurées sur la nappe phréatique à travers une caractérisation de la variation spatiale et spatiotemporelles de la pollution de cette nappe phréatique. Six campagnes des analyses eaux sont réalisées entre 2015 et 2019 (Quatre campagnes hivernales et deux campagnes estivales) ;
- 4. Recommandation d'aménagement :** enfin à travers tous nos travaux dans la zone, on essayera de terminer par des recommandations d'aménagement pour la création des sites durables de réutilisation des eaux épurées dans la région de Ouargla.

1.1. Situation actuelle de périmètre

Des investigations administratives ont été menues au sein des structures concernées par la pratique de réutilisation agricole des eaux épurées à Ouargla, notamment la DSA et ONA. L'objectif de ces investigations est l'évaluation de niveau d'organisation de cette pratique sur le plan des pouvoirs publics. Les prospections sur terrain sont basées sur la réalisation des enquêtes au niveau des différents périmètres de mise en valeur, installés au nord de la station d'épuration de Ouargla. Ainsi que l'évaluation de la variation et la régression de l'importance de la pratique de réutilisation des eaux épurées, les difficultés et les défauts rencontrés pour ce projet.

Successivement, puisque la piézométrie est la méthode la plus utilisée pour étudier les nappes, c'est la méthode adoptée pour la réalisation de cette recherche. On y procède à l'installation des piézomètres dans le périmètre d'étude. Cette méthode est adoptée par Messaitfa et Chaich (2004). Les auteurs ont installé des piézomètres dans la région de Ouargla afin de suivre les fluctuations de la nappe phréatique dans la région.

Dans la zone d'étude on y procède à l'installation de Trente-trois piézomètre au niveau de trente-trois sites choisis. Le choix des sites expérimentaux au niveau de périmètre d'étude est réalisé en fonction de quelques paramètres à savoir :

- ❖ L'existence de la pratique de l'irrigation, site irriguée ou non irriguée ;
- ❖ La nature des eaux d'irrigation épurées ou eaux conventionnelles ;
- ❖ La durée d'épandage des eaux usées épurées ;
- ❖ Absence des croutes, ce choix s'est fait après plusieurs sondages à la tarière dans la station pour déterminer des meilleurs points d'échantillonnage ;

L'installation du piézomètre au niveau des sites d'étude est menée dans la zone d'étude après la réalisation des profils (Fig. 11 ; Photo 7). Ces profils sont creusés au niveau des stations choisis. Les solums réalisés ayant les dimensions suivantes, un mètre de largeur, un mètre de longueur et entre un mètre et un mètre vingt de profondeur suivant l'éloignement de surface de la nappe phréatique. Cette opération a de double objectifs, le rapprochement à la surface des eaux pour faciliter le creusement des piézomètres et la caractérisation de la morphologie des sols de la zone étude. Cette étape est succédée par l'étape d'enfouissement des piézomètres au niveau des profils réalisés.

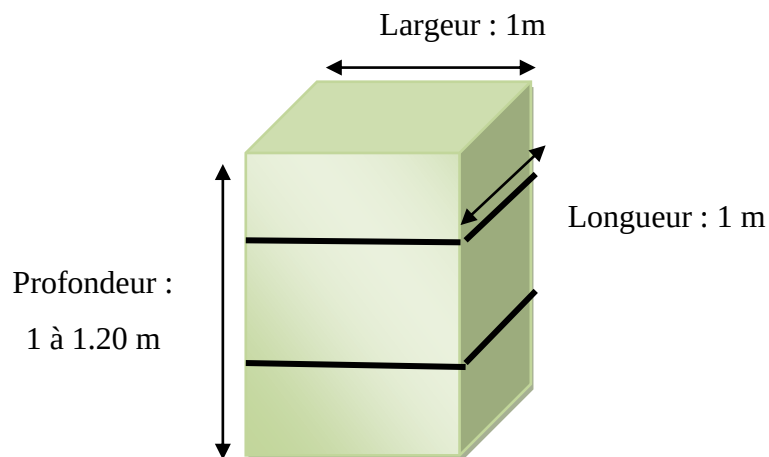


Figure 11. Modèle de profil réalisé

L'installation des piézomètres à des points fixés va nous permettre d'effectuer des mesures temporelles sur l'état des eaux phréatiques. Afin de les installer, des trous avec la

terrière sont réalisés aux niveaux des profils réalisés précédemment pour permettre à l'eau de ce rassembler. Cette opération est succédée par l'installation des piézomètres (Photo. 07) sont des tuyaux de 3 m de longueur et de 110 mm de diamètre. Finalement un GPS est utilisé pour le référencement des points d'échantillonnages des eaux. Ces piézomètres vont constituer les repères de suivi des eaux phréatiques à travers les campagnes d'étude.



A. Réalisation des profils

B. Profile réalisé

C. Installation des piézomètres

D. Piézomètre installé

Photo 6. Etapes de réalisation et installation des piézomètres

D'après l'A.N.R.H (2000), trois sortes de renseignements sont utilisées pour l'étude de la nappe phréatique, la profondeur de l'eau par rapport au sol qui permet de préciser les fluctuations des niveaux des nappes phréatiques, la piézométrie de la nappe qui donne le sens d'écoulement des eaux et les données des variations chimiques de l'eau. A travers

le présent travail, on y intéresser à une caractérisation des paramètres précités dans la zone d'étude.

Le suivi du niveau de la nappe phréatique au niveau de la zone d'étude s'effectue au moyen des piézomètres, ce sont des points d'accès à la nappe creusés dans chaque site dans lesquels on mesure le niveau de l'eau. De plus, les données sont utilisées pour créer des cartes piézométriques dans la zone, en utilisant les cotes piézométriques où

$$\text{Cote piézométrique} = Z - \Delta$$

Z : altitude en m prenez avec un GPS à la tête de tube

Δ : niveau hydrostatique de l'eau dans le piézomètre

1.2. Etude de la gestion des eaux d'irrigation

L'étude de la gestion des eaux d'irrigation est effectuée suivant plusieurs étapes, dont la première étape concerne l'étude de conduite de l'irrigation au niveau des sites d'étude à travers des enquêtes et des estimations en utilisant des méthodes empiriques.

La deuxième étape concerne l'estimation du bilan hydrique dans la zone d'étude. Le bilan hydrique permet de cerner plus précisément la notion de sécheresse. La sécheresse peut être reconnue de façon très approximative, lorsque les précipitations et les réserves d'eau capitalisées dans le sol ne compensent pas la capacité évaporatoire du sol et les besoins de la végétation qui représente l'évapotranspiration potentielle.

Le bilan étant le résultat d'une balance entre les apports ou entrées et les dépenses ou sorties. Ce bilan est donné par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I_e \dots\dots\dots \text{cité par Sedratti, 2011}$$

Où : P : précipitation moyenne annuelle en mm, ETR : évapotranspiration réelle moyenne annuelle en mm. R : ruissellement moyen annuel en mm, I_e : infiltration moyenne annuelle en mm.

A. Calcul de l'Evapotranspiration réelle : L'Evapotranspiration réelle (**ETR**) est appelée souvent déficit d'écoulement (**De**) (Sedratti, 2011), elle correspond à une perte effective d'une quantité d'eau par évaporation directe à partir du sol et par transpiration des végétaux. Cette quantité d'eau dépend à la fois de l'énergie et de la réserve hydrique disponible. Les méthodes d'estimation de l'ETR utilisées dans cette étude sont celles de Turc (1961), Elle est donnée par la relation suivante :

$$ETR = \frac{p}{\sqrt{0.9+P^2}/L^2} \quad (\text{Turc, 1961})$$

$$\text{Où} \quad L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

P : précipitation moyenne annuelle en mm, **T** : température moyenne annuelle (°C).

B. Estimation du ruissellement : en hydrologie, un ruissellement désigne la partie des précipitations qui s'écoule à la surface du sol pédologique. Il est la fraction de l'eau de pluie, ou d'eau d'irrigation retourne tôt ou tard dans une cour d'eau ou le réseau hydrique généralement par infiltration. Le ruissellement est donné par la méthode de de Tixeront, 1960.

$$R = P^3/3 ETP^2 \quad (\text{Tixeront, 1960})$$

R : ruissellement en mm ;

P : précipitation annuelle en m ; $P < 600\text{mm}$

ETp : évapotranspiration potentiel en m.

C. Estimation des ETp : L'évapotranspiration potentielle (ETp) est le maintien du taux d'humidité du sol à une valeur très voisine de sa capacité de rétention et d'un développement végétatif optimum (Ollier et Poirée, 1983). Pour notre cas d'étude, ce paramètre a été estimé par l'application de la méthode de Turc. Selon Beauchamp (2006), la formule de Turc pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle est exprimée comme suite :

$$ETp \text{ (mm/mois)} = k (T/(T+15)). (Rg+50)$$

- Où ;
- **T** : Température mensuelle moyenne ;
 - **Rg** : radiation solaire globale où le **Rg** = **Iga** (0,18+0,62 h/H) ;
 - **Iga**: radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère
h/H: durée réelle d'insolation/durée maximale possible (varie entre 1 et 0,1).
 Les valeurs mensuelles de Iga sont présentées dans l'annexe 11 pour les latitudes Nord ;
 - **k** = 0,37 pour février **k**=0,40 pour les autres mois.

Le choix de cette méthode pour calculer l'évapotranspiration potentielle de notre région d'étude a été effectué en fonction de quelques critères à savoir les formules sont applicables dans les zones arides et semi-arides, Permet les formules de calcul de l'ETp les plus utilisées dans le monde et en Algérie et enfin ces méthodes conviennent le mieux pour calculer l'ETp pour des périodes d'un mois ou plus (Doorenbos et Pruitt, 1975 ; Ollier et Poirée, 1983).

- D. **Infiltration efficace** : C'est la quantité d'eau qui parvient à la nappe. En effet au cours de son trajet, entre la surface du sol et la surface de la nappe, l'eau d'infiltration subit des pertes par l'évapotranspiration. Selon Sedratti (2011), D'après le bilan hydrologique l'infiltration efficace :

$$P+I = ETR + R + I_e$$

$$D'où : I_e = P + I - ETR - R$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle en (mm), **ETR** : évapotranspiration réelle en (mm/an),

I_e : infiltration efficace en (mm/an), **R** : ruissellement, **I** : Dose pratique d'irrigation (mm)

- E. **Estimation du Déficit agricole (DA)** : concernant l'estimation du déficit agricole (DA), qui représente la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux cultures (par l'irrigation) pour éviter sa souffrance. Il est donné par l'expression :

$$DA = ET_p - ETR$$

Où : **DA** ; déficit hydrique ;
ET_p ; évapotranspiration potentielle ;
ETR ; évapotranspiration réelle

- F. **Estimation des besoins théoriques en eau d'irrigation** : Pour la détermination des besoins en eau d'irrigation, en adoptant l'application de l'approche agrométéorologique décrite par Choisnel (1998). Cette approche consiste à évaluer les besoins en eau d'irrigation des plantes, qui sont essentiellement en fonction du climat. L'évapotranspiration maximale (**ETM**) d'une culture, c'est la quantité maximale d'eau qu'elle est susceptible d'évaporer lorsqu'elle est placée dans de bonnes conditions d'alimentation hydrique et pour un sol proche de la capacité au champ (Choisnel, 1998). Selon Ollier et Poirée (1983), la relation des besoins en eau d'irrigation d'une culture par mois s'écrit comme suite :

$$ETM \text{ (Besoins totaux en eaux)} = ET_p * K_c \text{ (Ollier et Poirée. 1983)}$$

Pour notre cas, trois cultures sont prises en considération, l'orge, la luzerne et le palmier dattier. Les coefficients culturaux (K_c) de ces derniers sont consignés dans l'annexe 12.

- G. **Estimation des doses pratiques d'irrigation** : L'estimation des doses pratiques a été déterminée au niveau des parcelles irriguées par les eaux conventionnelles et non conventionnelles par la mesure des débits en tête de parcelle, la fréquence des

irrigations, la durée d'irrigation et la dose d'irrigation par ha et par mois. La dose pratique est la quantité d'eau réellement appliquée dans les périmètres agricoles de mise en valeur nord de la STEP.

$$D = (Q \cdot T) / S \quad (\text{Ollier et Poirée, 1983})$$

Où : D : dose pratique d'irrigation (m³/ha)

Q : le débit d'irrigation (m³/s)

T : durée d'irrigation (s)

S : surface (ha)

Le calcul des débits en tête de parcelle est effectué par mesure directe de temps de remplissage d'un récipient d'eau avec volume connu. Le débit est obtenu par application de la formule suivante :

$$\text{Debit (D) (l/s)} = \text{Volume (L)} / \text{Temps (S)}$$

Les fréquences d'irrigation (F) sont des données d'enquêtes concernant les pratiques d'irrigation au niveau des exploitations.

La durée d'irrigation d'un ha est estimée par la méthode suivante : on y mesure le temps d'irrigation d'une superficie connue dans l'exploitation. La durée d'irrigation d'un ha (T) est obtenue ensuite par conversion par rapport à la première donnée. Finalement on y essayer de terminer par une petite comparaison entre les doses pratiques d'irrigation (I mm/an) et le déficit agricoles (DA mm/an), à fin d'évaluer c'est les quantités apporter sont satisfaisantes pour équilibrer ce dernier.

L'étude de la qualité des eaux d'irrigation dans la zone d'étude est effectuée à travers des prélèvements à partir de deux puits de la nappe Mio-pliocène dont la profondeur varie entre 60 et 80 m pour les eaux normales et l'échantillonnage directe du canal de transfert des eaux épurées vers Sebket Sefioune pour les eaux non conventionnelles. Les échantillons des eaux d'irrigation sont mis dans des bouteilles en polyéthylène clos et transportés au laboratoire, dans une glacière pour éviter les modifications et les changements de qualités que pourraient subir les échantillons.

1.3. Etude d'impact de l'irrigation par les eaux épurées sur la nappe phréatique

L'objectif de ce travail est la caractérisation de la variation spatiotemporelle de la qualité des eaux phréatiques dans la zone d'étude à travers les différentes stations de mesures installées, pour cela on y procédés à l'installation des piézomètres au niveau des sites expérimentaux dont la méthode d'installation est expliquée ci-dessus. Trente-trois piézomètres installés au niveau de trente-trois site choisi, dont dix-sept sites irrigués par les eaux épurées (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P11, P12, P13, P20, P22, P26, P27, P28, P29 et

P33), douze sites irrigués par les eaux conventionnelles (P8, P9, P10, P15, P17, P19, P21, P23, P25, P30, P31 et P32), et quatre sites non irrigués (P14, P16, P18 et P24) (Fig. 10 ; Page 64). Six campagnes d'échantillonnage des eaux phréatiques sont réalisées durant l'expérimentation dont quatre campagnes ont été effectuée pendant les périodes des hautes eaux et deux campagnes ont été réalisées pendant les périodes de basses eaux.

Selon Rodier et *al.* (2005), le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté, il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (gaz dissous, matières en suspension, etc).

Les prélèvements des eaux d'irrigation et de la nappe phréatiques sont réalisés de façon manuelle. En revanche, les eaux phréatiques ont été prélevées par un récipient adapté à l'ouverture des piézomètres et attaché à une tringle métallique. Les eaux prélevées sont mises dans des bouteilles en polyéthylène, revêtues avec du ruban adhésif noir pour empêcher toute détérioration des caractéristiques des eaux en présence de lumière (photo 8), identifiés, et accompagnés d'informations concernant la nature de l'échantillon. Les échantillons sont transférés dans une glacière au laboratoire.



Photo 7. Echantillonnage des eaux

L'étude de la qualité des eaux d'irrigation conventionnelles et non conventionnelles ainsi que la caractérisation de la qualité des eaux phréatiques est basée sur l'étude des fluctuations de la nappe phréatique et la variabilité physico-chimiques des eaux. On y procède à la réalisation des analyses suivantes : pH, conductivité électrique (C.E) et de bilan ionique (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ et Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), et les paramètres de pollution organiques (nitrates NO_3^- , ortho-phosphates PO_4^{3-} , DBO_5 , DCO , O_2).

Pour la caractérisation de la charge en métaux lourds des eaux phréatiques, On y procède à la réalisation des analyses des métaux Cu, Cr, Fe, Cd, Co et Pb. Un seul

prélèvement réalisé en fonction des moyens disponibles constitue de dix échantillons de la nappe phréatiques et deux échantillons des eaux d'irrigation conventionnelles et non conventionnelles.

Concernant la caractérisation de la qualité microbiologique des eaux phréatiques, deux campagnes de prélèvements ont été effectuées pendant les périodes des hautes eaux ; dont la première campagne réalisée en 18/12/2018, composée en totale de 11 échantillons (deux échantillons des eaux d'irrigations et neuf échantillons des phréatiques). Le deuxième prélèvement dans la zone d'étude est réalisé en 19/04/2019 composées de 16 échantillons dont deux échantillons des eaux d'irrigation et 14 échantillons des eaux phréatiques.

1.4. Interprétation des résultats

L'interprétation de nos données obtenues à travers ce travail est effectuée par la baie d'une analyse statistique et autre graphique.

A. Interprétation statistique

Les résultats obtenus à travers la présente étude sont exploités dans le cadre d'une analyse des variances ANOVA réalisé par Excel Stat. Cette analyse a pour objectif la mise en évidence des points communs et de dégager la diversité des modes d'exploitation dans la zone d'étude. Successivement, on y procéda à l'application de teste de Newman et Keuls pour bien illustrer le degré de signification entre les différentes modalités d'étude. Parallèlement une analyse factorielle Discriminante (A.F.D.) est réalisée. Cette technique statistique vise à décrire, expliquer et prédire l'appartenance à des groupes prédéfinis (classes, modalités de la variable à prédire, ...) d'un ensemble d'observations (individus, exemples, ...) à partir d'une série de variables prédictives (descripteurs, variables exogènes). Elle est exploitée dans de nombreux domaines notamment en biologie.

B. Interprétation graphique

Tous les graphes et les figures d'interprétations des résultats sont créés avec Excel 2007 ainsi le logiciel Origin 9. Parallèlement, les cartes piézométriques, les cartes de niveau statique de la nappe ainsi que les cartes de variabilité spatiale sont réalisées avec ArcGIS 10.3.

1.5. Recommandations d'aménagements

La durabilité des systèmes de productions agricoles nécessite la réunion de trois pôles agricoles, économique et sociale. Le pôle agricole concerne la disponibilité des facteurs de productions agricoles qui sont le sol, l'eau et les moyens fonciers. Parallèlement, les moyens disponibles pour l'exploitants doivent être exploités dans des

projets agricoles acceptables dans les sociétés pour assurées la disponibilité du marché de commercialisation des produits, ce qui traduit la rentabilité économique.

A la fin de notre présent travail, et avec l'exploitation de tous les résultats à travers nos recherches dans la zone d'étude on essayera de proposer des recommandations d'aménagement des projets de réutilisations agricoles des eaux épurées dans la région de Ouargla.

2. Méthodes des analyses

Durant notre travail, les analyses des eaux sont effectuées au niveau de plusieurs laboratoires :

- Laboratoire de recherche de géologie, centre de recherche scientifique,
- Laboratoires pédagogiques de l'université de Ouargla, faculté des sciences de la nature et de la vie,
- Laboratoire de l'Algérienne des eaux (ADE), Ouargla,
- Laboratoire des Analyses et de Contrôle de Ouargla (LAC),
- Laboratoire de GHIHABI Oued Souf,
- Laboratoire de CRSTRA Tougourt,
- Laboratoire de Catalyse et de Synthèse en Chimie Organique, université de Aboubekr Belkaid Tlemcen pour l'analyse des métaux lourds,
- Laboratoire de la prévention, Direction de la santé Ouargla pour la caractérisation bactériologique des eaux.

2.1. pH des eaux: Selon (Rodier et *al*, 2005) ; (Rodier et *al*, 2009), le pH (potentiel hydrogène) est une des caractéristiques fondamentales de l'eau. Le pH donne une indication de l'acidité d'une substance. Le pH de l'eau pure à 25°C, qui est égal à 7, a été choisi comme valeur de référence d'un milieu neutre. Sur le terrain, à chaque échantillonnage, nous avons effectué une estimation rapide de pH à l'aide d'un pH mètre manuelle (Multi 340i).

2.2. Conductivité Electrique : La conductivité est la mesure de la capacité de l'eau à conduire un courant électrique. Elle varie en fonction de la présence d'ions, de leur concentration en sels solubles par l'intermédiaire de la contribution de toutes les espèces ioniques présentes. La salinité est définie comme la quantité de sels minéraux qui se trouvent dissous dans la solution du sol. Plus la teneur en sels d'une solution est élevée, plus le courant électrique passe facilement, et donc plus la conductivité est élevée. La conductivité est mesurée avec la méthode électrométrie ; Norme NF T 90-031

2.3. Oxygène dissous : Les teneurs en oxygène dissous dans l'eau sont la résultante de flux de production (diffusion de l'oxygène atmosphérique, photosynthèse) et de flux de consommation (respiration, dégradation de matières organiques), s'effectue généralement directement dans l'eau au moyen d'un (Multi 340i), qui permet la création d'un léger courant d'eau à l'interface de la membrane semi-perméable de la sonde.

2.4. DCO : La méthode classique est utilisée pour déterminer la DCO. Qui correspond à la quantité de dioxygène nécessaire pour oxyder les matières oxydables dans certaines conditions. Le dichromate de potassium avec les sulfates d'argent en température 148C° (plus ou moins 3C°), avec des 1 ou 2 gouttes d'indicateur de ferriions et en termine par titration après refroidissement de reliquat avec solution de dichromate de sulfate de fer.

2.5. DBO₅ : Indique la quantité d'oxygène qui est utilisée pour la destruction de matières organiques décomposables par des processus biochimiques, il s'effectue selon le principe de la méthode manométrique. Une quantité d'eau est versée dans une bouteille reliée à un transducteur de pression. L'oxydation des matières organiques provoque la formation de CO₂ qui sera piégé par une solution de KOH. Ainsi, il se développe une dépression dans la bouteille. Et en présence d'inhibiteur, cette dépression est mesurée toutes les 24 heures, pendant 5 jours. Le DBO₅ est réalisé en se servant à la Norme NFT 90-103.

2.6. Sodium et potassium : Le dosage se fait à l'aide d'un spectrophotomètre à flamme ; le principe consiste à faire passer les solutions de la gamme d'étalonnage. Pour les extraits, dans des tubes à essais, introduire 2 ml de la solution à analyser et faire passer au spectrophotomètre à flamme. Le sodium et le potassium sont dosés à partir de la même solution à des sensibilités différentes du photomètre à flamme. Les courbes étalons construites à partir des solutions étalons donnent directement les tenures en Na⁺, K⁺ exprimés en mg/l d'échantillon.

2.7. Calcium et Magnésium : Le dosage se fait par méthode de volumétrie. Titrage par compléxométrie du calcium avec une solution aqueuse de sel disodique d'acide d'éthylène –diamine titracique (E.D.T.A) à un pH 10. Le noir érichrome qui forme avec le calcium et le magnésium un complexe rouge foncé ou violet est utilisé comme un indicateur (ADE., 2012).

2.8. Chlorures : Réaction des ions chlorures avec des ions argent pour former du chlorure d'argent insoluble qui est précipité quantitativement. Addition d'un petit excès d'ions argent et formation du chromate d'argent brun-rouge avec des ions chromates qui ont été ajoutés

comme indicateur. Cette réaction est utilisée pour l'indication du virage. Durant le titrage, le pH est maintenu entre 5 et 9.5 afin de permettre la précipitation (A.D.E., 2012).

2.9. Bicarbonates : Détermination des volumes successifs d'acide fort en solution diluée nécessaire pour neutraliser, aux niveaux de pH= 8,3 et 4,3, le volume d'eau à analyser. La première détermination sert à calculer le titre alcalimétrique (TA), la seconde à calculer le titre alcalimétrique complet (A.D.E., 2012).

2.10. Sulfates : Les ions sulfate sont précipités et pesés à l'état de sulfate de baryum. Les Réactifs utilisés sont : une solution de chlorure de baryum (BaCl_2) à 10%, une solution acide chlorhydrique (HCl) à 10% et une solution-mère de sulfates à 1g/l. L'appareil utilisé est le spectrophotomètre à la longueur d'onde 420nm (A.D.E., 2012).

2.11. Nitrates : En présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent du paranitrosoulate de sodium coloré en jaune et susceptible d'un dosage colorimétrique ; norme ISO N° 90 012. Dosé par spectrophotomètre d'absorption atomique à longueur d'onde 415nm.

2.12. Ammonium : Mesure spectrométrique à environ 655 nm du composé hypochlorite en présence de nitroprussiate de sodium selon la norme ISO N° 7150.

2.13. Phosphates : Formation en milieu acide d'un complexe avec le molybdate d'ammonium et les tartrates double d'antimoine et de potassium. Réduction par l'acide ascorbique en un complexe coloré en bleu qui présente deux valeurs maximales d'absorption l'une vers 700nm, et l'autre plus importante à 800 nm ; norme ISO N° 66878 (A.D.E., 2012).

2.14. Nitrite : Les nitrites sont dosés selon la méthode de Rodier, 1996. En présence de 50 ml d'échantillon et 1 ml de réactif mixte, et après repos de 20 minutes on précède au lecteur par spectrophotomètre d'absorption atomique à longueur d'onde nm.

2.15. Métaux lourds : Six éléments sont dosés (Cu, Pb, Cr, Fe, Cd et Co) par spectromètre à absorption atomique de type (PerKin element 73-099) (Photo 9), au niveau du laboratoire de catalyse et de synthèse en chimie organique université de Aboubekr Belkaid Telemcen. Les longueurs d'ondes utilisées sont respectivement ; 324nm, 283nm, 357 nm, 248 nm, 228nm, 240nm.

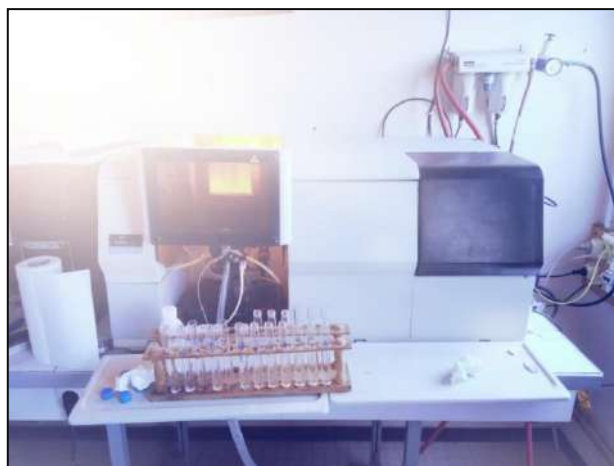


Photo 8. Spectrophotomètre d'absorption atomique

2.16. Analyses bactériologiques : Selon Rodier (1996), l'analyse bactériologique des eaux consiste à la recherche et le dénombrement des germes tests de contamination fécale, dont les plus connus sont les Coliformes fécaux (*Escherichia coli*), et les Streptocoques fécaux, les analyses bactériologiques sont réalisées au niveau du laboratoire de prévention Ouargla selon la Norme ISO 7218 -1996 (F) (la méthode de détermination du nombre le plus probable (NPP)).

Le principe de cette méthode repose sur l'incorporation de l'échantillon de l'eau et ses dilutions dans un milieu de culture liquide, conçu pour permettre la croissance des bactéries, cette croissance sera traduite par l'apparition des troubles du milieu et, éventuellement, une modification visible. Autrement dit, c'est une estimation de la densité bactérienne par application du principe de vraisemblance, à partir de réponses positives observées pour une ou plusieurs dilutions successives de la suspension bactérienne dans des milieux de culture. A travers cette analyse on y procédés à la recherche et dénombrement des coliformes totaux et fécaux, les streptocoques totaux et fécaux et clostridium.

- a. Recherche et dénombrement des coliformes totaux et fécaux :** sont des espèces de bactéries appartenant à la famille des Enterobacteriaceae. D'après Frank (2002), sont des Bacille à Gram négatif, non sporogones, oxydase négative, facultativement anaérobie, capable de croître en présence de sels biliaires ou d'autres agents de surface possédant des activités inhibitrices de croissance similaires, et capable de fermenter le lactose et le mannitol avec production d'acide et d'aldéhyde en 48 heures, à des températures entre 35 et 37°C°. La méthode de leurs dénombrements est basée sur l'inoculation de tubes en milieux liquides de coliformes totaux, Bouillon BCPL (bouillon lactose au pourpre de romocresol) + Cloche (Fig. 12). Les CF (ou coliformes thermo-tolérants), sont un sous-groupe des coliformes totaux capables de fermenter

le lactose à une température de 44,5 °C, l'espèce la plus fréquemment associée à ce groupe bactérien est *E. coli* et, dans une moindre mesure, certaines espèces des genres *Citrobacter*, *Enterobacter* et *Klebsiella*, la bactérie *E. coli* représente toutefois 80 à 90 % des Coliformes fécaux détectés, la présence de ces bactéries témoigne habituellement d'une contamination d'origine fécale (Benajiba et *al.*, 2013), le dénombrement des coliformes fécaux est réalisé par repiquage de BCLP + Cloche en eau peptone en ajoutant le réactif de Kovacs pour le test confirmatif (Fig. 12).

- b. Dénombrements des streptocoques totaux et fécaux :** Sont considérées comme streptocoques fécaux, toutes les bactéries Gram (+) de forme oblongue ou de cocci sphériques légèrement ovales, Ils sont des témoins de contamination fécale assez résistants, y compris dans les milieux salés. Ils peuvent aussi se multiplier dans les milieux présentant des pH allant jusqu'à 9,6, on peut par conséquent les utiliser comme indicateurs d'organismes pathogènes qui ont une résistance similaire au pH élevé. La figure 12 explique la méthode adoptée pour leur dénombrement.
- c. Dénombrement des *Clostridium* :** Réalisé en gélose Viande de Foie.
- d. Observation des résultats :** l'observation de la présence ou l'absence d'une bactérie dans l'inoculum est effectuée par la mise en évidence de l'un des caractères utilisés dans les techniques en milieu liquide à savoir des troubles en ROTH et production de gaz en BCPL : l'apparition du caractère signifie le résultat positif, par contre l'absence de l'un de ses caractères signifie le résultat négatif. Successivement, l'interprétation statistique des résultats est effectuée par la méthode du NPP (table de Mac Grady), on se reporte à la table de Mac Grady pour 3 tubes (annexe 13) de dilution afin de trouver le NPP correspondant au nombre de la lecture (n).

$$C \text{ des (bactéries)} = \frac{n}{\text{Valeur de la dilution correspondant au premier chiffre}}$$

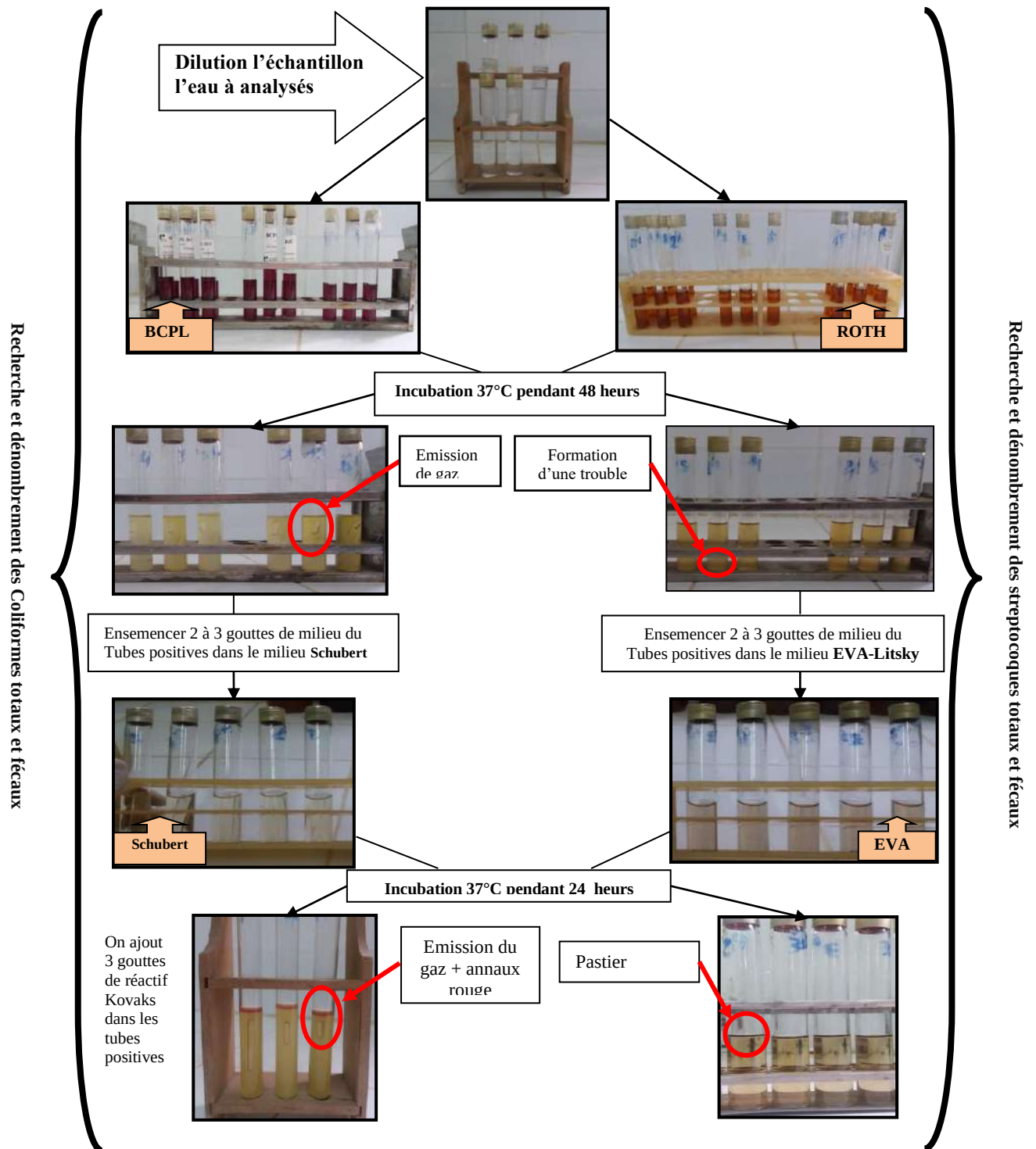


Figure 12. Méthode de recherche et dénombrements des coliformes fécaux et totaux, Streptocoque fécaux et totaux au laboratoire de la Prévention de Ouargla

2.17. Indices de pollution

a. Indice de biodégradabilité : l'indice de biodégradabilité IB des eaux phréatiques est estimé par la formule DCO/DBO₅, où il est classé en trois niveaux de biodégradabilité (Table. VII)

Tableau VII. Classes d'indice de biodégradabilité

IB	Caractéristique du classe
1 - 1.9	Facilement biodégradable
2 - 2.9	Biodégradable avec des souches sélectionnées
3 - 4	N'est pas biodégradable

b. Indice de pollution organique IPO : on inclut habituellement dans leur calcul les indicateurs de pollution organique des eaux DBO₅, NH₄⁺, PO₄³⁻ et NO₂⁻. Permet de classer l'eau analysée sur une échelle à 5 niveaux de pollution organique (Leclercq et Maquet, 1987 in Djidel et *al.* 2008) (Table. VIII).

Tableau VIII. Classes d'indice de pollution organique

Paramètre	DBO ₅ (mg-O ₂ /l)	Ammonium NH ₄ ⁺ (mg – N/l)	Nitrites NO ₂ ⁻ (µg-N/l)	Phosphates PO ₄ ³⁻ (µg-P/l)
Classes				
5	< 2	< 0.1	5	15
4	2 – 5	0,1– 0.9	6 – 10	16 – 75
3	5.1 – 10	– 2.4	11 – 50	76 – 250
2	10.1 – 15	2.5 – 6.0	51 – 150	251 – 900
1	> 15	> 6	> 150	> 900

IPO= Moyen des quatre paramètres étudiés

Classe 5 • 5- 4.6: Pollution organique nulle

Classe 4 • 4,5-4.0 : Pollution organique faible

Classe 3 • 3,9-3.0 : Pollution organique modéré

Classe 2 • 2,9-2.0 : Pollution organique forte

Classe 1 • 1,9-1.0 : Pollution organique très forte

c. Indice de qualité microbiologique (MQI) : Les résultats de la densité bactérienne des eaux est exploités pour calculer l'indice de qualité microbiologique (MQI) selon l'échelle de Bovesse et Depelchin, 1980 in Djidel et *al.*, 2008 (Table XI). Permet de classer la pollution microbiologique en cinq classes, ils sont illustrés dans le tableau IX.

Tableau IX. Classes de pollution microbiologique selon Bovesse et Depelchin, 1980 in Djidel et *al.*, 2008

Classe n°	Bact. tot. (ml ⁻¹)	Colif. f. (ml ⁻¹)	Strepto. f. (ml ⁻¹)
5	< 2000	< 100	< 5
4	2000-9000	100-500	5-10
3	9000-45000	500-2500	10-50
2	45000-360000	2500-20000	50-500
1	> 360000	> 20000	> 500

MQI = moyen de trois paramètres étudiés

L'interprétation des résultats :

Classe 5 • 4.3-5.0 : Contamination fécale nulle

Classe 4 • 3.5-4.2 : Contamination fécale faible

Classe 3 • 2.7-3.4 : Contamination fécale modéré

Classe 2 • 1.9-2.6 : Contamination fécale forte

Classe 1 • 1.0-1.8 : Contamination fécale très forte

Partie III :
Résultats et
discussions

Chapitre VI. Situation actuelle du périmètre agricole

Introduction

La pratique de réutilisation agricole des eaux épurées est récente à Ouargla. Nous avons constaté que cette activité prend l'ampleur dans la région durant nos travaux de recherche de Magister entre 2011 et 2014. Une enquête au niveau des sites de réutilisation a été menée durant cette période où on y argumente l'importance de cette pratique dans la région et leurs avenir possible. Durant notre présent travail, des prospections sur les terrains de réutilisation des eaux épurées à Ouargla étaient menées au début et à la fin de l'expérimentation. L'objectif est l'évaluation de l'état des sites de réutilisation après six à sept ans d'irrigation.

1. Investigations administratives

Des investigations sur l'importance de la réutilisation agricole des eaux épurées ont été réalisées au niveau de quelques organismes publics en relation avec le sujet à savoir l'office nationale d'assainissement, la Direction d'Hydraulique et la direction des services agricoles. On y intéresse à évaluer le rôle et le taux d'intégration de ces organisations à cette pratique.

L'office national d'assainissement annonce que les eaux épurées évacuées de la station d'épuration de Ouargla vers Sebkhet Sefioune présentent un caractère fortement salin, supérieure à 9,32 dS/m toute l'année. Ce qui peut constituer l'un des contraintes de réutilisation de ces eaux. Quoique, permet les principaux objectifs de l'O.N.A. est le développement de cette pratique dans la région, nombreuses contraintes sont constatées entre autres la salinité excessive des eaux, leurs mauvaises caractéristiques physiques à savoir l'odeur et la couleur. En revanche, des essais de réutilisation agricoles des eaux épurées pour l'irrigation de quelques cultures vivaces à savoir le palmier dattier et l'olivier, ainsi que quelques essais sous serres ont été menés dans la STEP de Ouargla afin de tester les possibilités de cette pratique. En revanche, tous ces essais ont été mis à l'échec.

Parallèlement, la direction d'Hydraulique a déclaré que la cuvette de Ouargla a souffert de problème des excédents hydriques due aux eaux de rejets et la remontée des eaux phréatiques, quoique ce problème est partiellement remédié dans la région après la réalisation de mégaprojet d'assainissements, les marnes d'eau et les points noirs sont toujours persiste dans quelques zones de la cuvette. Des lacs des eaux phréatiques sont observés dans la zone d'étude pendant les périodes des hautes eaux, ce qui traduit l'importance de suivis et le contrôle de système irrigation/drainage. Le contrôle doit être rigoureux et permanent. La direction des services agricoles de Ouargla, est hors question

concernant le suivi de ces zones. Nos observations et suivi de la pratique de réutilisation des eaux épurées a montré la dissidence entre les différentes structures du secteur. L'information est peu diffusée entre les différentes organisations, car malgré la légalité de cette pratique en fonction des lois algérien aucun efforts présentés par ces derniers de développés cette pratique dans la région. La direction des services agricoles a déclaré que certaines cultures tolérantes aux sels, pouvant pratiqués en intercalaires sous palmiers telles que : la betterave rouge, la betterave saucière, les épinards, l'orge, la luzerne et le coton. Des études de qualité et quantité de rendement doit être menée à fin d'autoriser l'utilisation de ces eaux en irrigation.

Comme conclusion, aucun encadrement technique destiné aux exploitants, la vulgarisation agricole est totalement absente dans ce périmètre agricole. L'utilisation des eaux épurées pour l'irrigation dans le périmètre agricole nord de la STEP est effectuée anarchiquement sans aucune autorisation officielle de part des pouvoir public et les structures concernées. D'après nos enquêtes aux prés de ces structures, ce périmètre est illicite, quoique quelques exploitants sont autorisés verbalement par l'O.N.A. pour l'irrigation des palmiers dattier au début de l'installation du périmètre.

2. Gestion de l'espace agraire

La superficie totale du périmètre agricole nord de la station d'épuration de Ouargla atteint les soixante-dix hectares dont environ trente-deux hectares sont réellement cultivés. Le reste est des terrains non cultivés. En revanche, on y constater des exploitations aux cours de réalisation dans le périmètre durant les dernières campagnes de mesures.

Concernant les exploitations cultivées, elles varient en fonction du mode des eaux d'irrigation utilisées. Les sites de réutilisation des eaux épurées sont des petites exploitations dont les superficies n'en dépassent pas en générale les deux hectares. Parallèlement, les exploitations irriguées par les eaux conventionnelles ayant des superficies entre deux et quatre hectares.

Au niveau des exploitations cultivées, le système de production phœnicicoles est le plus dominant, pour nombreux raisons entre autres l'adaptabilité de cette plante aux conditions édaphiques et hydriques dans la zone. La monoculture est pratiquée à cent pour cent dans les exploitations irriguées par les eaux usées épurées. Le reste des périmètres sont cultivée essentiellement par des palmiers dattier et cultures fourragères,

Le caractère d'abondement des sites cultivés est très remarquable dans la zone d'étude, dont les causes restent mal connues. Les sites de réutilisation dans la zone précitée ont avoir deux allures soit abandonné ou avoir un changement de mode des eaux

d'irrigation vers les eaux conventionnelles. Cela peut être lié à la nature des eaux épurées qui limite les systèmes de productions culturelles pratiquées, ainsi que peuvent influencer la dégradation des sols agricoles par salinité.

3. Gestion de l'exploitation

3.1. Activité de l'exploitant

La majorité des exploitations pratiquent l'agriculture comme activité secondaire. Nos prospections sur terrain indiquent que cette pratique est persistée principalement secondaire dans cette zone. Ce qui peut être aggravés le caractère d'abondement des exploitations. D'autre part, l'utilisation d'une main d'œuvre salariée est insignifiante dans les exploitations agricoles de mise en valeur dans la région d'étude. Les pratiques culturales ainsi que tous les travaux au niveau de l'exploitation sont majoritairement toujours réalisées par les membres de la famille.

3.2. Gestion de l'irrigation-drainage

3.2.1. Eaux d'irrigations valorisées

L'irrigation joue un rôle essentiel dans l'accroissement et la stabilité des rendements des cultures. Dans les régions arides et semi-arides, notamment dans la région de Ouargla, l'irrigation est essentielle pour une agriculture durable et rentable. D'après Bouhanna (2014), au niveau de périmètre de mise en valeur nord de la station d'épuration de Ouargla, 60% des agricultures irriguent leurs exploitations avec les eaux épurées, où les raisons du choix de ce mode des eaux d'irrigation sont multiples entre autres la disponibilité des eaux gratuit, sans aucun captage, eau riche en éléments nutritifs, alors que le reste des exploitations estimé à 35% du totale des sites cultivés ont utilisés les eaux conventionnelles. Le 5% des terrains sont abandonnées et non irriguée.

Au début de l'essai en 2015, 51 % des exploitations sont irriguées par les eaux usées épurées, 36% des exploitations sont irriguées par les eaux conventionnelles et 12% du totale des exploitations sont des sites non irriguées (Fig. 13). A la fin de l'essai en 2019, la composition du périmètre est devenue 9 % des exploitations sont irriguées par les eaux épurées, alors que 78% des exploitations sont irriguées par les eaux conventionnelles et 12% des sites restent non irriguées (Fig. 14).

Nos investigations au niveau du périmètre d'étude affichent un recours permanent et presque totale des exploitants vers les l'irrigation conventionnelles. Le creusement continu des forages collectifs dans la zone a permis aux agriculteurs un accès plus faciles aux eaux conventionnelles, moins salées et permettre un champ des cultures plus vastes que les eaux épurées. Les agriculteurs cherchent de la production de quantité et qualité, ce

qui influe sur l'utilisation des eaux épurées à Ouargla, selon eux sont des eaux de mauvaise qualité et empêche le développement normal des cultures. L'amélioration de la qualité des eaux épurées de la station d'épuration de Ouargla est une nécessité pour une réutilisation agricole sans risque.

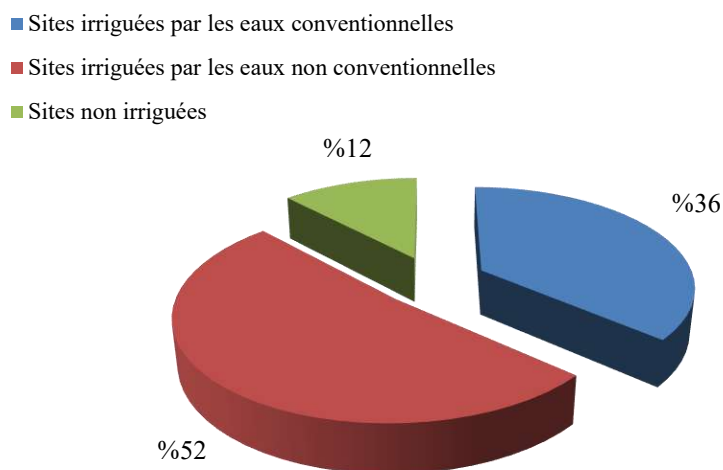


Figure 13. Composition du périmètre en 2015

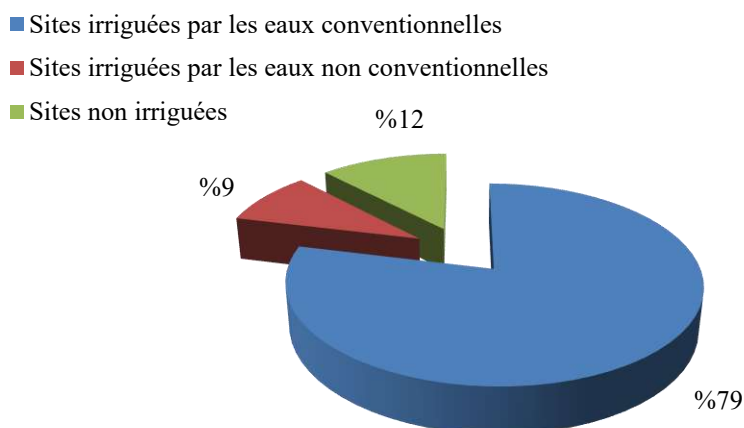


Figure 149. Composition du périmètre en 2019

3.2.2. Système d'irrigation

Dans la zone d'étude, deux types de systèmes d'irrigation sont pratiqués au niveau des exploitations agricoles ; la submersion et localisé. Le système d'irrigation par submersion reste le plus pratiqué sur les superficies irriguées. Où 92% des exploitants pratiquent ce système. Cette traditionnelle technique d'irrigation est connue par les pertes en eaux considérables notamment par évaporation et infiltration qui peut présenter des risques de contamination des eaux souterraines. Concernant l'irrigation par le système localisé, 8% des agriculteurs utilisent ce système qui est considéré comme un système

économiseur des eaux et vulgarisé dans les nouveaux projets de mise en valeur, consiste à apporter l'eau aux plantes en petite quantité dans la rhizosphère, dernièrement l'utilisation de ce système d'irrigation est connue une extension assez notable surtout pour l'irrigation des palmiers et des arbres fruitiers dans les périmètres de mise en valeur.

3.3.3. Durée de l'irrigation

Nos investigations au niveau de la zone d'étude indiquent que majoritairement la population active a débuté leurs pratiques agricoles entre 5 et 8 ans passés pour les sites de réutilisation des eaux épurées. Cette période peut aller jusqu'à 12 ans pour les stations irriguées par les eaux conventionnelles.

Les fréquences d'arrosage diffèrent d'une station à une autre selon le type des eaux d'irrigation valorisé, le système d'irrigation exploité et la saison. Dans les stations irriguées par les eaux conventionnelles, nos investigations indiquent qu'ils sont d'un à deux fois par semaine en hiver et de deux à quatre fois en été. Alors que, au niveau des stations irriguées par les eaux conventionnelles, les fréquences d'irrigation varient entre un à deux fois par semaine en hiver et trois à cinq fois en été. D'autres agriculteurs utilisent le système d'irrigation localisé, principalement au niveau des exploitations phœnicicoles où l'irrigation s'est faite en fonction des saisons et l'état des plantes.

Il faut signaler que tous les agriculteurs restent pratiquer leurs irrigations anarchiquement, où aucun intérêt n'est donné aux besoins des plantes durant leurs cycles développement, ce qui pose des sérieux problèmes de gestion des ressources sol-eau dans les exploitations agricoles. Parallèlement, cette mauvaise gestion des pratiques d'irrigation sur des sols connus déjà par leurs fragilités peuvent causer des graves problèmes de salinisation, de dégradation et de pollution des eaux sols et des nappes superficielles.

3.4. Gestion de la fertilisation

Les sols sahariens sont connus par leurs structures particulières et leurs fragilités ainsi que leurs pauvretés en termes des éléments fertilisants, ce qui implique l'utilisation des apports organiques et minéraux. L'utilisation de la fertilisation organique est dominante dans les sites d'étude où la quantité apportée diffère d'une exploitation à une autre. En revanche, une section des agriculteurs applique les deux types de fertilisation organique et minérale, cette pratique est réalisée au niveau des exploitations irriguées par les eaux conventionnelles. Nos investigations dans les sites d'étude indiquent que la gestion de la fertilisation des exploitations reste toujours liée au mode des eaux d'irrigation et les cultures. Généralement la fertilisation organique pratiqué au niveau des exploitations

phœnicicoles, parallèlement l'application de deux modes de fertilisation est liée à la présence des cultures sous-jacentes au niveau de l'exploitation.

3.5. Obstacles physiques

Deux types des obstacles physiques sont observés au niveau de la zone d'étude ; des croutes gypseuses, et la nappe phréatique. La présence de ces obstacles (croutes ou des encroûtements et nappe) dans les sols va empêcher le développement normal des racines des plantes. Des croutes à la profondeur, dont la profondeur variée entre 1 m à 2 m est observé au niveau de 10 % des exploitations, en revanche les encroûtements des sels sont parmi les formes les plus observés dans la majorité des stations. Ces encroûtements situés à la surface des sols. La profondeur de la nappe phréatique est variée entre 0 et 3 m dans le périmètre.

3.6. Commercialisation

Dans le périmètre agricole de mise en valeur nord de la STEP, selon la nature de l'eau d'irrigation deux zones sont distinguées : une zone irriguée par les eaux conventionnelles et une zone irriguée par les eaux épurées.

Globalement, au niveau de la zone irriguée par les usées épurées la production dattiers est destinée à la consommation familiale. Les rendements obtenus sont variés entre 10 et 20 kg /pied selon l'état. Contrairement à la zone irriguée par les eaux non conventionnelles, dans la zone irriguée par les eaux conventionnelles les produits sont destinés à l'autoconsommation familiale ainsi que la commercialisation sur le marché local de la région de Ouargla. Les rendements sont largement supérieurs aux premiers cas, supérieur à 40 kg/pied. Les cultivars pratiqués sont des variétés locales telles que les Dgoul, et Ghars.

4. Contraintes de la REUE en agriculture

Nos investigations concernant la réutilisation des eaux épurées en agriculture saharienne à Ouargla, nous a permis de constater que les agricultures dans la zone d'enquête ont rencontrés nombreux problèmes d'ordre naturelle, institutionnels et sociale.

4.1. Contraintes naturelles

Permis les contraintes les plus difficile dans cette zone de mise en valeur, les vents violents, qui sont aggravé par la situation géographique défavorable exposé aux dunes de sables tous au tour du périmètre. De plus, la topographie presque plaine qui ne facilite pas le drainage agricole.

4.2. Contraintes institutionnelles

Absence totale de formation, pas de communication entre les exploitants et les organisations locales. La vulgarisation auprès des agriculteurs n'existe pas et un manque total des services agricoles et de la prévention au niveau de la zone notamment pour accompagner les tentatives de réutilisation des eaux épurées qui nécessitent des suivis sur le terrain des cultures, des sols et surtout la santé des exploitants, leurs familles et leurs salariées s'ils existent. De plus, la non intéressement des autorités au niveau de la région de Ouargla en pratique de réutilisation agricole des eaux épurées, où aucun intérêt malheureusement est donné à nos enquêtes et nos suivis durant toute la période d'essai.

4.3. Contraintes socioéconomiques

Cela est lié aux religieux de la société. Nombreux agriculteurs et consommateurs ont des arrière-pensées religieuses que les eaux usées épurées sont des eaux entièrement polluées et n'acceptent plus leurs utilisations pour irriguer leurs cultures. D'un autre côté aucun marché des produits agricoles irrigués par les eaux épurées n'a existé dans la région, ce qui oblige les agriculteurs de chercher des eaux moins risquées pour effectuer leurs pratiques.

4.4. Autres contraintes

L'accès toujours reste difficile au périmètre agricole. L'accès s'est fait par une piste très difficile où les agriculteurs ont rencontré des grandes difficultés notamment pour l'arrivée des facteurs de production et la gestion des exploitations en matière d'irrigation et fertilisation.

Conclusion

A travers notre prospection dans le périmètre d'étude, il apparaît que les eaux traitées de la station d'épuration (STEP) sont rejetées vers Sebkhet Sefioune sans aucune gestion de réutilisation. Les agriculteurs ont utilisé les eaux épurées à cause du déficit hydrique et le manque des moyens de réalisations des forages individuelles. Aucune communication n'existe entre les agriculteurs et les structures hydro-agricoles, telles que les l'O.N.A., D.S.A. ou D.H.W...etc. L'ensemble des agriculteurs utilisent les eaux usées épurées sans accompagnement administratives.

Les exploitations irriguées par les eaux conventionnelles présentent des palmiers dattier âgé, bien entretenues et organisées par rapport à celles irriguées avec les eaux non conventionnelles. Toutefois, la phœniciculture semble adapter à la forte salinité des sols de cette région.

Les exploitations pratiquent une irrigation par submersion où les superficies cultivées irriguées par les eaux usées épurées ont connu une réduction de 42% de la superficie totale irriguée vers la fin d'essai à cause de la réalisation des forages collectives ce qui explique la réticence qu'a connue la pratique de la réutilisation des eaux épurées dans la zone. Cette réticence dans l'utilisation de l'eau épurée en agriculture est liée selon les agriculteurs à la mauvaise qualité des eaux épurées. Selon eux, ces eaux de couleurs troubles et d'odeurs désagréables, causent le jaunissement des palmiers. Aussi, limite les cultures pratiquées dans l'exploitation réduise la rentabilité agricole. Les cultures se limitent à la phœniciculture et les cultures fourragères, notamment la luzerne et l'orge.

La majorité des exploitations sont familiales ne dépasse pas les 2 ha. La fertilisation organo-minérale est pratiquée dans les stations irriguées avec eaux conventionnelles. Les exploitations irriguées par les eaux non conventionnelles pratiquent uniquement la fertilisation organique.

A ce niveau d'étude, il apparaît que la tentative de réutilisation des eaux usées épurées en agriculture dans la région de Ouargla est une initiative individuelle dont les impacts agro-environnementaux et socio-économiques restent à étudier de manière plus approfondie. Mes travaux antérieurs et certains travaux de recherches menus dans la zone d'étude ont montré que les eaux épurées présentent des impacts agro-enviromentales sur les sols cultivés. Entre autres, les impacts des eaux épurées sur la nappe phréatique serrent clarifiés dans les prochains chapitres.

Chapitre VII. Gestion des eaux d'irrigation

Introduction

Le développement de la fourniture de l'eau est crucial pour la production agricole. La gestion des eaux d'irrigation c'est l'un principaux facteurs de production. Dans notre zone d'étude, deux types des eaux d'irrigation sont exploités : les eaux épurées et les eaux conventionnelles. On y consacrés ce chapitre à l'étude de la gestion des eaux d'irrigation dans la zone d'étude par la baie d'une analyse quantitative, ainsi qu'on y entamé la caractérisation du bilan hydrique et la relation entre l'irrigation et les différents paramètres de bilan, et on termine par l'évaluation qualitative des eaux d'irrigation à travers une étude temporelle.

1. Etude quantitative des eaux d'irrigation

Notre travail couvrera 10% des sites irriguées vue la difficulté de rencontré la majorité des exploitants lors de la réalisation de cette étude. Les résultats des suivis des pratiques de l'irrigation dans le périmètre précité sont consignés dans le tableau X. Les suivis sont effectués une fois durant la période d'étude.

Tableau X. Calcul des doses pratiques réelles dans les stations d'études

Type d'eau d'irrigation	Paramètres étudiés	Hiver			Eté		
		Min	Max	Moyen	Min	Max	Moyen
Stations irriguées par les eaux usées épurées	Fréquences d'irrigation (fois/mois)	4	8	6 ± 2,82	8	16	12 ± 5,65
	Débit en tête de parcelle (l/s)	0,17	0,2	0,18 ± 0,02	0,23	0,26	0,24 ± 0,02
	Durée d'irrigation (s/ha) *10 ⁴	25	22	23 ± 2,12	21	20	20,5 ± 0,70
	Dose pratique (m ³ /ha/mois)	170	352	260 ± 12,28	386,4	832	609 ± 31,53
	Dose pratique (mm/ha/mois)	17	35,2	26,1 ± 1,28	38,6	83,2	60,9 ± 3,1
Stations irriguées par les eaux conventionnelles	Fréquences d'irrigation (fois/mois)	4	8	6 ± 2,82	12	20	16 ± 5,65
	Débit en tête de parcelle (l/s)	0,4	0,7	0,55 ± 0,2	0,5	0,8	0,65 ± 0,2
	Durée d'irrigation (s/ha) *10 ⁴	19	15	17 ± 2,82	17	11	14 ± 4,24
	Dose pratique (m ³ /ha/mois)	304	840	572 ± 37,90	1020	1760	1390 ± 52,32
	Dose pratique (mm/ha/mois)	30,4	84	57,2 ± 3,7	102	176	139 ± 5,23

Les suivis des pratiques d'irrigation réellement effectuée au niveau de la zone d'étude indiquent que les agriculteurs irriguent leurs palmeraies en fonction de leurs disponibilités sur les terrains. La première période pendant l'hiver : d'Octobre à Mars. Cette période est caractérisée par des températures généralement minimales et des précipitations où les agriculteurs minimisent les fréquences d'irrigation.

La deuxième période pendant l'Eté : entre Avril et Septembre. Malgré que les fréquences d'irrigation soient assez proches au niveau de la zone d'étude. C'est la période d'élévation des températures qui influe directement sur la croissance des besoins en eau d'irrigation des cultures.

Concernant les débits en tête de parcelle et les durées d'irrigation, les données mentionnées dans le tableau X indiquent que les quantités d'eau apportées par irrigation au niveau des stations irriguées par les eaux usées épurées oscillent dans un intervalle borné entre un minimum de 17 et 35,2 mm/ha/mois, avec moyen évalué à $26 \pm 1,28$ mm/ha/mois (170 et 352 m³/ha/mois, moyen $261 \pm 12,28$ m³/ha/mois) pendant la période hivernale. Par contre, au niveau des stations irriguées par les eaux conventionnelles, la dose pratique d'irrigation fluctue entre 30,4 et 84 mm/ha/mois, avec moyen de $57,2 \pm 3,7$ mm/ha/mois pendant la même période (304 et 840 m³/ha/mois, moyen $570 \pm 37,90$ m³/ha/mois). Ces résultats indiquent que les stations irriguées par les eaux conventionnelles reçoivent les quantités les plus importantes d'eau, c'est logique et lié aux cultures pratiquées au niveau de chaque parcelle.

Pendant la période estivale, les données mentionnées dans le tableau X indiquent que les quantités d'eau apportées par irrigation dans les stations irriguées par les eaux usées épurées oscillent dans un intervalle borné, entre un minimum de 38,6 et 83,2 mm/ha/mois, avec un moyen de $60,9 \pm 3,1$ mm/ha/mois (386 et 832 m³/ha/mois, moyen de $60 \pm 31,5$ m³/ha/mois). Parallèlement, au niveau des stations irriguées par les eaux conventionnelles, les quantités d'eau d'irrigation apportées fluctuent entre 102 et 176 mm/ha/mois, avec un moyen de $139 \pm 5,23$ mm/ha/mois pendant la même période (1020 et 1760 m³/ha/mois avec un moyen de $1390 \pm 52,32$). L'élévation des doses des eaux d'irrigation est en relation avec l'augmentation des températures et l'évapotranspiration pendant l'été. C'est une méthode de préservation des cultures contre les aléas climatiques estivales.

D'autre côté, dans l'objectif de comparaison entre les besoins théoriques des principales cultures (palmier dattier, luzerne et orge) en eaux d'irrigation et les quantités réellement apportées dans le périmètre, un retour au calcul de ces derniers en se basant sur la formule de Turc. Les principaux résultats obtenus sont consignés dans le tableau XI.

Tableau VIII. Résultats des calculs des besoins théoriques en eau d'irrigation

Mois	ETP Turc	Kc orge	Kc luzerne	Kc palmier dattier	ETM1 (mm) (Orge) ETP * Kc	ETM2 (mm) (Luzerne) ETP * Kc	ETM3 (mm) Palmier dattier ETP* Kc
Janvier	44,95	1,15	1,2	1	51,69	53,94	44,95
Février	56,19	1,15	1,2	1	64,62	67,43	56,19
Mars	79,67	1,15	1,2	1	91,62	95,60	79,67
Avril	98,00	0,25	1,2	1	24,50	117,60	98,00
Mai	108,40	/	1,15	1	/	124,66	108,40
Juin	98,27	/	1,15	1	/	113,01	98,27
Juillet	120,12	/	1,15	1	/	138,14	120,12
Août	118,90	/	1,15	1	/	136,74	118,90
Septembre	97,62	/	0,4	0,95	/	39,05	92,74
Octobre	80,97	0,3	1,2	0	24,29	97,16	0,00
Novembre	53,20	1,15	1,2	0	61,18	63,84	0,00
Décembre	38,92	1,15	1,2	0	44,76	46,71	0,00
Cumul annuel	995,21	/	/	/	362,67	1093,88	817,24

Selon les études menées par Mecheri (2006) ; Hamdi Aissa (2001), les valeurs d'évapotranspiration potentielle oscillent suivant la méthode d'estimation. Ils varient de 494.78 mm/an à 2012.8 mm/an. Il apparaît que les valeurs de l'ETp sont plus au moins écartées. Cette différence est due aux méthodes d'estimation appliquées. L'évapotranspiration est estimée à 995.21 mm/ an selon la méthode appliquée.

Par comparaisons des données consignées dans les tableaux X et XI, il apparaît que les doses pratiques réellement appliquées sont insuffisantes aux besoins théoriques en eau d'irrigation des dattiers, luzerne et orge au niveau des stations irriguées par les eaux usées épurées. En revanche, elles sont considérées suffisantes au niveau des sites irrigués par les eaux conventionnelles, s'elles sont maximums.

Les doses d'irrigation réelles s'elles sont inférieures aux besoins théoriques des cultures (cas des doses minimaux au niveau des stations irriguées par EUE) peuvent provoquer des accumulations des sels (la salinisation des sols cultivés), par le fait que les cultures exportent toutes les quantités d'eau apportées, en laissant les sels s'accumuler, parallèlement cela peut causer la remonter de la nappe phréatique surtout pendant les périodes estivales de fait que les sols sont secs. Selon Zekri et *al.* (1997), dans les sols irrigués avec les eaux usées, la balance d'eau est nécessairement déficitaire au moins durant

une partie de l'année. Ceci est donc en faveur des recristallisations et précipitations salines, et par conséquent, générateur de problèmes de salinisation et/ou d'alcalisation.

2. Paramètre du bilan hydrique

Les données du bilan hydrique sont consignées dans le tableau XII.

Tableau VIII. Récapitulatif du Bilan hydrique dans la zone d'étude

Paramètres	Température moyenne (°C)	P (mm)	Etp (mm)	ETR (mm)	R (mm)	DA (mm)	Ie (mm)
Janvier	12,06	2,3	44,948	2,42	0,002	42,524	-0,13
Février	13,58	7,46	56,195	7,86	0,044	48,332	-0,45
Mars	18,7	6,51	79,671	6,86	0,014	72,809	-0,37
Avril	22,73	0,61	97,997	0,64	0,000	97,354	-0,03
Mai	27,18	1,81	108,401	1,91	0,000	106,493	-0,10
Juin	31,97	0,19	98,269	0,20	0,000	98,068	-0,01
Juillet	35,45	0,05	120,118	0,05	0,000	120,066	0,00
Août	34	0,86	118,904	0,91	0,000	117,997	-0,05
Septembre	30,82	7,96	97,619	8,39	0,018	89,229	-0,45
Octobre	26,25	8,22	80,966	8,66	0,028	72,301	-0,47
Novembre	16,64	4,38	53,204	4,62	0,010	48,587	-0,25
Décembre	11,59	1,77	38,923	1,87	0,001	37,057	-0,10
Moyen/cumul	23,41	42,11	995,214	44,40	0,12	950,82	-2,41

L'évapotranspiration réelle (ETR) d'une région représente la quantité d'eau réellement perdue sous forme de vapeur en fonction du climat. L'ETR est estimé à 44.40 mm/an par la baie de formule du Turc (Table XI). D'un autre côté, le ruissellement est estimé à 0,12 mm/an selon la méthode de Tixeront (1960). Parallèlement, la quantité d'eau qui parvient à la nappe par l'infiltration efficace (**Ie**) est absente. Concernant l'estimation du déficit agricole (DA), qui représente la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux cultures par l'irrigation pour éviter sa souffrance, Il est évalué à 950.82 mm/an (9508,2 m³/an) (table XII).

Les résultats obtenus montrent que le bilan est totalement déficitaire au niveau de la région de Ouargla à cause des amplitudes fortes entre les températures, les précipitations et l'évapotranspiration. Nous constatons que durant toute l'année les précipitations sont faibles par rapport les évaporations potentielle et réelle.

En revanche, en cas de valorisation des quantités d'eaux d'irrigation, qui sont présentés dans le périmètre par les doses pratiques d'irrigation ; sont les quantités d'eau d'irrigations apportées dans la zone d'étude.

$$P + I = ETR + R + Ie$$

De,

$$Ie = P + I - ETR - R$$

L'estimation de l'infiltration efficace au niveau des stations irriguées est réalisée par exploitations des données de gestion des eaux d'irrigation ainsi que les paramètres estimés du bilan hydrique dans la zone. Les estimations des quantités de l'infiltration efficace sont présentées dans le tableau XIII.

Tableau IXII. Estimations de l'infiltration efficace dans le périmètre.

Stations	Doses pratique mm/an		Infiltration efficace mm/an	
	Min	Max	Min	Max
Stations irriguées par les eaux épurées	204	998,4	201,83	954,12
Stations irriguées par les eaux conventionnelles	364,8	2112	320,5	2067,7

Nos estimations indiquent que les quantités d'eau qui peuvent percoler vers la nappe phréatique est oscillé entre 201,8 et 954,1mm/an/ha au niveau des stations irriguées par les eaux épurées, et varient entre 320 et 2067,7mm/an/ha au niveau des stations irriguées par les eaux conventionnelles. Ces quantités d'eau percolés vers la nappe à des effets sur les sols cultivés par lixiviations des sels vers le sous-sol, ce qui déclaré par Bouhanna (2014) ; Nader (2014). D'autre part, ces eaux peuvent affecter la nappe phréatique par entraînement des sels et augmentation du niveau statique, surtout qu'à au niveau de cette zone le drainage agricole est totalement absent.

3. Etude qualitative des eaux d'irrigation

En agriculture la connaissance de la qualité des eaux d'irrigation est intéressante car elle a une influence directe sur la composition des sols, le choix des aptitudes culturales et le rendement des cultures. Selon F.A.O. (2012), l'étude de la qualité de l'eau d'irrigation a une importance particulière dans les zones arides où s'impose les extrêmes températures, la faible humidité relative et les taux élevés d'évaporation, avec le dépôt consécutif de sels, qui s'accumuler dans le sol. Les propriétés physiques et mécaniques du sol, telles que la dispersion des particules, la stabilité des agrégats, la structure du sol et la perméabilité sont très sensibles à ce type d'ions échangeables présents dans les eaux d'irrigation. Ainsi, lorsque l'utilisation des effluents est prévue, plusieurs facteurs liés aux propriétés du sol doivent être pris en considération.

L'aptitude des eaux pour l'irrigation doit être définie selon des critères physico-chimiques tenant compte des conditions de sol, du climat et des plantes. Deux types d'eaux

d'irrigation sont utilisés dans la zone d'étude, dont leurs principales caractéristiques physico-chimiques sont détaillées dans le tableau XIV.

Tableau XIV. Propriétés physico-chimiques des eaux d'irrigation

Caractéristiques	Périodes de prélèvement						Moyenne		
	2013 D'après Bouhanna (2014)		Décembre 2015 Début de l'essai		Décembre 2019 Fin de l'essai		Eaux épurées	Eaux de forage	
	Eaux épuré es	Eaux de forage	Eaux épurées	Eaux de forage	Eaux épurées	Eaux de forage			
pH	7,92	7,52	8,25	8,3	8,08	8,15	8,08	7,99	
C.E. à 25 C° (dS/m)	13,67	5,53	12,51	6,22	12,64	5,14	12,94	5,63	
Résidu sec (mg/l)	1047 7	2752	/	/	/	/	10477,0 0	2752,00	
TH (°F)	196,8 0	107,70	190,6	115,6	192,7	110,1	193,37	111,13	
Na ⁺ (méq/l)	60,97	21,92	125,4	8,69	122,4	7,14	102,92	12,58	
Ca ⁺⁺ (méq/l)	20,37	10,51	22,3	11,97	19,9	11,3	20,86	11,26	
Mg ⁺⁺ (méq/l)	26,19	18,89	12,8	6,83	12,8	10,2	17,26	11,97	
K ⁺ (méq/l)	2,24	0,83	4,99	0,53	3,12	0,31	3,45	0,56	
NH4 ⁺ (méq/l)	/	/	2,16	0,027	1,14	0,664	1,65	0,35	
Cl ⁻ (méq/l)	154,9 2	24,07	127,3	19,77	125,4	17,4	135,87	20,41	
SO4 ⁻⁻ (méq/l)	19,82	17,62	30,1	8,33	30,6	7,14	26,84	11,03	
HCO3 ⁻ (méq/l)	4,39	3,20	4,12	1,65	4,16	1,22	4,22	2,02	
N-NO3 ⁻ (méq/l)	0,31	0,13	5,24	0,032	6,19	0,24	3,91	0,14	
PO4 ³⁻ (méq/l)	0,11	0,01	0,101	0,014	0,015	0,012	0,07	0,01	
NO2 ⁻ (méq/l)	/	/	0,244	0,02	0,052	0,02	0,15	0,02	
S.A.R.	12,64	5,72	29,93	2,83	30,27	2,18	24,28	3,58	
Métaux lourds (mg/l)	Cr	0,08	0,02	/	/	1,452	2,177	0,76	1,10
	Cu	0,07	0,00	/	/	0,67	1,33	0,37	0,67
	Pb	0,00	0,00	/	/	0,364	0,399	0,18	0,20
	Cd	/	/	/	/	0,175	0,065	0,18	0,07
	Fe	/	/	/	/	0,429	0	0,43	0,00
	Co	/	/	/	/	0	0	0,00	0,00
DBO5 (mg/l)	/	/	27,5	15,3	20,63	10,1	24,07	12,70	
DCO (mg/l)	/	/	119,66	66,5	90,4	9,3	105,03	37,90	
MES (mg/l)	/	/	65,5	/	52,33	/	58,92	/	

3.1. pH des eaux

Le potentiel d'Hydrogène est un indice permettant de mesurer l'activité de l'ion hydrogène dans une solution. C'est un indicateur de l'acidité (pH inférieur à 7) ou de l'alcalinité (pH supérieur à 7) d'une solution (Mecheri, 2009). Il conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques (Merabet, 2010).

Les valeurs du pH varient dans les eaux usées épurées entre 7,92 et 8,25, avec une moyenne évaluée à 8,08 durant la période d'étude. D'autre part, les eaux conventionnelles,

présentent des pH variant entre 7,52 et 8,3 avec une moyenne évaluée à 7,99 durant la même période (Figure 15).

L'analyse des résultats consignés dans le tableau XIV indique que les eaux d'irrigation épurées et conventionnelles ayant des pH légèrement alcalins à alcalin. Ces résultats restent toujours pour les deux types d'eaux acceptables et convenables à la norme algérienne de réutilisation des eaux usées épurées en agriculture et aux normes déterminant la qualité des eaux d'irrigation par Ayers, 1977 in Daddi Bouhoun, 1997 (annexe 14), et aux directives de la FAO. (1974) consignés dans l'annexe 15, concernant la qualité physico-chimique des eaux destinées à l'irrigation (Tamrabet, 2011).

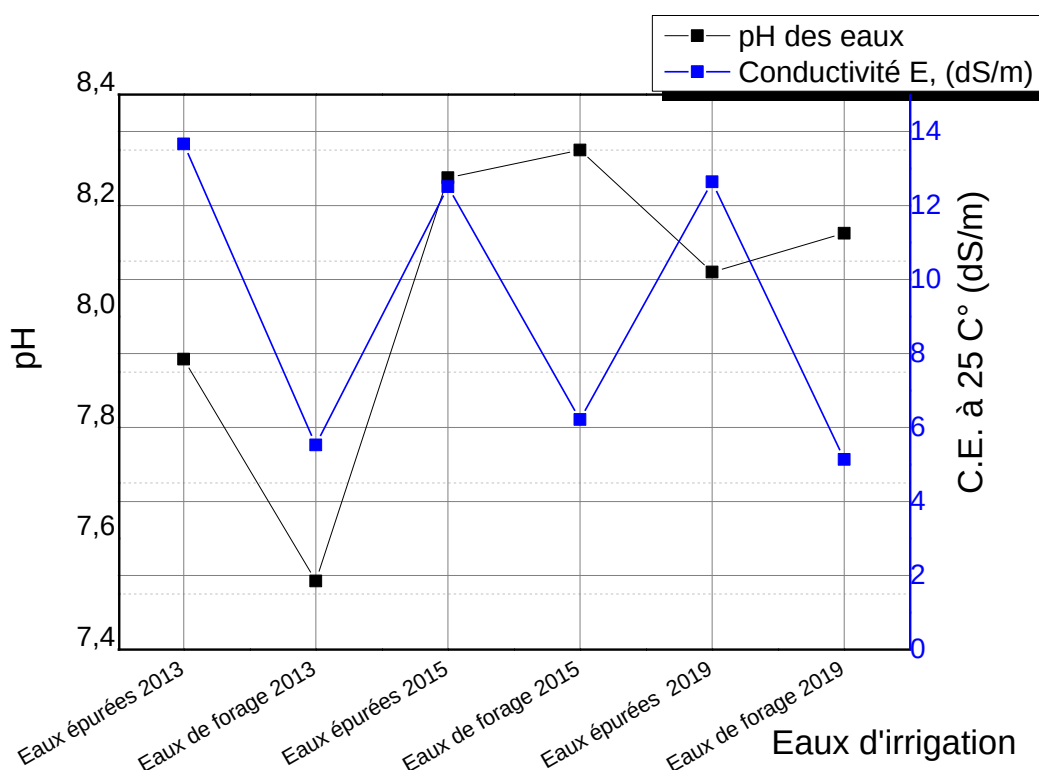


Figure 15. Variation temporelle du pH et conductivité des eaux

3.2. Salinité des eaux

D'après Merabet (2010), la mesure de la conductivité électrique permet d'évaluer rapidement mais très approximativement la minéralisation globale de l'eau. Le principal critère d'évaluation de la qualité d'une eau naturelle dans la perspective d'un projet d'irrigation et sa concentration totale en sels solubles. De plus, Daddi Bouhoun (1997), signale que la salinité de l'eau est d'habitude exprimée par la conductivité électrique (C.E.) en mmhos/cm ou dS/m à 25 C°, c'est le moyen de classification de la salinité de l'eau d'irrigation.

Les eaux d'irrigation présentent des conductivités électriques très fortes. Pour les eaux épurées, leurs C.E varient entre 12,51 et 13,67dS/m, avec une moyenne de 12,94dS/m

(Table XIV ; Fig. 15). D'après ces données, les eaux usées épurées ont une conductivité électrique largement supérieure à celle autorisée par la loi algérienne pour la réutilisation des eaux usées épurées (annexe 10). Selon Durand (1983), et ces eaux sont excessivement salines (Annexe 16). D'après Ayers 1977 ces eaux pouvant causer des problèmes sévères en cas d'utilisation agricole.

Concernant les eaux conventionnelles, elles présentent des valeurs de CE qui varient entre 5,14 et 6,22, avec une moyenne de 5,63dS/m (Table XIV ; Fig. 15). À l'égard des eaux épurées, les eaux conventionnelles aussi présentent des valeurs supérieures à celles déclarées par Ayers, 1977 in Daddi Bouhoun, 1997, déterminant la qualité des eaux d'irrigation (Annexe 14). Selon Durand (1983), ces eaux sont à fortes salinité.

L'analyse des résultats présentés dans le tableau Table XIV ainsi que la présentation graphique 15 a révélé que les eaux d'irrigation (usées épurées et eaux conventionnelles) dans le périmètre agricole nord de la Station d'épuration de Ouargla a une mauvaise qualité, car sa CE dépasse 3 dS/m. Ces eaux présentent des problèmes sévères lors des arrosages.

Boutin et *al.* (2009) ont signalé que les conséquences d'une salinité excessive de l'eau d'irrigation se présentent sous deux catégories, dont la première est les dommages vis-à-vis des sols, indirectement, et la deuxième, les dommages causés aux cultures proprement-dites. D'autre part, Mermoud (2006) a déclaré que l'irrigation avec des eaux assez chargées peuvent entraîner le phénomène de salinisation secondaire des sols cultivés ainsi que leur dégradation.

Dans le même ordre d'idées, Berdai et *al.* (2004) ont indiqué que la teneur des eaux usées épurées en sels présente une contrainte à leurs utilisations en agriculture en raison des risques de salinisation et d'alcalinisation du sol. Ce risque n'est pas lié seulement au caractère alcalin des eaux usées épurées, mais également à la nature du climat (fortes températures, faibles précipitations).

3.3. Dureté des eaux

La dureté de l'eau ou le degré hydrométrique (d°h) indique la teneur en Ca^{++} et Mg^{++} exprimée en méq/l (Khadraoui et Taleb, 2008). Selon Khadraoui et Taleb (2008), $\text{d}^\circ\text{h} = (\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}) * 5$ (en degré français F°), ainsi que 1° TH correspond à 1g de calcium par m^3 d'eau. Selon Merabet (2010), une eau très dure présente des inconvénients d'utilisation, tels que les dépôts de tartre sur les parois des canalisations d'eau et une eau trop douce est une eau corrosive. Elle attaque les parois des canalisations d'eau et

contribue à la dégradation de la qualité de l'eau à la suite de la dissolution de métaux lourds, tels que le plomb.

Dans notre cas d'étude, la dureté des eaux usées épurées est variée entre 190,6 et 196,80 degré français (F°), notamment pour les eaux conventionnelles, où elle est allée de 107.70 et 115.6 F° (Table. XIV). Ces eaux sont considérées comme très dures selon Rodier *et al.* (2009), car sa dureté totale dépasse 100 F° ou 1000mg/l.

3.4. Cations solubles

Quatre minéraux sont analysés dans les eaux d'irrigation (Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+), dont les principaux résultats sont représentés dans le tableau XIV, ainsi que la figure 16.

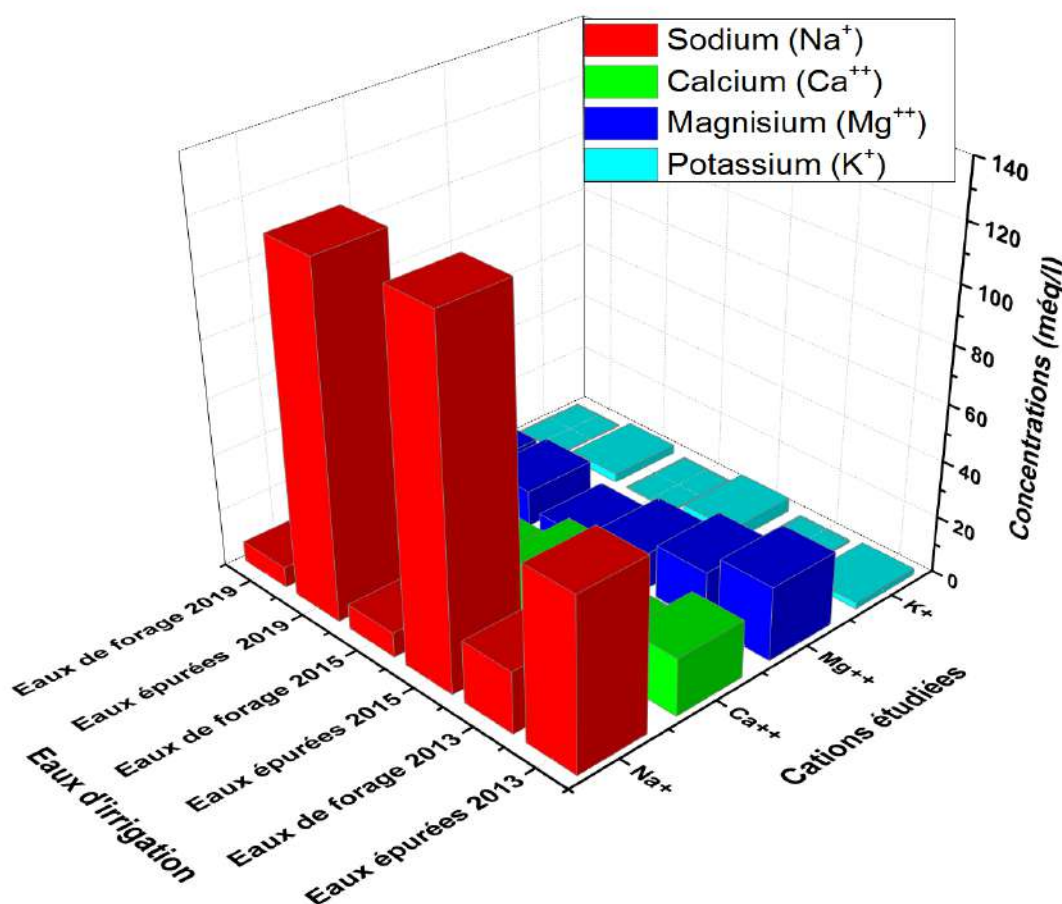


Figure 16. Variation temporelle de la charge cationique des eaux d'irrigation

3.4. 1. Sodium

Les concentrations de sodium dans les eaux usées épurées sont très variables et oscillent entre 60,97méq/l et 125,4méq/l ($1402,2\text{mg/l} < \text{Na}^+ < 2884\text{mg/l}$), avec une moyenne de 102,92méq/l (Fig. 16) durant la période d'étude. L'origine de cet élément dans les eaux usées sont les lessives et les détergents.

Pour les eaux conventionnelles, l'origine de cet élément est lié principalement à la dissolution de l'Halite (NaCl) (Boutteli, 2011). Les variations de cet élément sont considérables dans les eaux des puits dans la zone d'étude, les valeurs obtenus varient dans un intervalle de 7,14még/l à 21,92még/l, une moyenne de 12,58 még/l (Fig. 16) est enregistrée ($104,2\text{mg/l} < \text{Na}^+ < 504,25\text{mg/l}$, avec une moyenne 289,4mg/l). L'analyse des résultats présentés ci-dessus montrent que les teneurs en sodium dans les eaux d'irrigation sont largement supérieures aux normes souhaitables pour les deux les eaux épurées (<9 még/l). L'irrigation par ces eaux peut entraîner de graves problèmes de toxicité aux cultures. D'autre part, le sodium est un élément dispersant des colloïdes dans les sols. L'existence de ce dernier d'une façon abondante dans les eaux d'irrigation peut causer à long terme des accumulations des ions Na^+ dans les sols irrigués. Selon Cheverry (1972), la fixation du sodium sur le complexe du sol, d'où le processus d'alcalinisation, avec ses conséquences éventuelles sur les propriétés du sol, la dispersion des argiles, la dégradation de la structure, la perte de perméabilité et l'asphyxie du milieu.

3.4. 2. Calcium

Rodier et *al.*, (2009), ont déclaré que le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires, sous forme de carbonates. C'est un composant majeur de la dureté de l'eau. Cette ion affiche des concentrations dans les eaux usées épurées assez approximatives (Fig. 16), avec des valeurs qui oscillent entre 19,9még/l et 22,3még/l ($390\text{mg/l} < \text{Ca}^{++} < 446\text{mg/l}$), avec une moyenne de 20,86még/l pour notre campagne d'étude (Fig. 16).

D'autre part, d'après Boutteli (2011), la présence de calcium dans les eaux des nappes est liée principalement à la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3), et les formations gypseuses (CaSO_4). Les teneurs des eaux conventionnelles des forages dans la zone d'étude varient entre 10,51még/l et 11,97még/l, avec une moyenne de 11,26 még/l enregistrée durant la même campagne d'étude ($210,27\text{mg/l} < \text{Ca}^{++} < 239,4\text{mg/l}$, avec une moyenne de 225,2mg/l) (Fig. 16).

3.4. 3. Magnésium

Le magnésium est un des éléments les plus répandus dans la nature, il constitue environ 2,1 % de l'écorce terrestre. Son abondance géologique, sa grande solubilité, sa large utilisation industrielle (chimie de la potasse, alliages, pyrotechnie, batteries sèches, réducteur chimique, etc.) font que les teneurs dans l'eau peuvent être importantes, allant de quelques milligrammes à plusieurs centaines de milligrammes par litre (Rodier et *al.*, 2009). Le magnésium constitue un élément significatif de la dureté de l'eau.

Les concentrations de cet ion dans les eaux usées épurées oscillent entre 12,8méq/l et 26,19méq/l ($153,6\text{mg/l} < \text{Mg}^{++} < 314,28 \text{ mg/l}$), avec une moyenne de 17,26méq/l pour la campagne d'étude (Fig. 16).

les teneurs des eaux conventionnelles en magnésium dépendent de la composition des roches sédimentaires rencontrées (calcaires dolomitiques, dolomies du Jurassique ou du Trias moyen) (Rodier et al. 2009). Les concentrations en magnésium obtenues dans les forages étudiés dans la zone d'étude varient dans un intervalle, allé de 6,83méq/l à 18,89méq/l, avec une moyenne de 11,97méq/l ($81,9\text{mg/l} < \text{Mg}^{++} < 226,72\text{mg/l}$, une moyenne de 143,89mg/l) (Fig. 16).

3.4. 4. Potassium

D'après Boutteli (2011), le potassium provient essentiellement des évaporites, en l'occurrence la Sylvite (KCl) ou par suite d'altération des argiles potassiques. C'est un élément majeur indispensable pour la nutrition des plantes. D'après Yeli (2009), il est nécessaire à la photosynthèse et la synthèse des protéines. Il permet également à la plante de mieux résister à la sécheresse. Une carence ou un excès en potassium augmente la sensibilité de la plante au parasitisme. Il se présente sous forme minérale K^+ dans les eaux.

Cette ion affiche des concentrations dans les eaux usées épurées oscillent entre 2,24méq/l à 4,99méq/l ($87,2\text{mg/l} < \text{K}^+ < 194,6\text{mg/l}$), avec une moyenne de 3,45méq/l pour notre campagne d'étude (Fig.16). Parallèlement, pour les eaux conventionnelles, selon Rodier et al. (2009), sa présence est à peu près constante dans les eaux naturelles, ne dépassant pas habituellement 10 à 15 mg/l. Les teneurs observées dans les eaux des puits dans la zone d'étude varient de 0,31méq/l à 0,83méq/l avec moyen 0,56méq/l ($12,09\text{mg/l} < \text{K}^+ < 32,37\text{mg/l}$, avec une moyenne de 21,71 mg/l). Ces valeurs apparaissent plus ou moins élevées par rapport à celles qui sont mentionnées par Rodier et al. (2009), (Fig. 16).

Durant toute la campagne d'étude, les teneurs en cations solubles des eaux usées épurées présentent la même allure, l'analyse des résultats indiquent que les ces eaux non conventionnelles sont très riches en sodium, suivi par le calcium et le magnésium, et enfin le potassium qui présente les teneurs les moins importants. Parallèlement, le faciès cationique des eaux des forages variés entre Sodique et Calcique en fonction des points d'échantillonnage et la profondeur. En revanche la composition cationique moyenne des eaux d'irrigation épurées et conventionnelles (en méq/l) est présenté sous la forme suivante : $\text{Na}^+ \gg \text{Mg}^{++} > \text{Ca}^{++} > \text{K}^+$.

VII.3.5. Anions solubles

Les résultats des analyses des teneurs en anions solubles (Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^-) dans les eaux d'irrigation sont représentés dans tableau XIV ainsi que la figure n° 17.

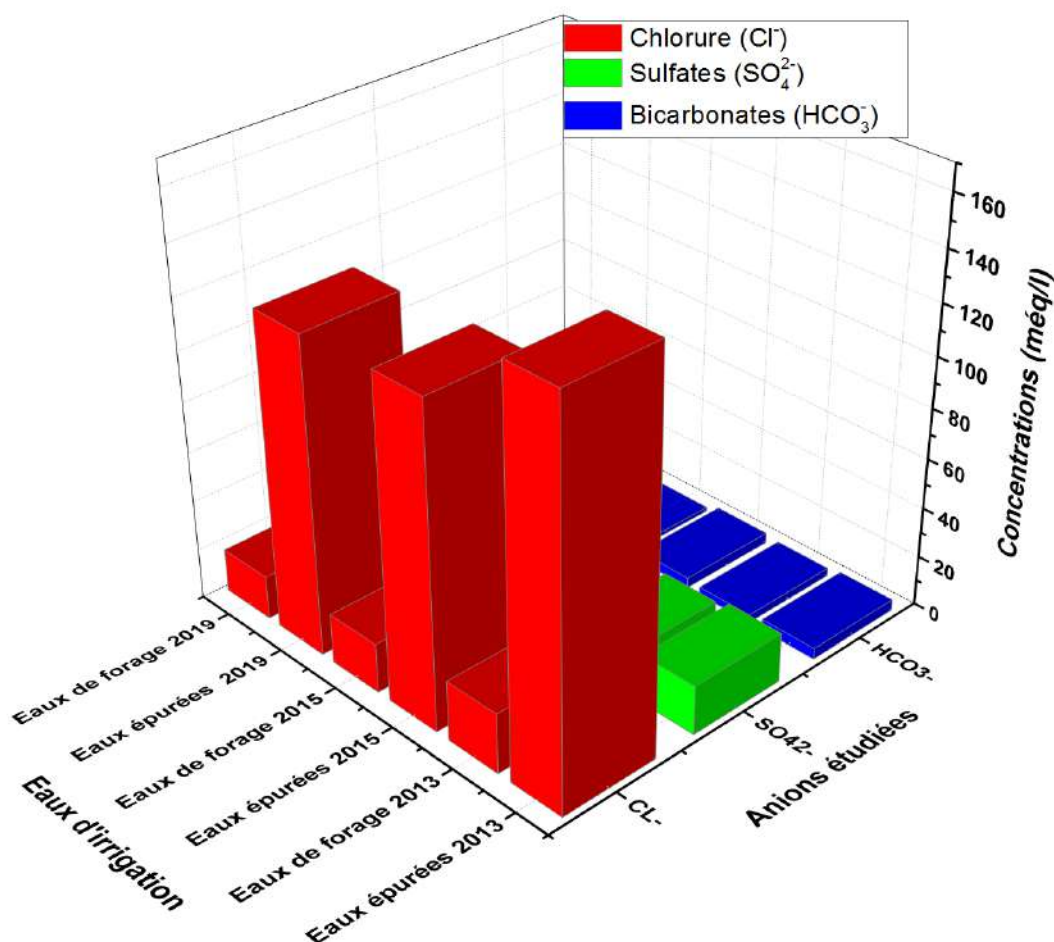


Figure 10. Variation temporelle de la charge anionique des eaux d'irrigation

3.5. 1. Chlorure

Cet ion affiche des concentrations dans les eaux usées épurées assez élevées, avec des valeurs qui oscillent entre 125,4 méq/l à 154,92 méq/l (4389 mg/l < Cl^- < 54422,3 mg/l), avec une moyenne de 135,87 méq/l pour notre durée d'étude (Table. XIV ; Fig. 17). Ces résultats sont largement supérieurs aux normes algériennes de réutilisations des eaux (10 méq/l ; voir annexe 10).

Pour les eaux conventionnelles, Les teneurs observées dans les eaux des puits dans la zone d'étude varient dans une large gamme, allant de 17,4 méq/l à 24,07 méq/l, avec une moyenne de 20,41 méq/l (Table. XIV ; Fig. 17), (609,4 mg/l < Cl^- < 842,7 mg/l, avec une moyenne de 714,5 mg/l enregistrée (Ces teneurs sont supérieures aux normes des eaux d'irrigation. Selon Ayers. (1977) in Daddi Bouhoun, 1997, des teneurs supérieures à

10méq/l en chlore dans les eaux d'irrigation peuvent entraîner des problèmes sévères aux cultures sensibles.

D'après Rodier et *al.* (2009), les teneurs en chlorures peuvent limiter certaines cultures. Suivant l'irrigation par les eaux riches en chlore, la solution du sol va s'enrichir par cet anion. En plus, dès que la teneur en chlore de la solution du sol dépasse une certaine valeur, celui-ci est absorbé par les racines et s'accumule dans les feuilles. Il provoque des brûlures débutant à la pointe des feuilles âgées et progressant vers l'arrière en suivant les bords du limbe.

3.5. 2. Sulfates

Les teneurs en sulfates dans les eaux usées épurées varient dans une large mesure, allant de 19,82méq/l à 30,06méq/l ($951,2\text{mg/l} < \text{SO}_4^{2-} < 1468,8\text{mg/l}$), avec une moyenne de 26,84méq/l pour notre campagne d'étude (Table. XIV ; Fig. 17).

Concernant les eaux conventionnelles, selon Aïtoughrou (2007) ; Gouaidia (2008) ; Boutteli (2011), la présence des ions sulfatés dans l'eau est liée principalement à la dissolution des formations gypseuses. D'après Rodier et *al.* (2009), les concentrations en ion sulfates des eaux naturelles est très variable. Dans les terrains ne contenant pas une proportion importante de sulfates minéraux, elle peut atteindre 30 à 50 mg/l, mais ce chiffre peut être très largement dépassé dans les zones contenant du gypse ou lorsque le temps de contact avec la roche est élevé. Les teneurs en sulfates observées dans les eaux des puits dans la zone d'étude sont comprises entre 7,14méq/l et 17,62méq/l, avec une moyenne de 11,03méq/l ($342,72\text{mg/l} < \text{SO}_4^{2-} < 845,76\text{mg/l}$, avec une moyenne de 529,44 mg/l qui est enregistrée), (Table. XIV ; Fig. 17).

3.5. 3. Bicarbonates

Cet ion affiche des concentrations dans les eaux usées épurées, oscillant entre 4,12méq/l $< \text{HCO}_3^- < 4,39\text{méq/l}$ (mg/l et mg/l), avec une moyenne de 4,22méq/l pour toute la campagne d'étude (Table. XIV ; Fig. 17).

Concernant les eaux conventionnelles, les teneurs observées dans les eaux des puits dans la zone d'étude varient entre 1,22méq/l et 3,20méq/l, et une moyenne de 2,02méq/l, ($251,32\text{mg/l} < \text{HCO}_3^- < 267,6\text{mg/l}$ et une moyenne de 257,59mg/l qui est enregistrée), (Table. XVI ; Fig. 17). Les teneurs des eaux d'irrigation en bicarbonates sont inférieures à celles déclarées par la FAO. (1974) in Tamrabet, 2011 concernant la qualité des eaux d'irrigation (annexe 15).

Concernant le faciès anionique des eaux d'irrigation, les chlorures sont les plus présents dans les eaux, suivis par les sulfates et les bicarbonates. Ces eaux d'irrigation sont

fortement chlorurées. La composition anionique (en méq/l) est telle que : $\text{Cl}^- \gg \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$. De Plus, Yeli (2009) a déclaré que les chlorures et le sodium sont des paramètres à surveiller tout particulièrement, car ils peuvent affecter la croissance des cultures les moins tolérantes et porter préjudice à la structure des sols.

3.6. Sodicité des eaux d'irrigation

Pour étudier la sodicité des eaux, nous avons estimé le coefficient du sodium adsorbé (S.A.R.). Selon Khadraoui et Taleb (2008), le S.A.R. est un indice qui mesure le danger que représente la présence d'une teneur donnée en sodium dans l'eau. Dans les eaux usées épurées, le S.A.R. varie dans un intervalle borné entre 12,64 et 30,67, avec une moyenne de 24,28. Selon Servant (1975), ces eaux ont un degré d'alcalinisation du sol moyenne à intense (Annexe 17). Concernant les eaux conventionnelles, le S.A.R. varie de 2,18 et 5,72, avec une moyenne évaluée à 3,58, où les eaux ont un faible degré d'alcalinisation vers absent (Annexe 17).

3.7. Pollution minérale des eaux d'irrigation

Les concentrations des polluants minéraux des eaux d'irrigation semblent variables avec une dominance azotée (Fig. 18).

3.7. 1. Ammonium

Les valeurs moyennes d'ammonium montrent que les eaux de la Station d'épuration de Ouargla ont des teneurs faibles varient entre 1,14 et 2,16 méq/l avec une moyenne de 1,65méq/l durant la période d'étude (Table. XIV ; Fig. 18), ($20,52\text{mg/l} < \text{NH}_4^+ < 38,88\text{mg/l}$, avec une moyenne de 29,7mg/l), parallèlement les teneurs des eaux conventionnelles sont plus faibles allée de 0,027 à 0,664méq/l avec une moyenne de 0,35méq/l durant la même période ($0,48\text{mg/l} < \text{NH}_4^+ < 11,95\text{mg/l}$, avec une moyenne de 6,21mg/l). Ces teneurs faibles en ammonium des eaux d'irrigation ne cause aucun problème aux cultures selon les directives de Ayers, 1977 in Daddi Bouhoun 1997 (Annexe 14).

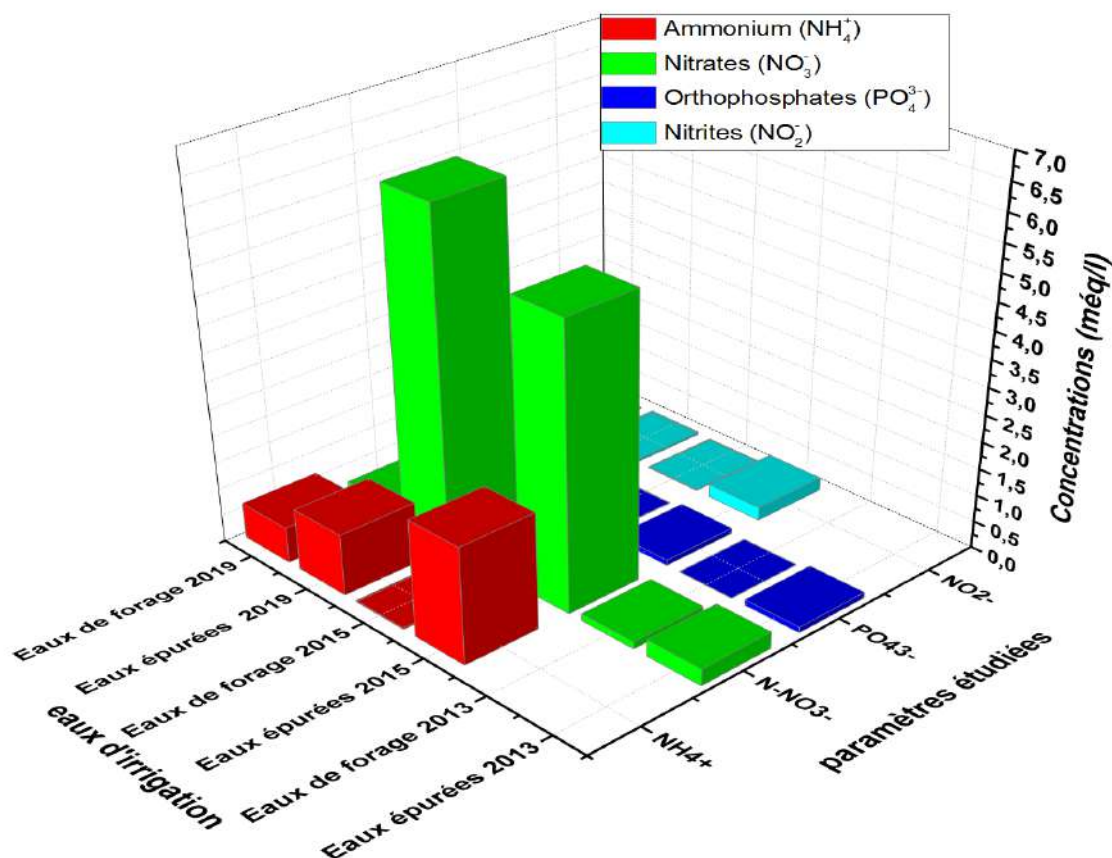


Figure 18. Variation temporelle des polluants minéraux des eaux d'irrigation

3.7.2. Nitrates

Quoique les nitrates (NO_3^-) constituent la forme d'azote la plus assimilable par les cultures, mais leur présence abondante dans les eaux d'irrigation peut entraîner de graves problèmes de toxicité aux plantes. De plus, Rodier et *al.*, (2009) ont signalé que toutes les formes d'azote (azote organique, ammoniacale, nitrites, etc.) sont susceptibles d'être à l'origine des nitrates par un processus d'oxydation biologique. Les nitrates ont une source de toxicité indirecte par le fait qu'ils se transforment en nitrites. L'accumulation préférentielle des nitrates dans certains végétaux est liée au fait que la vitesse d'absorption est supérieure à la vitesse de transformation en acides aminés, amides, protéines, sous l'action des réductases.

Les teneurs dans les eaux usées épurées varient dans un intervalle borné entre 0,31 et 6,19 mg/l ($19,43 \text{ mg/l} < \text{NO}_3^- < 383 \text{ mg/l}$), avec une moyenne de 3,91 mg/l pour notre campagne d'étude (Table. XIV ; Fig. 18). Ces résultats situent les eaux usées épurées de la station d'épuration de Ouargla au dessus des normes nationales et internationales de réutilisation des eaux usées en agriculture vis-à-vis de sa charge en nitrates (annexe 15). Ces teneurs sont largement supérieures aux concentrations préconisées.

Les teneurs en nitrates observées dans les eaux des puits dans la zone d'étude varient dans une gamme, allant de 0,035méq/l à 0,24méq/l, avec une moyenne de 0,14méq/l (8,27mg/l $<NO_3^-<$ 14,88mg/l , avec une moyenne de 8,38 mg/l qui est enregistrée (Table. XIV ; Fig. 18). Cette variation des teneurs en nitrates dans les eaux conventionnelles est probablement due à l'utilisation accentuée des engrais minéraux qui influent indirectement sur la pollution des nappes superficielles, en second lieu, la situation des puits d'exploitation par rapport aux zones d'épandage. On considère que les puits les plus proches aux zones considérées sont les plus pollués.

3.7.3. Nitrites

Les teneurs en nitrites dans les eaux d'irrigation sont rops faibels voir absonates dans la zone d'étude. Les concentrations des nitrites dans les eaux épurées varient entre 0,05 et 0,24 méq/l, avec un moyenne de 0,15 méq/l (2,39mg/l à 11,22mg/l avec un moyen de 6,80mg/l) durant la période d'étude (Table. XIV), alors que des concentrations traces sont enregistré dans les eaux conventioventionnelles ne dépasse plus les 0,92mg/l.

3.7.4. Phosphates

Le phosphore peut se trouver sous différentes formes oxydées, sous la forme acide, on trouve les acides méta (HPO_3), pyro ($H_4P_2O_7$) et ortho (H_3PO_4). En milieu aqueux, les acides méta et pyro tendent vers une forme plus stable : l'orthophosphate. Pratiquement, c'est sous cette forme qu'on le rencontre dans les eaux (Rodier et *al.*, 2009). Selon Rodier et *al.* (2009), des teneurs supérieures à 0,5 mg/l doivent constituer un indice de pollution. Refea (2003), a signalé que les Ortho-phosphates (PO_4^{3-}) ont le plus souvent une origine urbaine (composants des détergents) ou agricole (lessivage d'engrais). Ils sont comme les nitrates, un nutriment majeur des végétaux, qui peuvent, dans les milieux aquatiques, entraîner leur prolifération à partir de 0,2 mg/l, de plus il est considéré que les variations des concentrations des phosphates constituent l'élément limitant des phénomènes d'eutrophisation.

Les teneurs dans les eaux usées épurées varient dans une gamme variant de 0,015méq/l à 0,11méq/l (0,52mg/l $<PO_4^{3-}<$ 3,72mg/l), avec une moyenne de 0,07méq/l (2,58mg/l) pour notre campagne d'étude (Table. XIV ; Fig. 18). Ces teneurs enregistrées sont largement supérieures aux normes de reutilisations des eaux épurées (0,5mg/l d'après Rodier et *al.*, 2009). Les eaux épurées de la Station d'épuration sont considérées comme polluées vis à vis les phosphates, cela est liée à leurs origine domestique.

Pour les eaux conventionnelles, d'après Bouhanna (2014), la présence des ortho-phosphates est liée aux caractéristiques des terrains traversés et la décomposition de la

matière organique des amendements. Les teneurs observées dans la zone d'étude varient entre 0,31 méq/l et 0,49 méq/l, avec une moyenne de 0,40 méq/l (0,31 mg/l $<PO_4^{-3}<$ 0,49 mg/l, avec une moyenne de 0,40 mg/l enregistrée). L'analyse de ces résultats montre que les eaux d'irrigation conventionnelles dans le périmètre agricole nord de la STEP ne sont pas polluées, car leurs teneurs en phosphates sont inférieures à 0,5 mg/l.

3.8. Métaux lourds

D'après Boutmedjet (2004), les métaux lourds ayant un rôle important dans la vie des plantes, car ils interviennent dans des réactions cellulaires en catalysant des réactions physiologiques, ce sont donc des éléments biologiques essentiels ou oligo-éléments auxquels on peut attribuer un effet bénéfique, seulement à de très faibles concentrations.

L'analyse des résultats présentés dans le tableau montrent que les concentrations en métaux lourds (Cu, Cr, Pb, Cd, Fe et Co) dans les eaux d'irrigation sont généralement assez faibles et restent au-dessous des normes sauf pour chrome, le cadmium et le Cobalt dans certains prélèvements (Table XIV ; Annexe 10). Est-il important de signaler que la station d'épuration de Ouargla traite des eaux usées urbaines presque purement domestiques.

3.8.1. Chrome

Le Chrome est présent en petites quantités dans la nature. Il est plus important dans les roches de type basique que dans celles de type siliceux. D'une façon générale, sa solubilité est faible vis-à-vis des phénomènes de lessivage des sols (Rodier et *al.*, 2009). Les teneurs dans les eaux usées épurées sont variées entre 0,08 à 1,452 mg/l avec une moyenne évaluée à 0,76 mg/l durant la période d'étude, par contre, dans les eaux conventionnelles, elles oscillent entre 0,02 à 2,177 mg/l avec une moyenne de 1,10 mg/l durant la même période. Les résultats moyennes obtenues indiquent que les teneurs des eaux épurées sont inférieures à la norme (1 mg/l ; annexe 10), inversement aux eaux conventionnelles, où les résultats indiquent que ces eaux sont polluées avec le chrome.

3.8.2. Plomb

Selon Rodier et *al.* (2009), le plomb est un constituant naturel, largement réparti dans la croûte terrestre à des teneurs de l'ordre de 13 mg/kg. Il peut être présent sous forme de carbonates (cérusite), de phosphates (pyrophosphite), mais surtout de sulfure (galène). Ce dernier sel très peu soluble, pouvant cependant se transformer en hydroxydes ou en carbonates, après avoir été oxydé en sulfates. Les concentrations dans les eaux usées épurées sont variées entre 0 et 0,364 mg/l avec une moyenne de 0,18 mg/l durant la période

d'étude ; par contre, les concentrations en plomb dans les eaux conventionnelles est varié entre 0,00 et 0,399 avec une moyenne de 0,20 mg/l. Ces teneurs sont restées largement inférieures à la norme (10mg/l).

3.8. 3. Cuivre

Les concentrations de cuivre dans les eaux usées épurées sont variées entre 0,07 et 0,67mg/l avec une moyenne de 0,37mg/l durant la période d'étude. En revanche, pour les eaux conventionnelles, elles sont variées entre 0 et 1,33 mg/l avec une moyenne de 0,67mg/l durant la même période d'étude. Ces teneurs sont restées largement inférieures aux normes des eaux d'irrigation (5 mg/l ; Annexe 10).

3.8. 4. Cadmium

Les concentrations de cadmium dans les eaux usées épurées sont évaluées à 0,175 mg/l, par contre, dans les eaux conventionnelles, elles sont évaluées à 0,065 mg/l. Ces teneurs sont au-dessus de la norme des eaux d'irrigation pour les deux types des eaux étudiés (0,05 mg/l ; Annexe 10). Les eaux d'irrigation dans le périmètre d'étude sont polluées en cadmium.

3.8. 5. Fer

Les concentrations de fer dans les eaux usées épurées sont évaluées à 0,429 mg/l, par contre, les eaux conventionnelles sont dépourvues en fer. Les teneurs des eaux épurées sont en dessus de la norme des eaux d'irrigation (20 mg/l ; Annexe 10).

3.8. 6. Cobalt

Les résultats présentés dans le tableau indiquent que les eaux étudiées sont dépourvues en cobalt dans la zone d'étude. Les concentrations sont 0mg/l pour les deux types des eaux.

3.9. Pollution organique des eaux

Le Centre D'Expertise en Analyse Environnementale du Québec (2014), a déclaré que la dégradation des matières organiques entraîne une consommation de l'oxygène dissout dans l'eau. Cela se fait en présence des organismes vivants et peut entraîner ainsi l'asphyxie du milieu et la pollution par les matières organiques (DBO₅). De plus, l'importance de cette pollution dans une eau peut être évaluée par la demande chimique en oxygène (DCO). Parallèlement selon Dufour (1982), ces processus sont influencés par d'autres facteurs, notamment l'impact des variations naturelles de température et de la salinité. L'auteur a signalé que la DBO₅ du milieu est masqué par les variations supérieures imposées par des échanges d'eaux à charges organiques contrastées.

Les concentrations de la demande biologique en Oxygène dans les eaux épurées étaient varier entre 20,63 et 27,5 mg/l avec une moyenne de 24,07mg/l durant la période d'étude (Table. XIV). Parallèlement, au niveau des eaux conventionnelles elles variés entre 10,1 et 15,3 mg/l, avec une moyenne 12,70 mg/l. Ces concentrations restent inférieurs aux normes des eaux d'irrigation réutilisés en agriculture (30mg/l ; Annexe 10).

Concernant la Demande biologique en Oxygène, les concentrations des eaux épurées sont oscillées entre 90,4 et 119,66 mg/l, avec une moyenne de 105,03 mg/l durant la période d'étude. Ces teneurs sont au-dessus des normes des eaux réutilisées en agriculture (90mg/l ; annexe 10). En revanche, les teneurs des eaux conventionnelles sont plus faibles, généralement au-dessous des normes des eux d'irrigation. Les concentrations varient entre 9,3 et 66,5 mg/l, avec une moyenne de 37,90mg/l durant la période d'étude.

3.10. Faciès géochimique des eaux

Durant toute la période d'étude, les résultats présentés dans le tableau n° montrent que le cation Sodium est dominat dans les eaux usées épurées ($\text{Na}^+ > \text{Ca}^{++} > \text{Mg}^{++}$), en revanche, les eaux conventionnelles ont un caractère calcique, sauf pour le premier prélèvement où la concentration de l'ion Na^+ succède celle des ions Mg^{++} et Ca^{++} . Alors que l'ion K^+ présente toujours les taux les plus faibles dans toutes les eaux d'irrigation.

Pour les anions dans les eaux usées épurées, l'ion chlore est plus dominant. Ces eaux sont hyper-chlorurées. Pour les eaux conventionnelles, les teneurs en anions sont équilibrés. Dans les deux types des eaux étudiées, les bicarbonates sont présents en très faibles quantités. Pour illustrer mieux le faciès chimique des eaux d'irrigation, deux méthodes sont utilisées : Schoeller-Berkaloff et Piper.

3.10. 1. Diagramme de Schoeller-Berkaloff

La représentation des eaux sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff se fait selon un diagramme semi-logarithmique. Ce diagramme permet la représentation graphique des analyses chimiques des échantillons et la lecture rapide des caractéristiques chimiques. Le faciès chimique de l'eau analysée est donné par l'association des plus fortes concentrations, coté anions et coté cations, entre anion d'une part et cation d'autre part. La présentation graphique n°19 indique que les moyennes des eaux d'irrigation, usées épurées et conventionnelles ont un faciès anionique chloruré. Parallèlement le faciès cationique varie entre calcique - magnésien à sodique potassique.

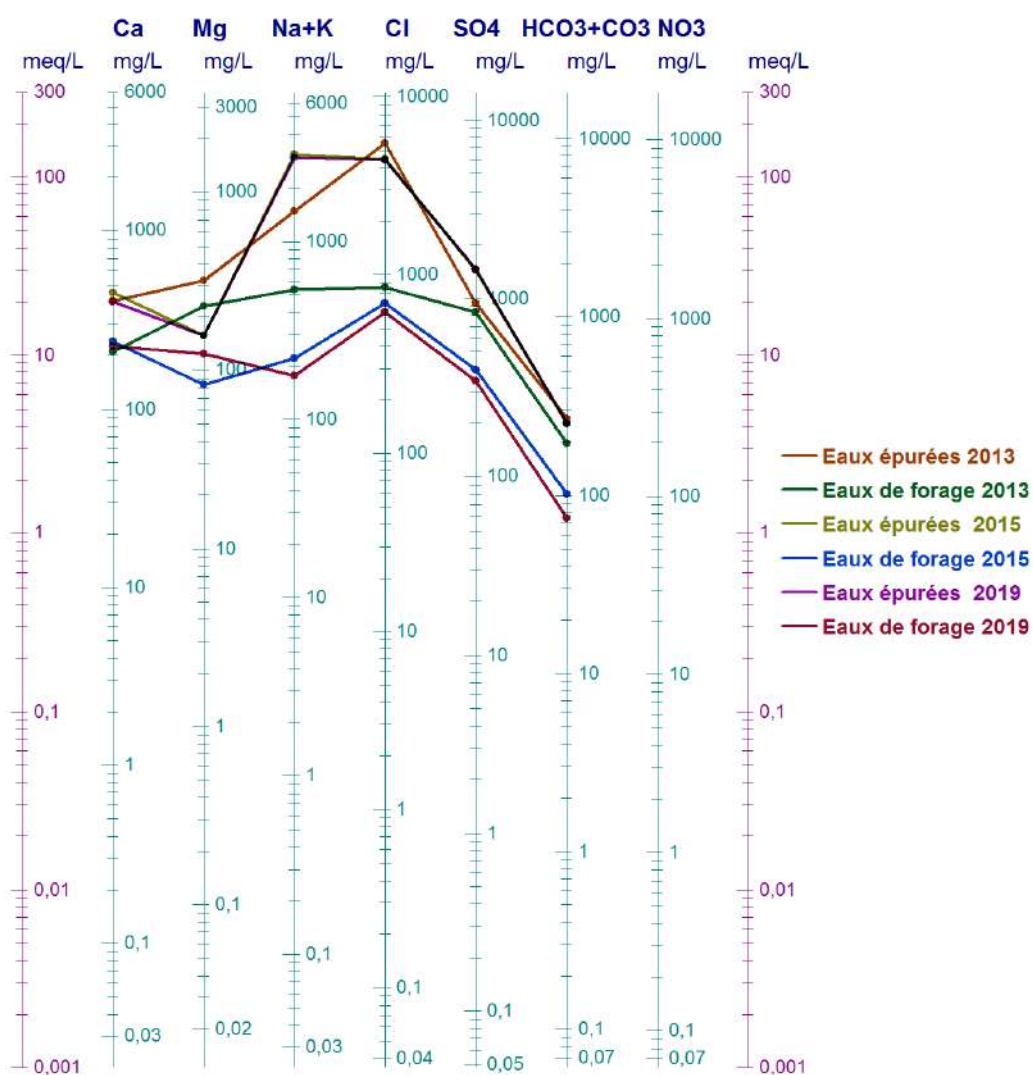


Figure 19. Faciès chimique des eaux d'irrigation selon le diagramme de Schoeller-Berkaloff.

3.10.2. Diagramme de PIPER

La représentation des analyses chimiques sur ce type de diagramme permet d'avoir une idée globale sur la composition chimique des eaux. Le principe consiste à représenter dans chaque triangle les quantités en réaction pour chaque cation ou anion après quoi, on obtient un point triple soulignant la prédominance d'un anion ou d'un cation. Ces deux points triples donnent un point critique représentant la nature chimique de l'échantillon considéré. Les moyennes des eaux d'irrigation épurées sont caractérisées par un faciès géochimique chloruré et sulfatée calcique et magnésienne, par contre les eaux conventionnelles sont caractérisées par la présence de deux faciès géochimiques ; chloruré et sulfatée calcique et magnésienne et chloruré sodique et potassique (Fig. 20). L'anion chlore est le plus dominant dans tous les eaux étudiées (Fig.20).

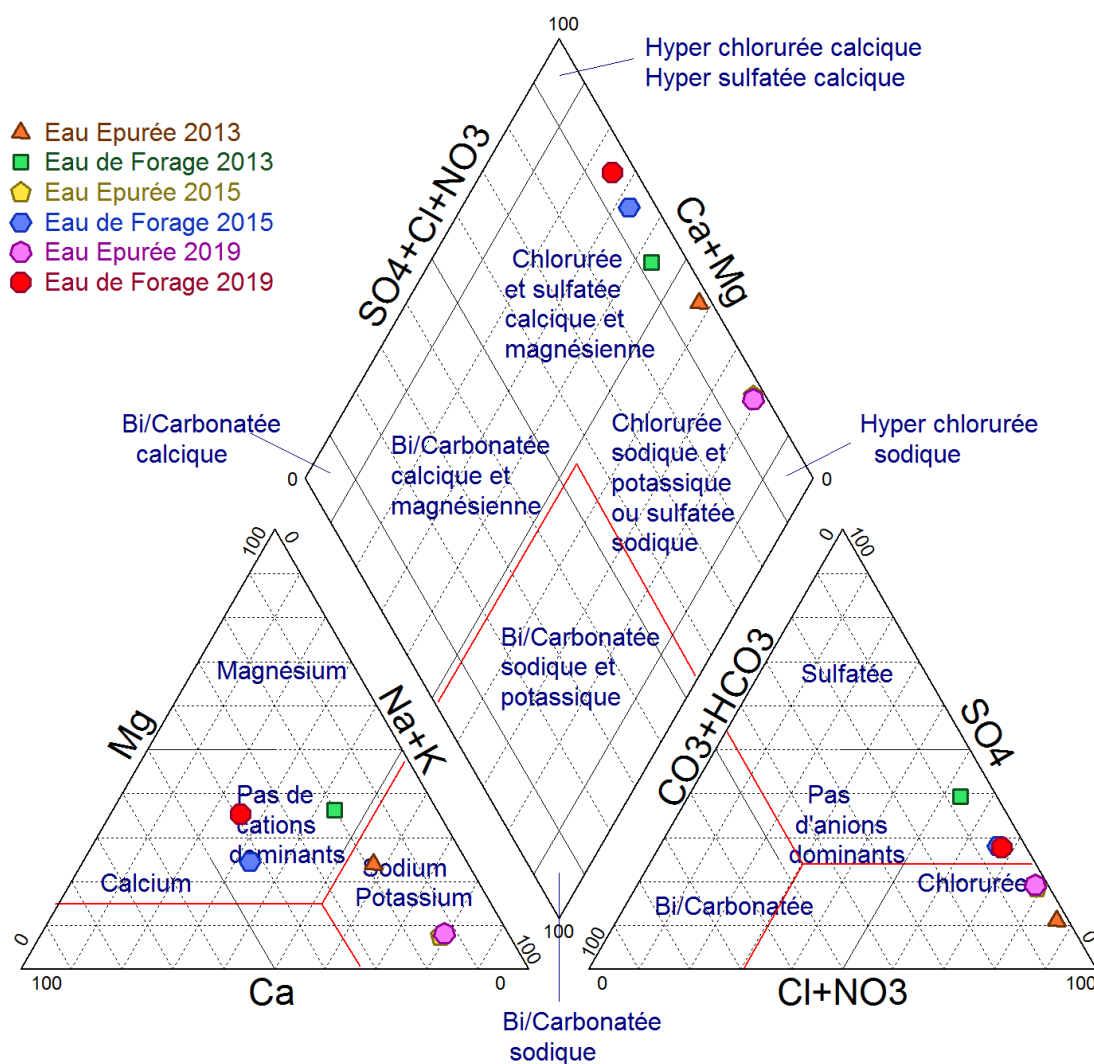


Figure 20. Faciès géochimique des eaux d'irrigation selon le diagramme de Piper

3.11. Classification des eaux

Afin d'illustrer l'aptitude des eaux à l'irrigation, généralement on utilise la méthode de l'US Salinity Laboratory, qui met en exergue deux caractéristiques de l'eau : sa salure globale, estimée par la conductivité électrique comme indicatrice du risque de salinisation secondaire et son caractère plus ou moins alcalinisant, exprimé par la valeur du S.A.R. Cette classification des eaux par qualité découle directement de la combinaison de ces deux caractères par utilisation d'un tableau à deux entrées : conductivité en abscisses et le SAR en ordonnées (Fig. 21).

La projection des valeurs moyennes de CE et SAR sur le diagramme de l'US Salinity Laboratory (Fig. 21) nous a permis de distinguer selon Durand (1983), que les concentrations moyennes des eaux conventionnelles appartient au classe C5-S2. Ils sont caractérisés par sa forte salinité et sodicité moyenne. Ces eaux présentent un danger

d'alcalinisation modéré à considérable principalement sur les sols à texture fine. Ces eaux doivent être apportés avec des quantités importants pour provoquer un bon lessivage.

Les eaux usées épurées sont des eaux très fortement salines et excessivement sodiques ($CE > 10$ dS/m et SAR moyenne > 24), Selon Durand (1983), ces types des eaux appartient aux classes (C5-S3) (Fig. 21), ce sont des eaux inutilisables pour l'agriculture, sauf en cas d'irrigation des plantes résistantes comme le palmier dattier dans nos zones sahariennes et sur des sols riches en gypse. La république algérienne dans son journal officiel n° 41 (2012), suivant les dispositions de l'article 15 du décret exécutif n° 07-149 a fixés la liste des cultures autorisées pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées selon leurs degrés de résistance (Annexe 18).

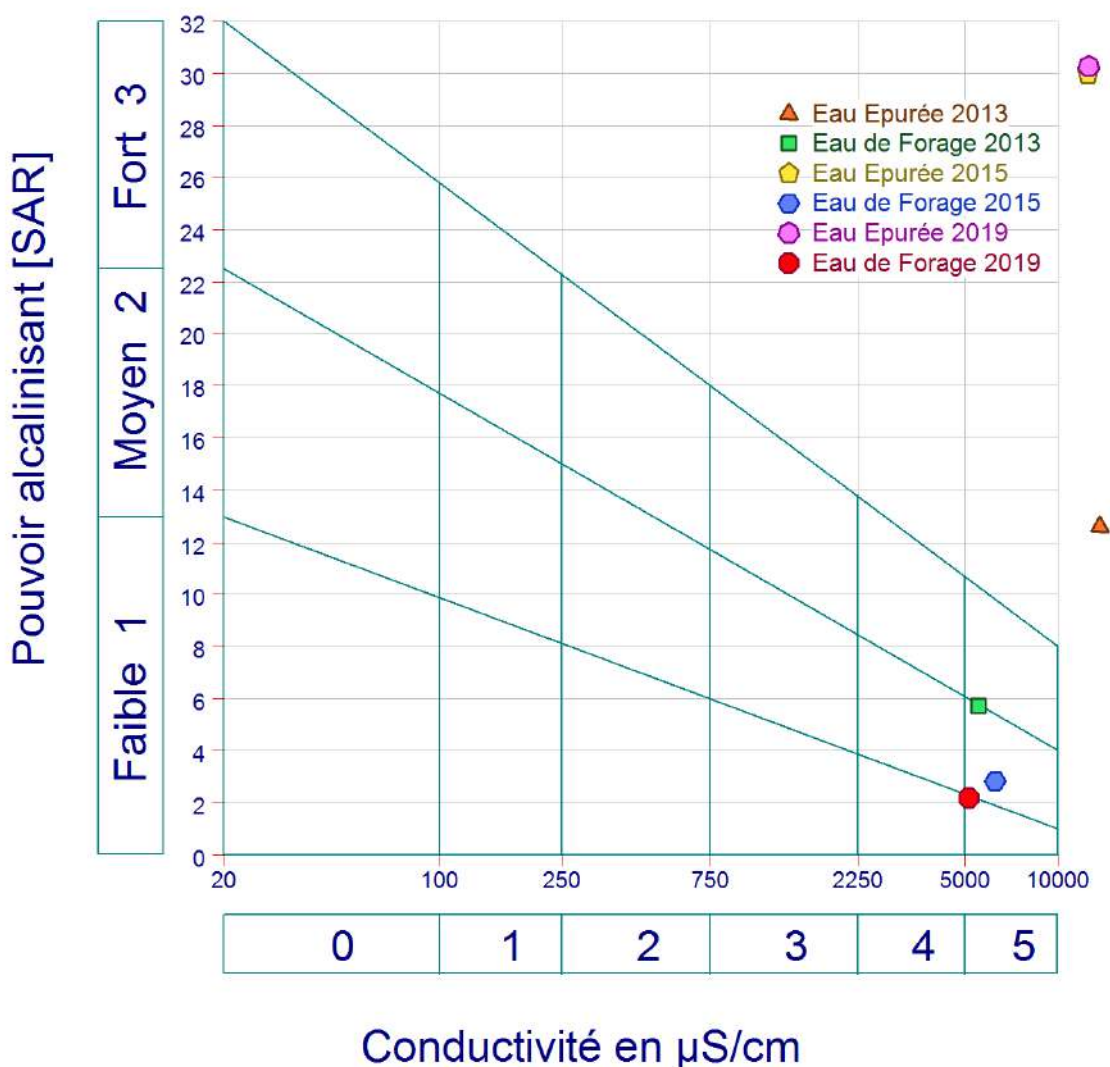


Figure 21. Classification de l'US Salinity Laboratory des eaux d'irrigation

Parallèlement, selon le diagramme de Willox (Fig. 22), les eaux d'irrigation conventionnelles et non conventionnelles sont des eaux de mauvaise qualité. L'irrigation avec ces derniers doit être effectuée avec précautions.

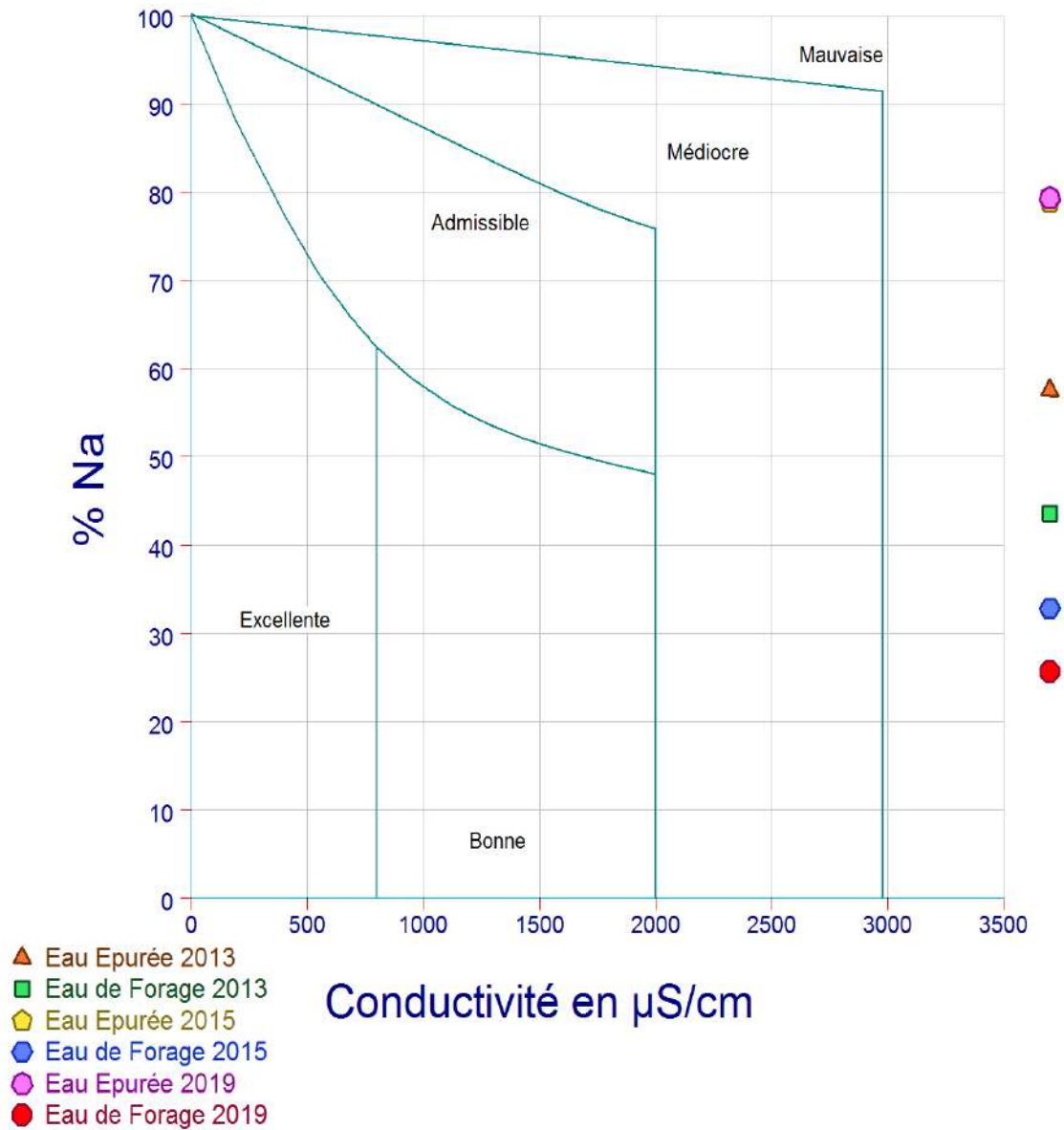


Figure 22. Classification des eaux d'irrigation selon le diagramme de Willox

3.12. Microbiologie des eaux d'irrigation

Concernant l'analyse bactériologique, deux prélèvements sont réalisés pendant la période des hautes eaux en Décembre 2018 et Avril 2019, dont les résultats sont consignés dans le tableau n° XV.

Tableau XV. Résultats de la densité des germes bactériens des eaux d'irrigation

Germes étudiées	L'eau d'irrigation		
	Dates de prélèvement	18/12/2018	19/4/2019
Coliformes Totaux (germes/100ml)	Eaux Forage	9,4x10 ²	0,3*10 ²
	Eaux usées épurées	43x10 ²	9,3*10 ²
Coliformes Fécaux (germes/100ml)	Eaux Forage	6,4x10 ²	0
	Eaux usées épurées	27x10 ²	2,3*10 ²
Streptocoques Totaux (germes/100ml)	Eaux Forage	2,3x10 ²	1,1*10 ²
	Eaux usées épurées	15x10 ²	1,5*10 ²
Streptocoques Fécaux (germes/100ml)	Eaux Forage	0,3x10 ²	0
	Eaux usées épurées	7,5x10 ²	0,3*10 ²
Clostridium (germes/100ml)	Eaux Forage	0	0
	Eaux usées épurées	0	0

Nos résultats mentionnés ci-dessous illustrent bien les variations de la charge microbiologique des eaux traitées entre 2018 et 2019, notamment les saisons. Les teneurs en coliformes totaux par 100ml des eaux usées épurées sont comprises entre 43.10² germes/100ml pendant Décembre 2018 et 9,3.10² germes/100ml pendant Avril 2019 (Table. X). Dans les eaux conventionnelles, les coliformes totaux sont moins considérables par rapport aux précédents, les teneurs varient entre 9,4.10² germes et 0,3.10² germes/100ml pendant les mêmes périodes d'études (Table. XV).

La concentration bactérienne en coliformes fécaux varie entre 27.10² germes/100ml en décembre 2018 et 2,3.10² germes/100ml en Avril 2019 dans les eaux usées épurées, d'autre côté, elle varie entre 6,4.10² et 0 germes/100ml dans les eaux conventionnelles (Table. XV).

Les streptocoques totaux sont oscillés entre 15.10² germes/100ml en décembre 2018 et 1,5.10² germes/100ml pendant Avril 2019 au niveau des eaux épurées. Par contre, elles oscillent entre 2,3.10² et 1,1.10² germes/100ml pendant les mêmes périodes d'étude (Table. XVII). Parallèlement, les streptocoques fécaux des eaux épurées sont estimés à 7,5.10² germes/100ml en décembre 2018 et 0,3.10² germes/100ml en Avril 2019.

Concernant la concentration des streptocoques fécaux dans les eaux conventionnelles pendant la même période, elle est variée entre $0,3.10^2$ et 0 germes/100ml (Table. XV). Les Clostridium sont absents complètement dans les deux types des eaux pendant nos prélèvements (Table. XV).

Selon les directives Algérienne de réutilisation agricoles des eaux épurées présentés dans le Journal Officiel Algérien (2012), (1000 germes/ 100 ml d'eau), et par l'analyse des résultats présentés ci-dessus, cela indique que les eaux usées épurées de la stations d'épuration de Ouargla présente une fluctuation de degré de pollution microbiologique, cela est liée aux nombreux facteurs à savoir la date de prélèvement où l'effet saison est nettement observé sur la qualité microbiologique des eaux épurés. Selon Mensous (2011) ; Bouhanna (2014), l'intensité de rayonnement solaire associé à des températures très élevées, ainsi que la durée longue des jours, la salinité, le pH et la température de l'eau du bassin peuvent influencer l'efficacité du traitement de la Station d'épuration de Ouargla par le lagunage aéré, Ceci peut être dû à cette saison.

Les eaux usées épurées de la station d'épuration de Ouargla interviennent sous le groupe C, signifiant la possibilité de l'irrigation localisée des cultures de la catégorie B (arbres fruitiers, cultures et arbustes fourragers, cultures céréalières, cultures industrielles, arbres forestiers et plantes florales et ornementales), si les ouvriers agricoles et la population ne sont pas exposés. Ce qui consolide nos résultats obtenus. D'un autre côté, par comparaison avec les normes internationales et algériennes des eaux d'irrigation (annexe 8 et 9), les eaux conventionnelles sont considérées comme des eaux non polluées, sauf pour les streptocoques totaux en décembre 2018, où les concentrations estimées sont légèrement élevé.

Conclusion

Les pratiques d'irrigation dans la zone d'étude sont anarchiques et d'apport insuffisantes, notamment dans les stations irriguées par les eaux non conventionnelles. Les doses et les fréquences d'irrigation appliquées ne couvrent pas les besoins en eau de palmier dattier, cela favorise l'accumulation saline ascendante dans les sols.

Nos résultats obtenus montrent que les eaux usées épurées ainsi que les eaux conventionnelles sont très dures présentent des pH légèrement alcalins à alcalins. La salinité dépasse largement les seuils de tolérances des cultures. Ces eaux présentent une minéralisation excessive. Les eaux d'irrigation dans le périmètre d'étude sont de mauvaise qualité. Leurs teneurs élevées en sels dissous peuvent causer des problèmes assez sévères au niveau des sols et des plantes, surtout concernant les risques de salinisation, sodisation et d'alcalinisation des sols, aussi, par leurs teneurs élevées en ions toxiques de sodium et chlorure. L'irrigation par ces eaux doit être pratiquée avec précaution. Le faciès chimique des eaux usées épurées est chloruré sodique par contre, les eaux conventionnelles sont équilibrées.

D'autre part, les eaux usées épurées sont fertilisantes car elles présentent des concentrations notables en nitrates et phosphore. L'irrigation par ces eaux nécessite les suivis des accumulations de ces éléments dans les sols et des nappes phréatiques superficielles.

Parallèlement, vue l'absence des traitements complémentaires de nature désinfecteuse dans le procédé de traitement des eaux épurées au niveau de la station d'épuration de Ouargla, les effluents évacués par cette dernière n'atteindre jamais des niveaux de qualités souhaitables, avec l'absence de suivi de la qualité microbiologique des eaux non conventionnelles. Nos résultats obtenus montrent que les germes microbiologiques fécaux sont présents dans les eaux d'irrigation étudiés avec des concentrations différentes, où les eaux épurées sont considérées comme des eaux polluées selon les normes nationales et internationales de qualité des eaux d'irrigation en comparaison avec les eaux conventionnelles. Aussi, la caractéristique parasitologique des eaux usées épurées de la station d'épuration est encore reste indéterminée. Cela nécessite des études approfondies.

Chapitre VIII. Impact des eaux épurées sur la nappe phréatique

Introduction

Ces dernières années, la réutilisation des eaux non conventionnelles a pris de l'ampleur plus en plus à travers le monde. Nombreuses études ont discuté les effets de ces eaux sur les sols agricoles, les cultures et les nappes superficielles. A Ouargla, les travaux de recherche réalisés sur ce sujet ont touché principalement les sols et les cultures, parallèlement les impacts des eaux épurées sur les nappes superficielles sont peu discutés.

La présente partie d'étude est consacrée à la présentation des principaux résultats de suivis de l'état de la nappe phréatique dans une zone de réutilisation agricole des eaux épurées. Une étude comparative est effectuée entre trente-trois stations où les modes de gestion sont différents.

1. Variation de niveau de la nappe

Les mesures de profondeurs de la nappe réalisées dans la zone ont permis de réaliser deux types de cartes de variation, la première pour le niveau statique et la deuxième pour le niveau piézométrique.

1.1. Niveau statique

En se basant sur la classification des profondeurs des nappes phréatiques d'Edmonds et *al.* (1998), et Daddi Bouhoun (2010). Les auteurs ont évalué la profondeur de la nappe phréatique en cinq groupes en fonction de leurs actions limitatives sévère, modéré et insignifiante sur les arbustes, les arbres et le palmier dattier, avec les groupes de profondeurs respectives : 0-0,457 m ; 0,457-0,914 m ; 0,914 m-1,5m ; 1,5-3 m et supérieur à 3m. Dans le périmètre d'étude, la variabilité de niveau statique de la nappe phréatique diffère d'un périmètre à l'autre. Durant toute la durée d'étude, la profondeur de la nappe varie de l'amont à l'aval entre un maximum supérieur à 3m enregistré au niveau de P11 et P12 et un minimum inférieur à 0,5 m mesuré au niveau P26 et P27 (Fig. 23-26).

Nos résultats ont montré que la zone d'étude est composée de deux zones distinctes en fonction de niveau statique de la nappe phréatique :

- **Zone de nappe superficielle** ; comporte les sites P25, P26, P27 et P28, dont le niveau inférieur à 1m de profondeur (Fig. 23-26). Cette section est caractérisée par la présence d'un obstacle hydromécanique qui affecte le développement naturel de système racinaire des palmiers. Selon Daddi Bouhoun (2010), l'enracinement des palmiers dattiers est conditionné par le type de profils d'accumulation gypso-calcaire, notamment le niveau des croûtes et le niveau des

nappes phréatiques, où le niveau du système racinaire des palmiers dattiers est limité par contact des eaux phréatiques. Parallèlement, ces sites favorables pour les cultures à système racinaire superficielles notamment les cultures fourragères.

- **Zone de nappe profonde** ; comporte le reste de périmètre (Fig. 23-26), dont le niveau est supérieur à 1m de profondeur. Dans cette section de périmètre, le système racinaire devient plus profond qui favorise le développement du palmier dattier. C'est une zone phœnicicoles par excellent.

Des fluctuations entre remonter et rabattement de la nappe phréatiques sont enregistrés dans cette zone agricole. Les mesures de niveau statique réalisées ont montré que vers la fin de l'essai, le périmètre a connu une remontée de la nappe phréatique d'une moyenne de 10cm, due aux changements de monde et des doses d'irrigation qu'a connue la zone qui influent sur l'alimentation de la nappe. De plus, l'absence totale du système de drainage peut être aggravée la situation dans la zone.

D'après les mesures réalisées par l'ANRH entre 2010 et 2014, la nappe phréatique dans la zone d'étude a connu des fluctuations de niveau statique d'une moyenne de 10 cm (Annexe 19). Parallèlement, nos résultats des mesures statiques de la nappe phréatique ont montré la diminution de niveau des eaux par rapport le sol pendant les périodes des basses eaux (Fig. 27 ; Fig. 28). Cette diminution est liée probablement à l'effet de l'évaporation maximale pendant ces périodes qui influent sur le départ des eaux vers les couches superficielles de sols.

Les travaux de recherches réalisées dans la zone d'étude sur l'effet de stress hydromécanique formé par la présence d'une nappe phréatique à faible profondeur (on cite la recherche de Daddi Bouhoun, 2010) ont montré que cette dernière a des impacts notables sur la chute des rendements, notamment au niveau des exploitations phœnicicoles.

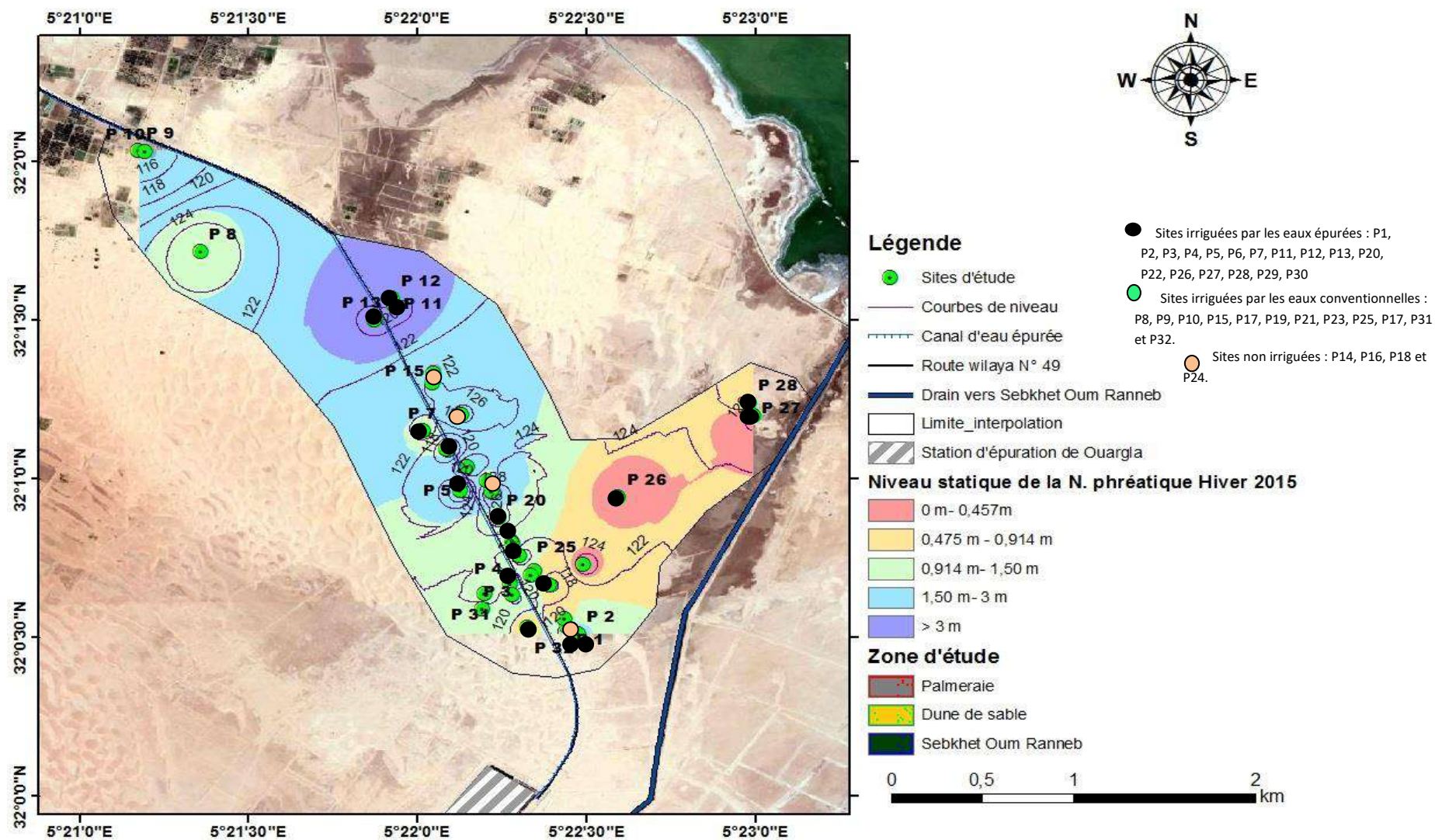


Figure 23. Variation du niveau statique de la nappe phréatique en Hiver 2015

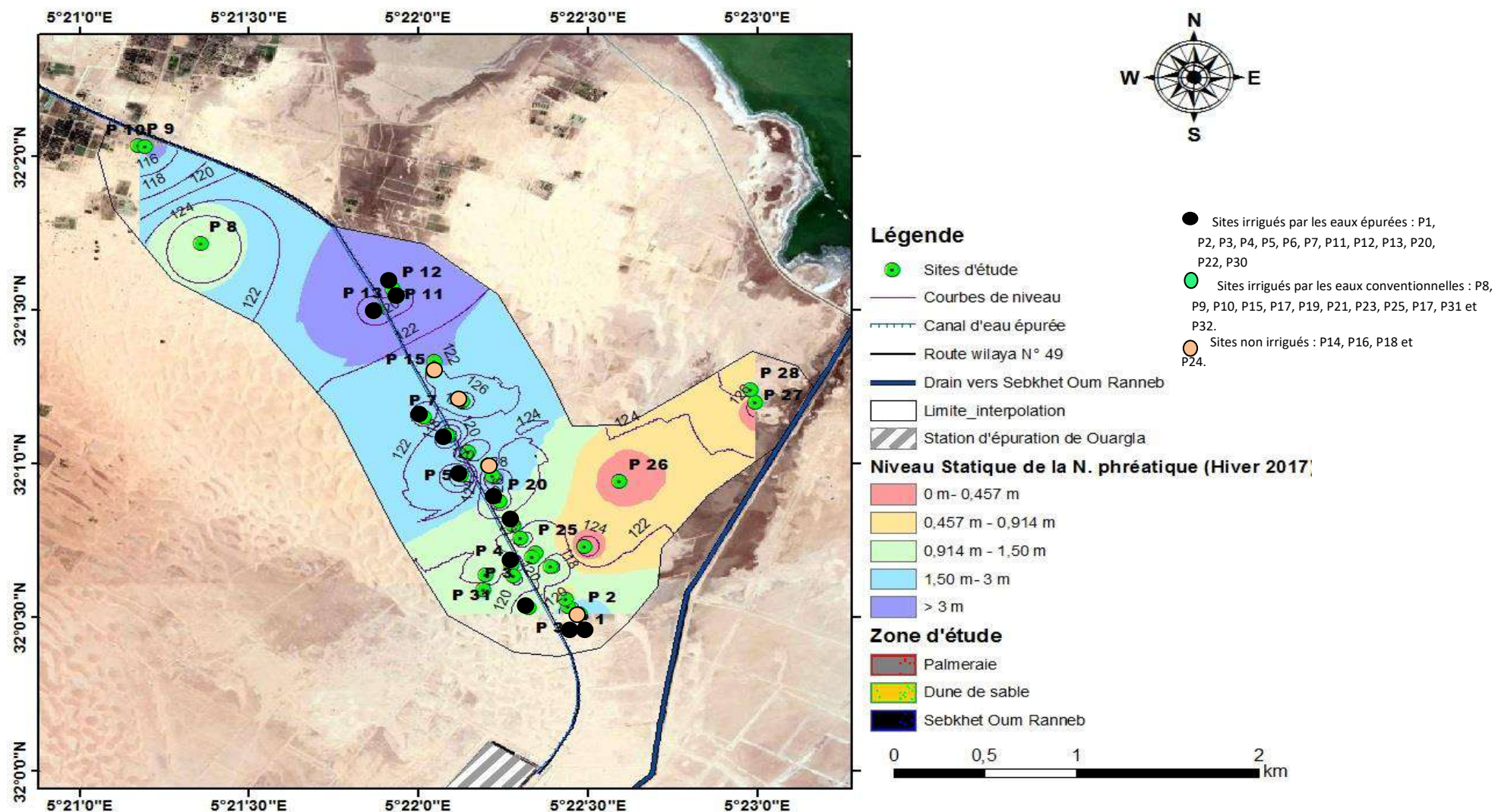


Figure 24. Variation du niveau statique de la nappe phréatique en Hiver 2017

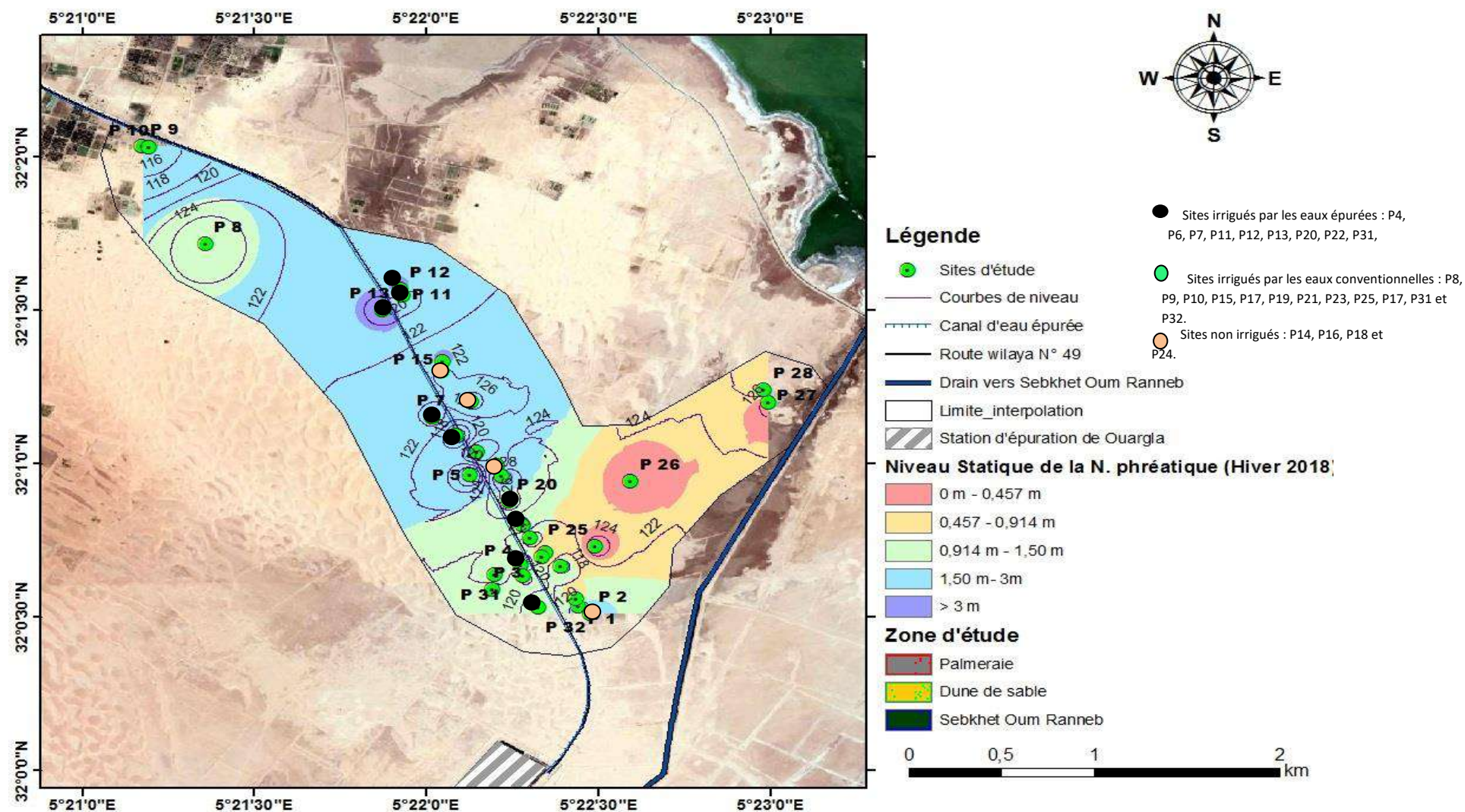


Figure 25. Variation du niveau statique de la nappe phréatique en Hiver 2018

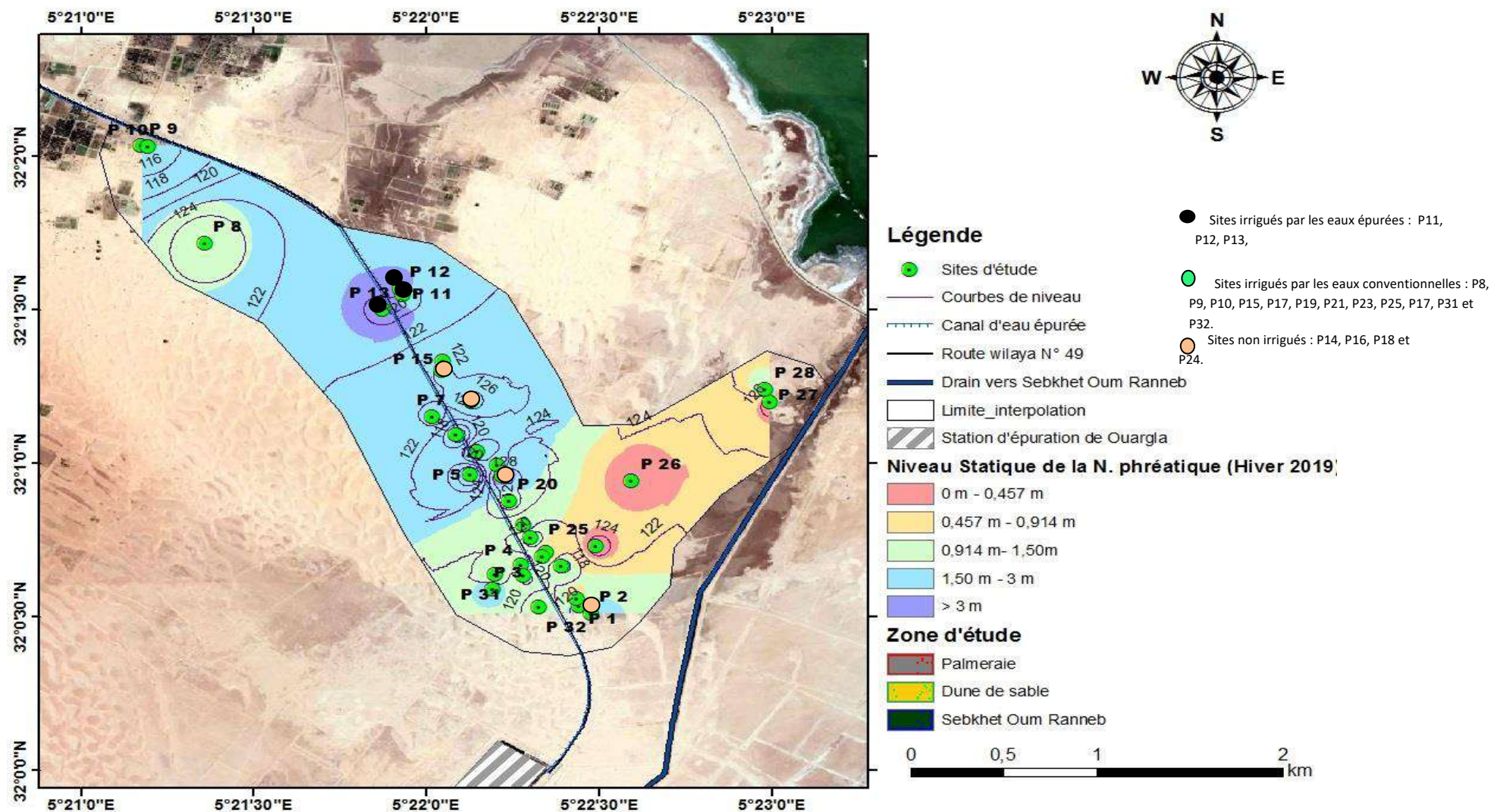


Figure 26. Variation du niveau statique de la nappe phréatique en Hiver 2019

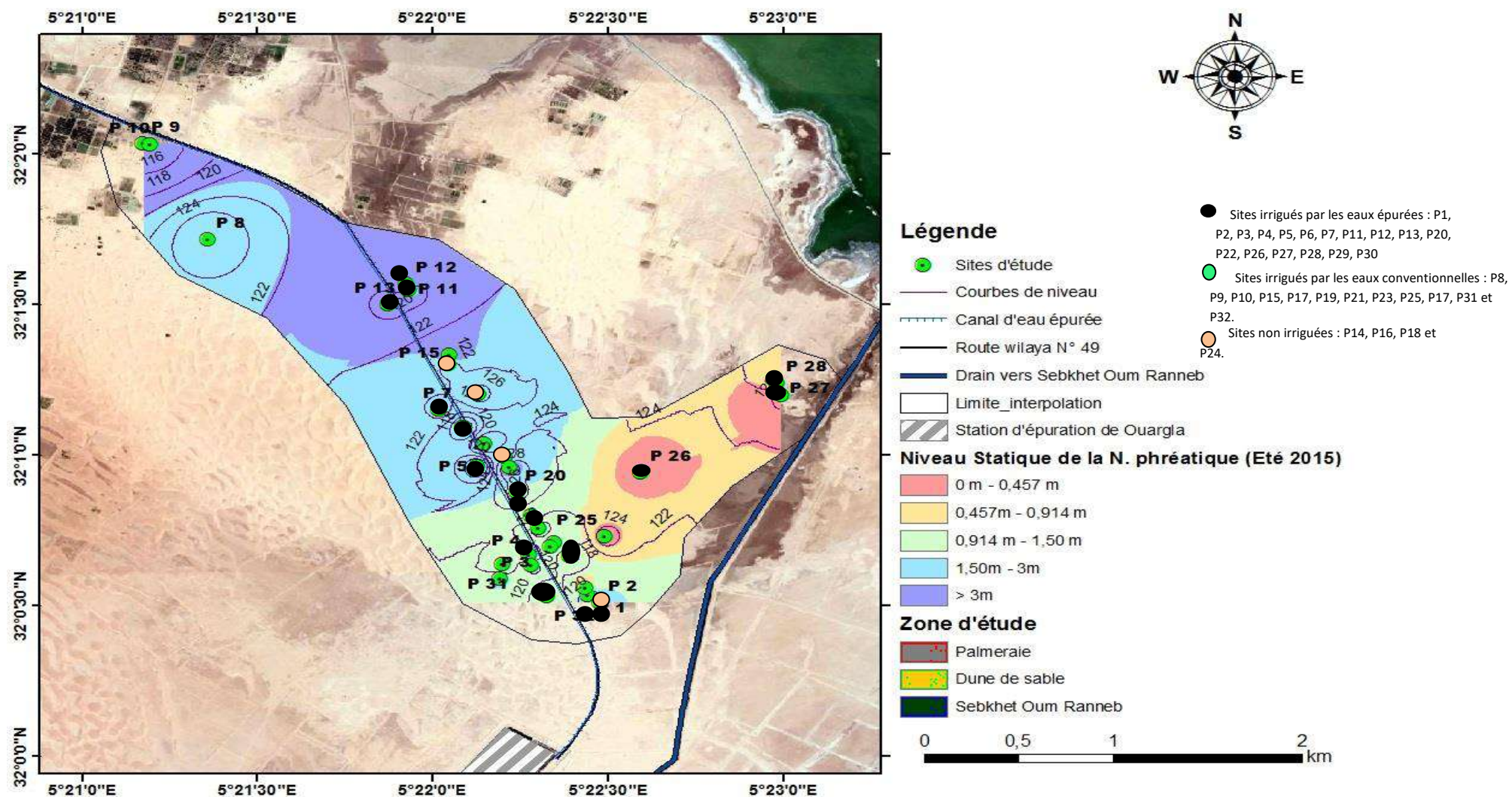


Figure 27. Variation du niveau statique de la nappe phréatique en Eté 2015

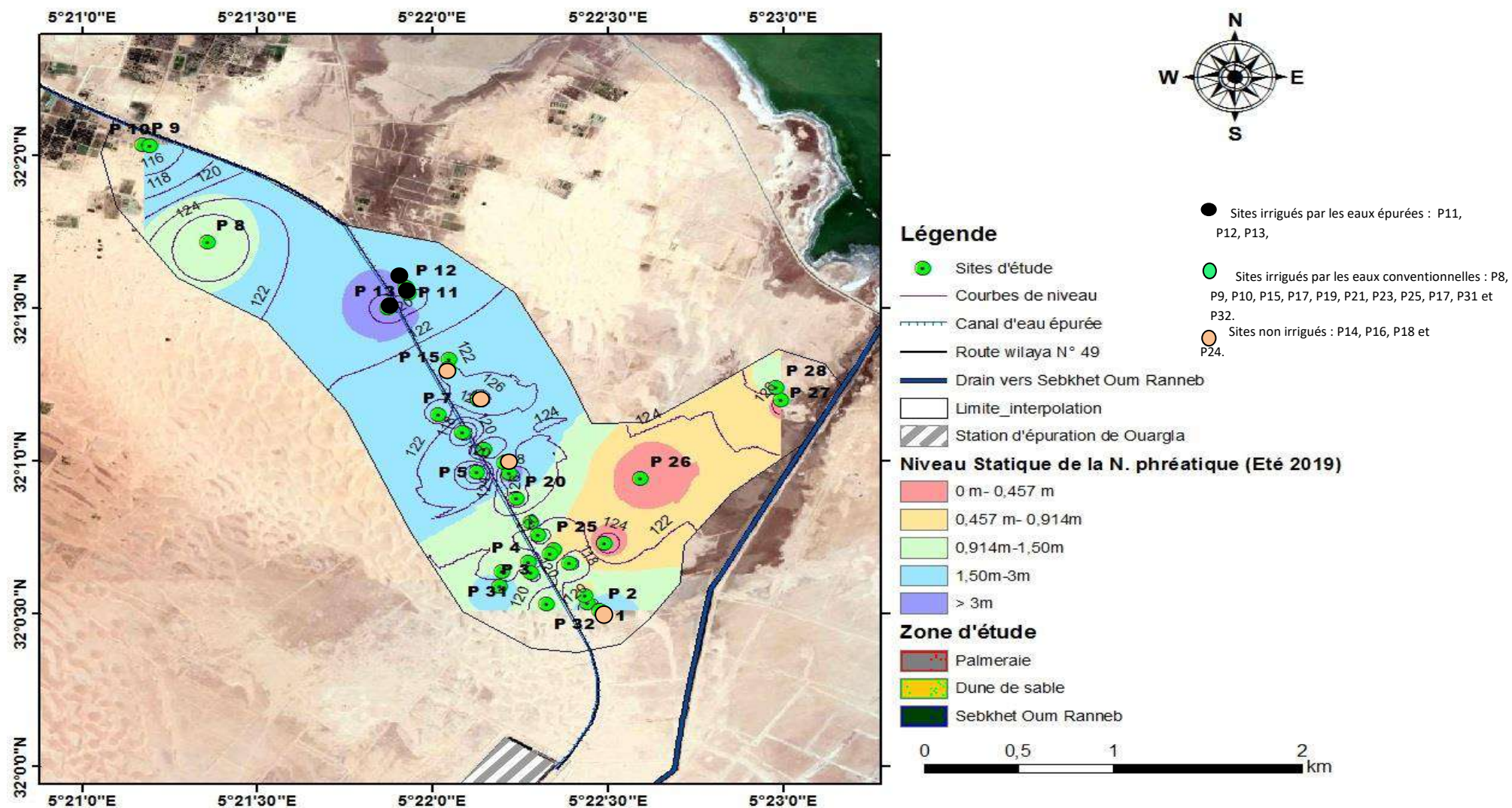


Figure 28. Variation du niveau statique de la nappe en Eté 2019

1.2. Piézométrie de la nappe phréatique

Renard (2002), a défini la piézométrie par la charge hydraulique qui représente la hauteur du niveau de l'eau mesurable dans un puits (altitude mesurée par rapport à la mer). Dans le cas d'une nappe libre, il s'agit de courbes de mêmes niveaux d'eau dans le sous-sol. Elles sont indiquées sous forme de courbes continues sur les cartes.

L'analyse de données présentées par les cartes piézométriques (Fig. 29-34), permet de constater que l'écoulement souterrain s'est fait, de l'amont vers l'aval généralement suivant une direction du Sud-est vers Nord-ouest. Durant cette étude, la piézométrie varie entre 114 m au niveau du site P9 et P10 pendant les périodes des basses eaux à une piézométrie de 130 m au niveau site P19 pendant les périodes des hautes eaux.

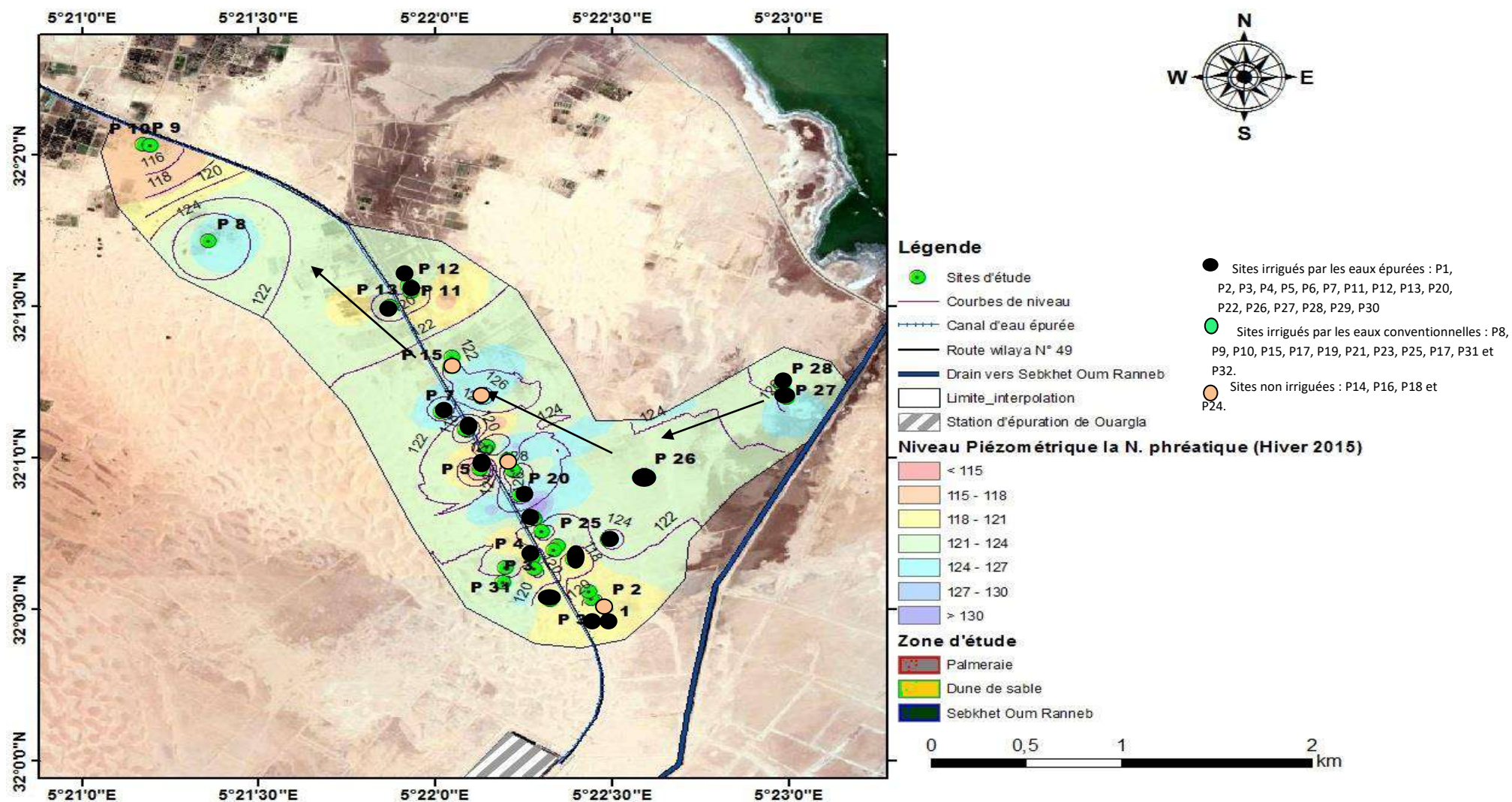


Figure 29. Piézométrie de la nappe phréatique en Hiver 2015

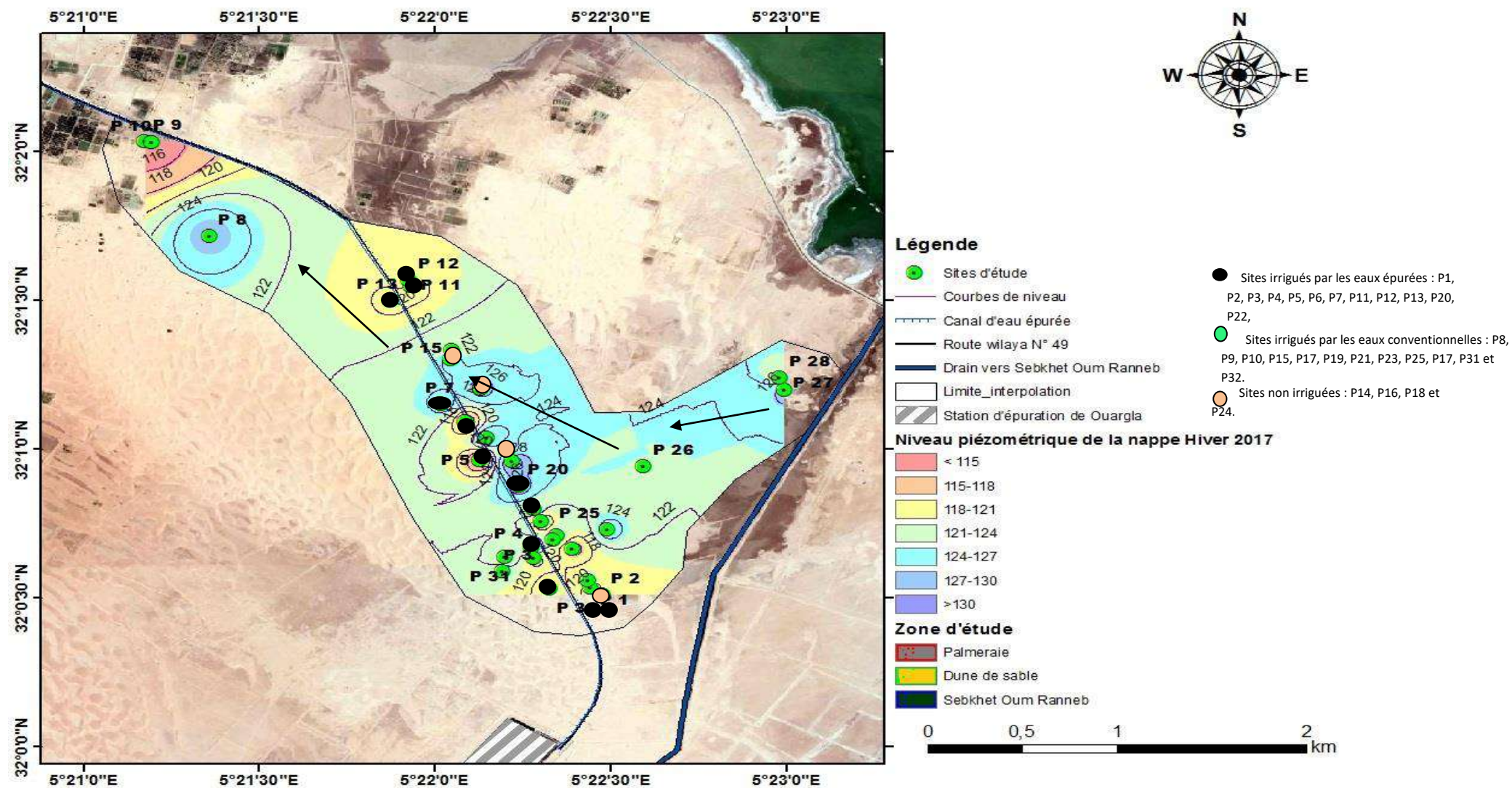


Figure 30. Piézométrie de la nappe phréatique en Hiver 2017

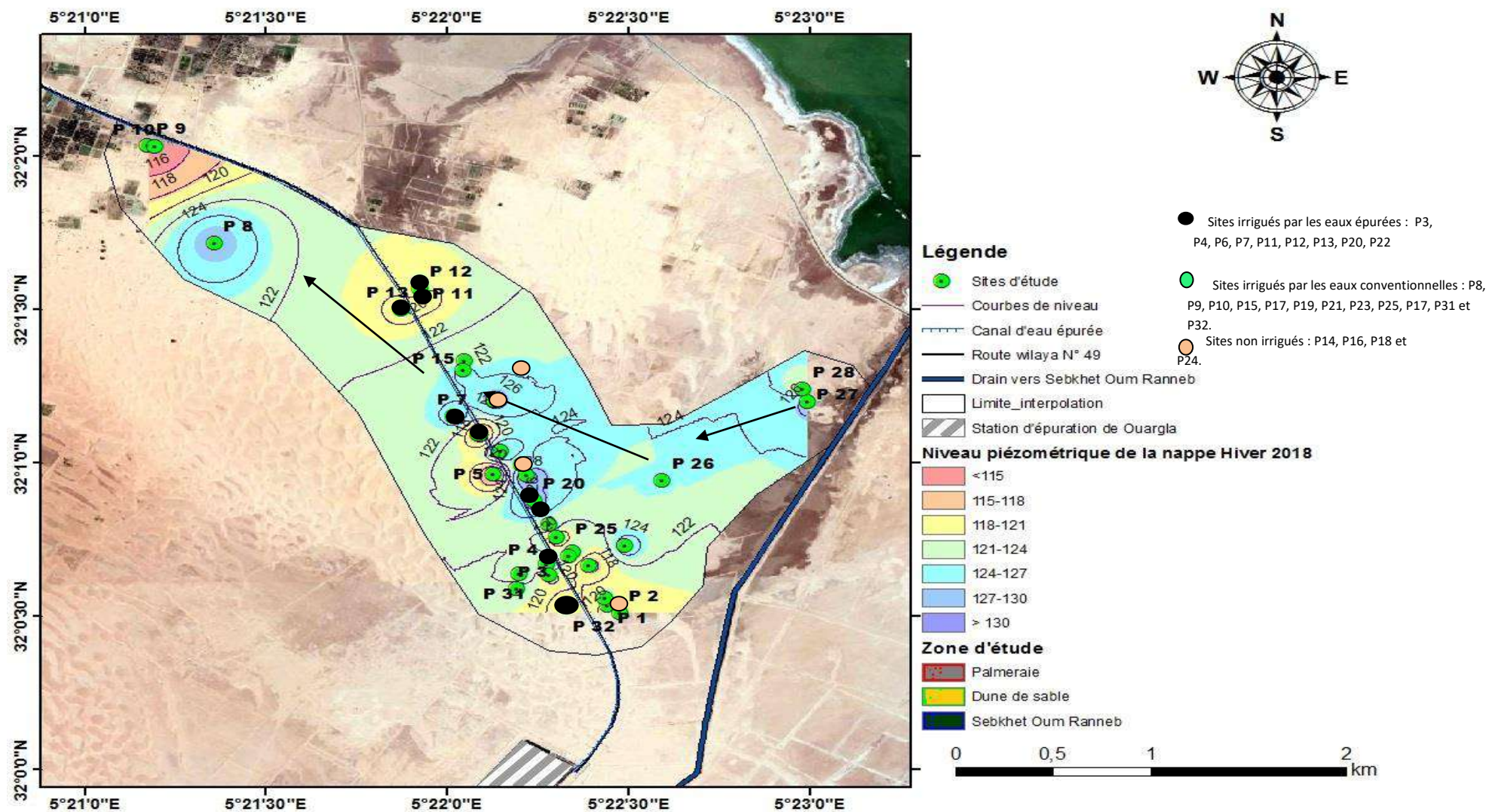


Figure 31. Piézométrie de la nappe phréatique en Hiver 2018

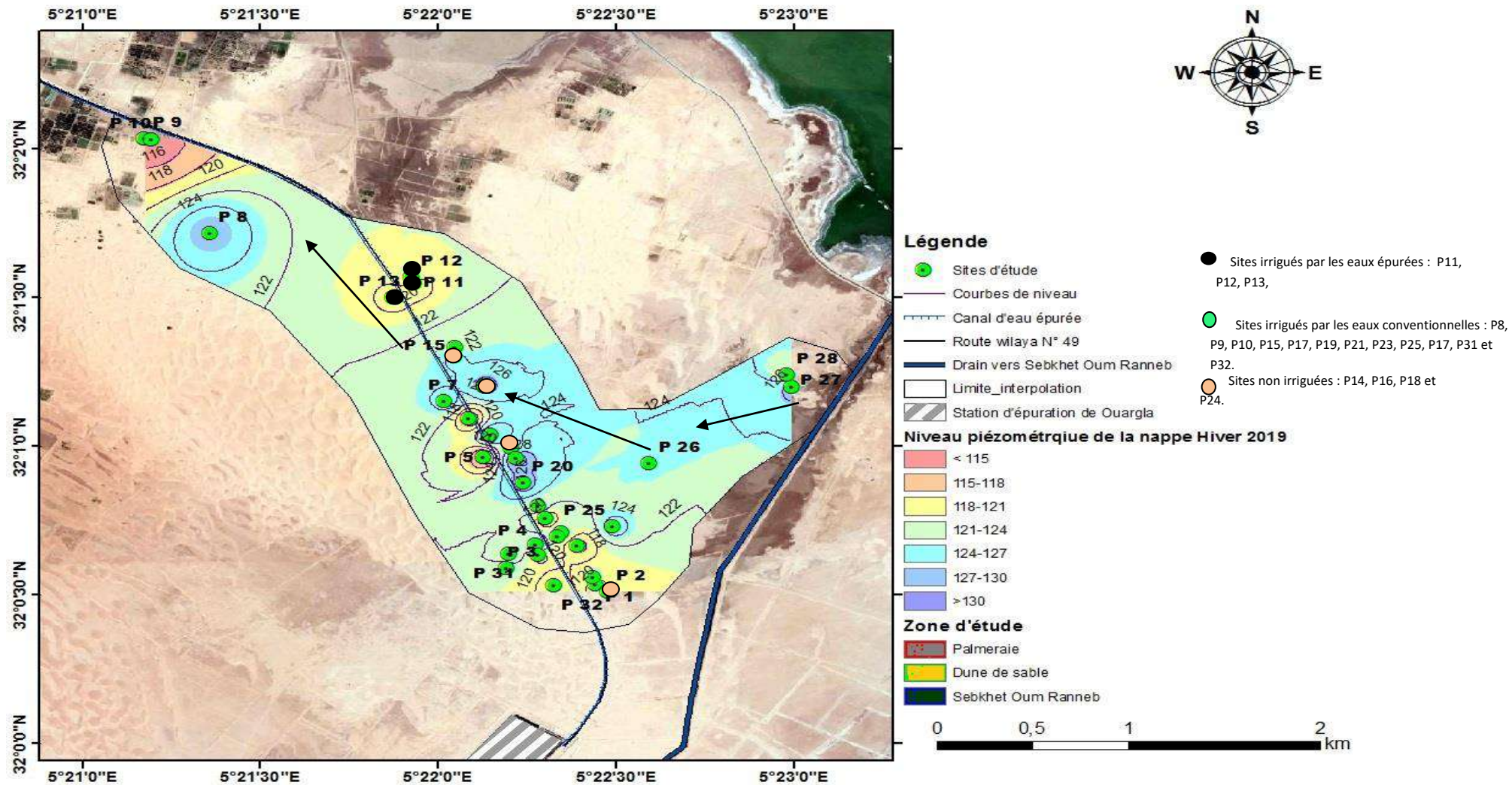


Figure 32. Piézométrie de la nappe phréatique en Hiver 2019

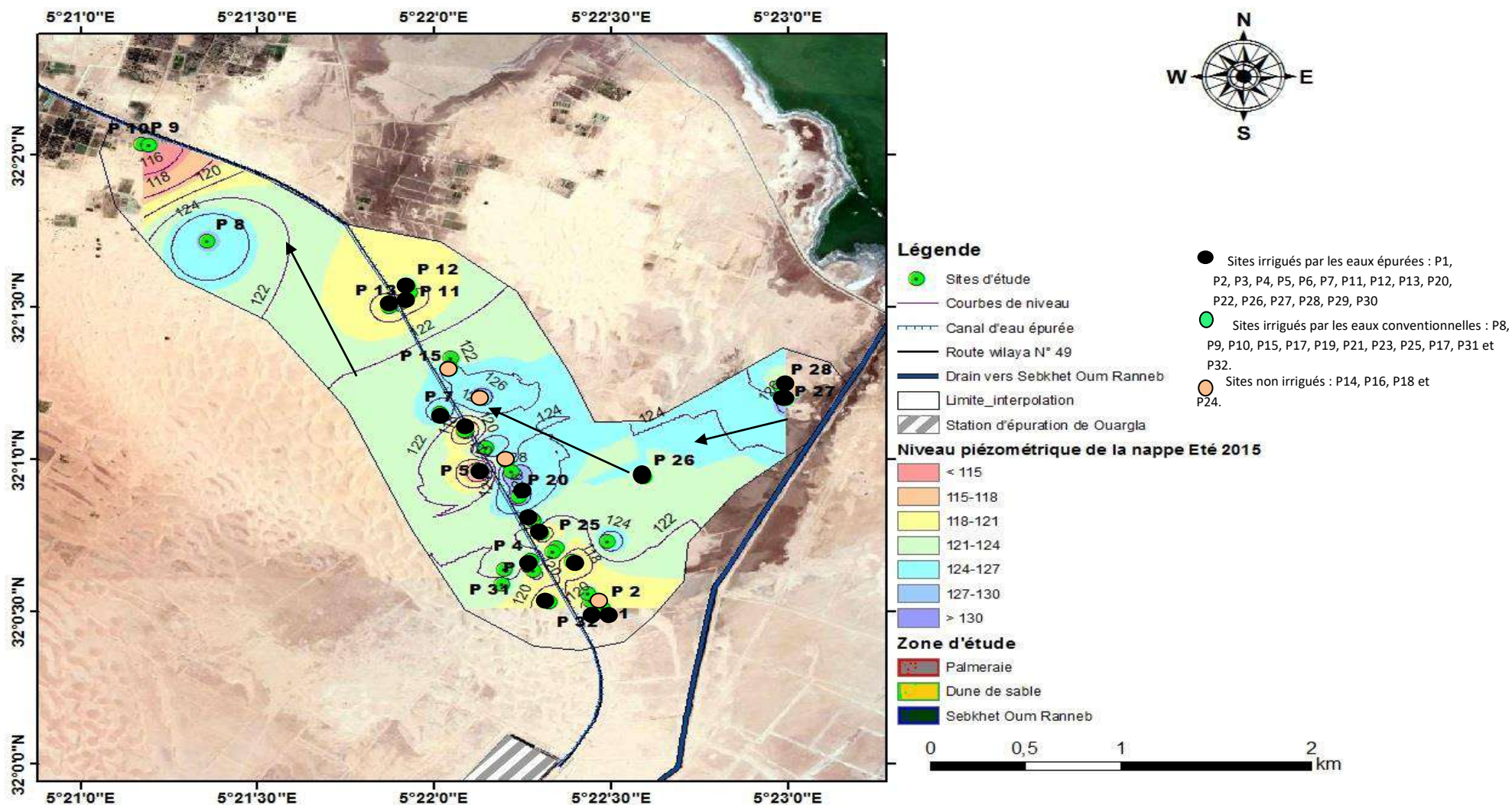


Figure 33. Piézométrie de la nappe phréatique en Eté 2015

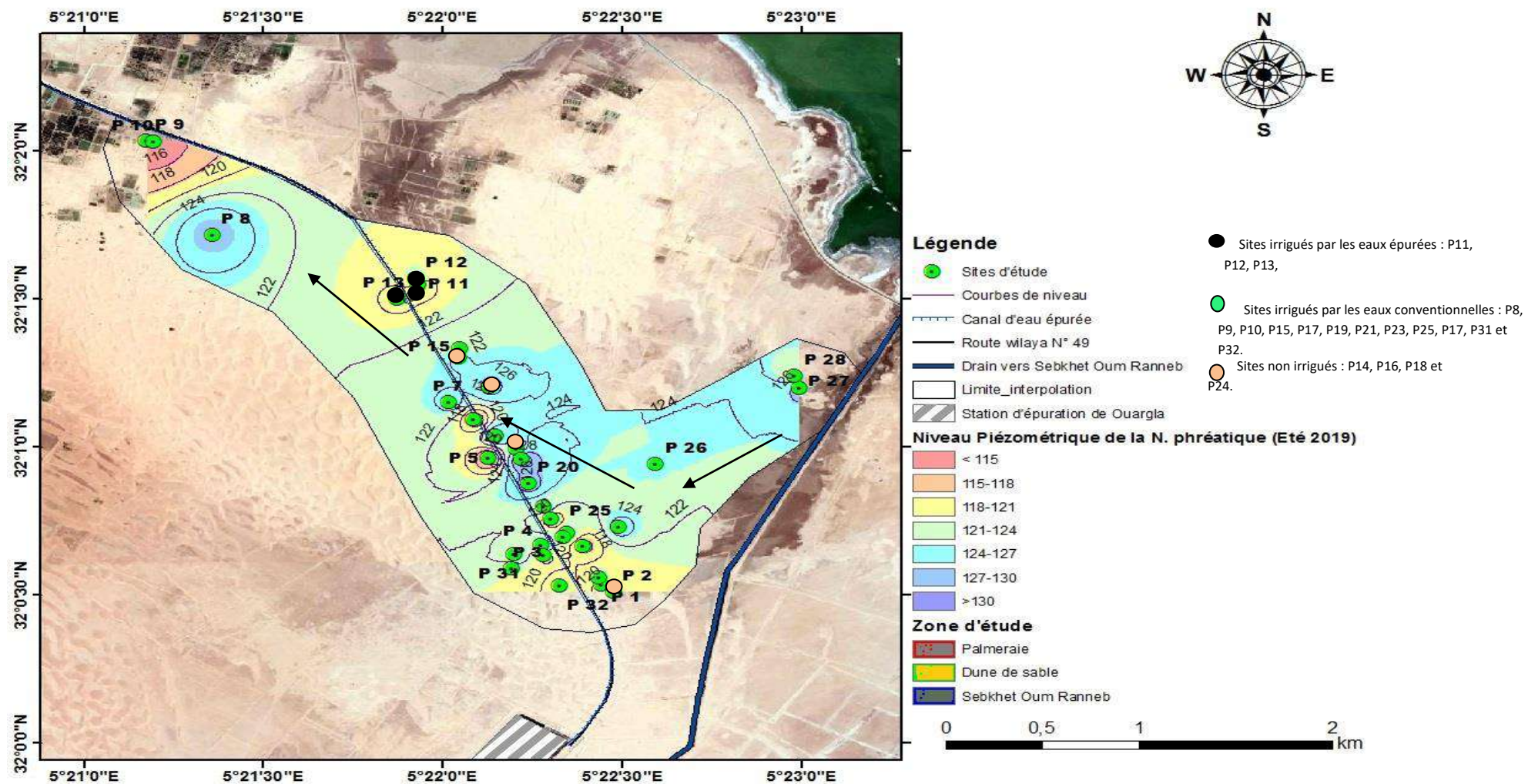


Figure 34. Piézométrie de la nappe phréatique Eté 2019

2. Qualité hydro-chimiques des eaux phréatiques

L'étude hydro-chimiques des eaux phréatiques dans la zone d'étude a été effectuée sur un certain nombre de paramètres habituellement utilisés pour l'estimation de la qualité des eaux, incluant : la température, le pH, la conductivité électrique, la salinité, le chlore total, l'oxygène dissous, forme azotée (nitrate /nitrite et ammonium), la demande biochimique en oxygène (DBO₅), la demande chimique en oxygène DCO et l'ortho-phosphate PO₄³⁻.

2.1. Potentiel d'Hydrogène

Le pH de l'eau conditionne les équilibres physico-chimiques, en particulier l'équilibre calco-carbonique et donc l'action de l'eau sur les carbonates (attaque ou dépôt). Le pH est acide dans les eaux des nappes sableux ou granitique. Il est alcalin dans les sols calcaires (Beauchamp, 2000). Nos résultats obtenus indiquent que le pH des eaux phréatique dans toutes les stations étudiées est voisin de la neutralité avec un caractère plus ou moins alcalin.

Au niveau des sites non irrigués, les valeurs moyennes du pH des eaux phréatiques sont oscillées dans un intervalle borné entre $7,60 \pm 0,08$ à $7,80 \pm 0,14$ (Fig. 35). Celles des sites irrigués par les eaux conventionnelles varient entre $7,52 \pm 0,17$ à $7,79 \pm 0,22$ (Fig. 35). Concernant les sites irrigués par les eaux épurées, le pH des eaux varie entre $7,67 \pm 0,24$ à $7,85 \pm 0,25$ (Fig. 35).

Concernant les périodes des hautes eaux, les valeurs de pH des eaux phréatiques des sites non irrigués borné entre un minimum de 7,6 un maximum de 7,75 avec un moyen de $7,68 \pm 0,06$ (Fig. 36). Pour les sites irrigués par les conventionnelles, le pH des eaux varie entre 7,59 et 7,71 avec un moyen de $7,70 \pm 0,08$. Parallèlement, le pH des eaux phréatiques des sites irrigués par les eaux non conventionnelles allées de 7,67 à 7,81 avec un moyen de $7,75 \pm 0,06$ (Fig. 36).

Les périodes des basses eaux ont connu la même allure de variation de pH. Les concentrations allées de 7,65 à 7,8 avec un moyen de $7,73 \pm 0,11$ pour les sites non irrigués. Les pH des eaux enregistrées pendant les mêmes périodes des sites irrigués par les eaux conventionnelles allés 7,52 à 7,58 avec un moyen de $7,55 \pm 0,04$. Concernant les sites irrigués par les eaux épurées, le pH des eaux varie entre 7,73 à 7,85 avec un moyen de $7,79 \pm 0,09$ (Fig. 37).

Toutefois, quoi que l'analyse factorielle discriminante a montré que le facteur pH eau est caractérisé les sites irrigués (annexe 20), l'analyse de la variance et le test de Newman-Keuls (Annexe 21 et 22) montrent que les variations de pH entre les sites étudiés sont non significatives.

En revanche, les résultats de pH situent généralement dans les normes O.M.S. des eaux souterraines ($6,5 < \text{pH} < 8,5$ d'après O.M.S. 2006). D'autre part, nos résultats obtenus sont comparables à ceux déclarés par Djidel (2008), et Slimani (2015), les auteurs ont déclaré que le pH des eaux phréatiques à Ouargla est compris entre 7,5 et 8. Parallèlement, les mesures réalisées dans la zone d'étude par l'ANRH entre 2010 et 2014 ont montré que le pH des eaux phréatiques varie entre 6,98 et 8,55 (Annexe 19).

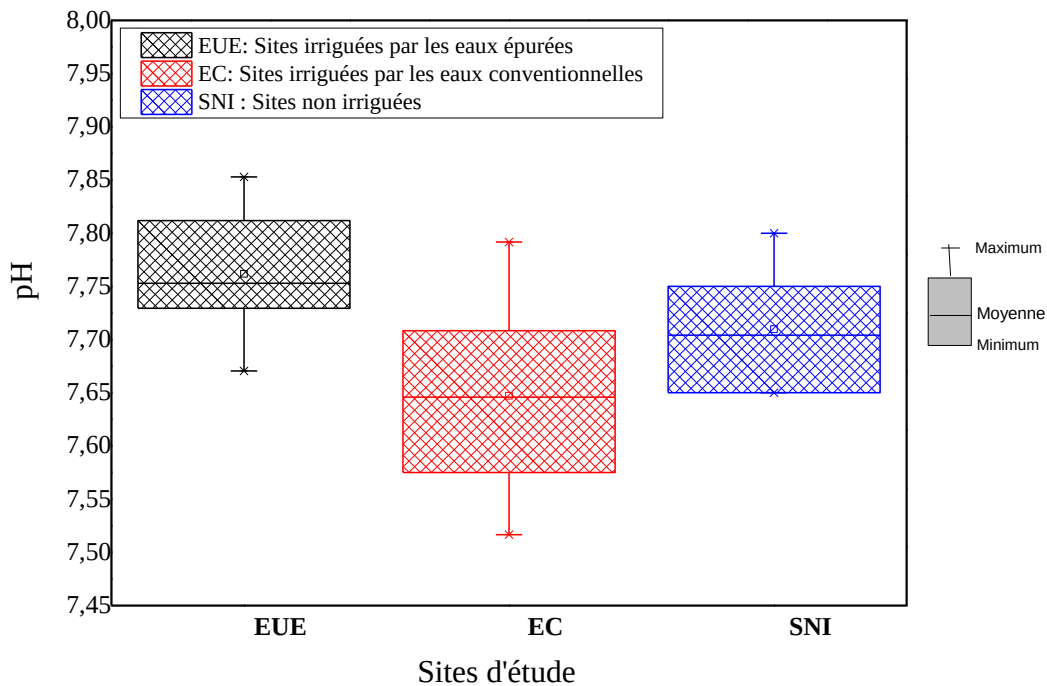


Figure 35. Variation moyenne de pH des eaux phréatiques entre 2015 et 2019

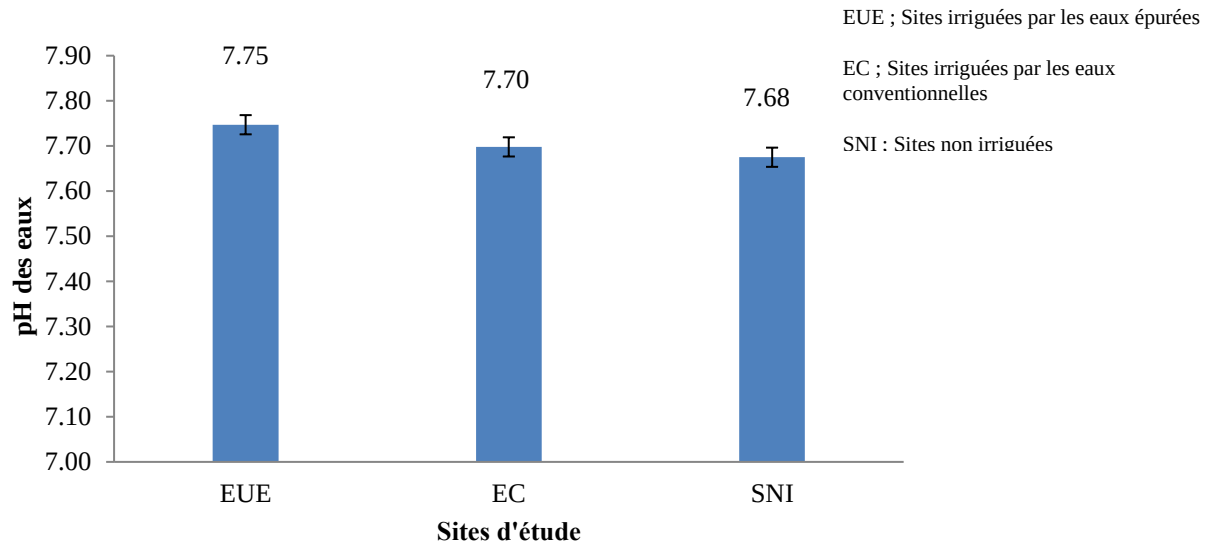


Figure 36. Variation moyenne de pH des eaux phréatiques pendant les périodes des hautes eaux

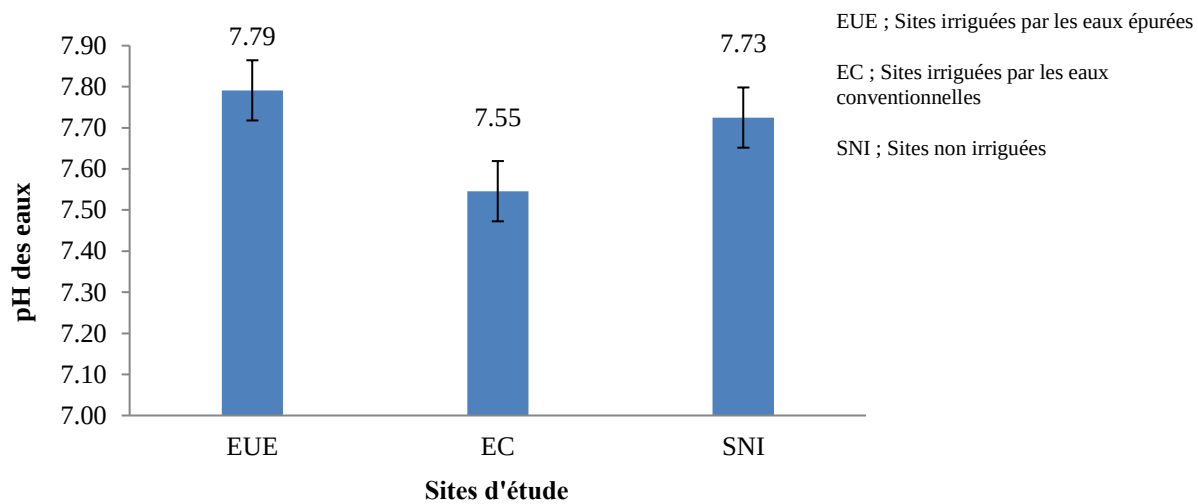


Figure 11. Variation moyenne de pH des eaux phréatiques pendant les périodes des basses eaux

2.2. Salinité des eaux phréatiques

La présente étude expérimentale permet de distinguer ou faire une évaluation sur la salinité, où on y essayer d'exprimer la masse de sels dissous par le contrôle de la conductivité électrique des eaux phréatiques.

Dans la zone d'étude, les eaux phréatiques étudiées présentent une salinité excessivement forte. Au niveau des sites non irrigués, les valeurs moyennes de la conductivité électrique varient entre $112,33 \pm 47,1$ mS/cm et $120,45 \pm 43,3$ mS/cm (Fig. 38). La conductivité des eaux des sites irrigués par les eaux conventionnelles varie entre $82,97 \pm 53,1$ mS/cm et $88,53 \pm 51,1$ mS/cm. Celles des sites irrigués par les eaux épurées allées de $82,17 \pm 36$ mS/cm à $80,72 \pm 35$ mS/cm (Fig.38).

Pendant les périodes hivernales (Fig. 39), les suivis de la salinité des eaux de l'essai montrent que les stations non irriguées (P14, P16, P18 et P24) présentent les valeurs les plus fortes, où la salinité moyenne mesurée est allée de 113,12mS/cm à 115,17 mS/cm avec un moyen de $114,15 \pm 1,18$ mS/cm (Fig. 39). Parallèlement, les sites irrigués par les eaux conventionnelles présentent une salinité moins importante évaluée de 82,55mS/cm à 83,49mS/cm, le moyen enregistré évaluée à $83,02 \pm 0,55$ mS/cm durant les mêmes périodes. Toutefois, la salinité moyenne des eaux superficielle dans les stations irriguées par les eaux épurées oscille entre 83,81mS/cm à 85,28mS/cm avec un moyen de $84,55 \pm 0,85$ mS/cm (Fig. 39).

Pendant les périodes estivales (Fig.40), la salinité moyenne des eaux phréatiques des sites non irrigués 112,32mS/cm à 120,45mS/cm avec un moyen de $116,39 \pm 5,74$ mS/cm. Celles des sites irrigués par les eaux conventionnelles, la salinité varie entre 82,17mS/cm à 80,72mS/cm avec un moyen de $81,45 \pm 1,02$ mS/cm. Les eaux phréatiques des sites irriguées par les eaux non conventionnelles présentent une salinité moyenne varient entre 82,79mS/cm à 88,53mS/cm avec un moyen de $85,66 \pm 4,05$ mS/cm (Fig. 40).

Nos résultats obtenus montrent que les périodes estivales ont connu une augmentation de la salinité des eaux phréatiques au niveau des sites irrigués par les eaux épurées et les sites non irriguées par rapport à celles irriguées par les eaux conventionnelles (Fig. 40). C'est lié for probablement aux doses d'irrigation appliquées au niveau de ces derniers qui contribuent à la dilution des eaux phréatiques.

L'analyse factorielle discriminante (annexe 20) a montré que le niveau de discrimination trop élevée entre les sites irrigués et les sites non irriguées avec une inertie dépassent 93% observé. Cela va permettre de distinguer que la pratique de l'irrigation dans la zone d'étude influe sur la qualité des eaux phréatiques, toute fois les eaux épurées sont faiblement discriminantes par rapport les eaux conventionnelles. Parallèlement, la conductivité électrique des eaux phréatiques est un facteur de discrimination caractérisant les sites non irrigués. En revanche, l'analyse de la variance et le test de Newman-Keuls (annexes 21 et 22) montrent que les variations de salinité entre les sites étudiés sont non significatives.

La diminution de salinité observé au niveau des sites irrigués est dû peut-être aux doses d'irrigation appliquées qui favorise la dilution des eaux de la nappe. La salinité fortement excessive des eaux phréatiques des sites non irrigués en fonction du climat où les fortes évaporations contribuant à la migration des eaux de la nappe phréatique vers les

horizons sèches de la surface des sols influent sur l'augmentation de la concentration des sels au niveau de cette dernière. Selon Hazen (1996), l'augmentation de la teneur en sels des eaux d'une nappe dont le niveau statique est assez proche du sol est simultanée avec l'augmentation des teneurs en sels, à la fois des eaux et des terrains, surtout ceux qui sont situés au-dessus du niveau libre des eaux. L'auteur ajoute que ce phénomène particulier est surtout prépondérant dans les zones arides, tant le déficit en eau est grand, et l'action de la chaleur forte.

Nos résultats ont montré l'existence d'une variabilité interannuelle de la salinité des eaux phréatiques en fonction des pratiques culturelles notamment l'irrigation ainsi l'effet du climat. La situation est aggravée par l'absence totale de drainage agricole dans la zone d'étude. Ce qui confirmé par Daddi Bouhoun (2010), l'auteur a signalé que la salinité témoigne une variabilité non négligeable ceci à cause des différents phénomènes qui influencent sur cette variabilité, tel que la texture des sols, la profondeur, type de eaux d'irrigation et la présence des formations gypseuses et argileuses salées dans le sous-sol de certaines zones de l'oasis de Ouargla.

Nos résultats obtenus sont concordés et confirmés par les travaux de Hamdi-Aïssa, (2001) ; Daddi Bouhoun (2010), où les auteurs ont mentionné que, la salinité et le faciès chimique des eaux phréatiques varient au niveau des palmeraies de Ouargla. Les eaux sont excessivement salées dans la palmeraie de Bamendil, du Ksar, de Mékhadma et de Beni Thour, et très excessivement salées à Saïd Otba.

Djidel (2008), a signalé que les teneurs des eaux phréatiques en sels dissous sont très élevées dépassant largement les normes de potabilité, pendant les périodes hivernales la conductivité des eaux peut atteindre les 200 mS/cm. Parallèlement, Slimani, 2016 a déclaré que la salinité des de la nappe phréatique à Ouargla, à l'exception de quelques zones bien drainés peut atteint des valeurs très élevées avoisinant 178,9 mS/cm. Ce qui confirmé par nos résultats. Dans le même axe d'étude, les travaux de mesures de la qualité hydro-chimique des eaux phréatiques de la cuvette de Ouargla réalisés par ANRH entre 2010 et 2014 ont montré que cette nappe présente une salinité excessive arrivant à 199,9mS/cm (annexe 19).

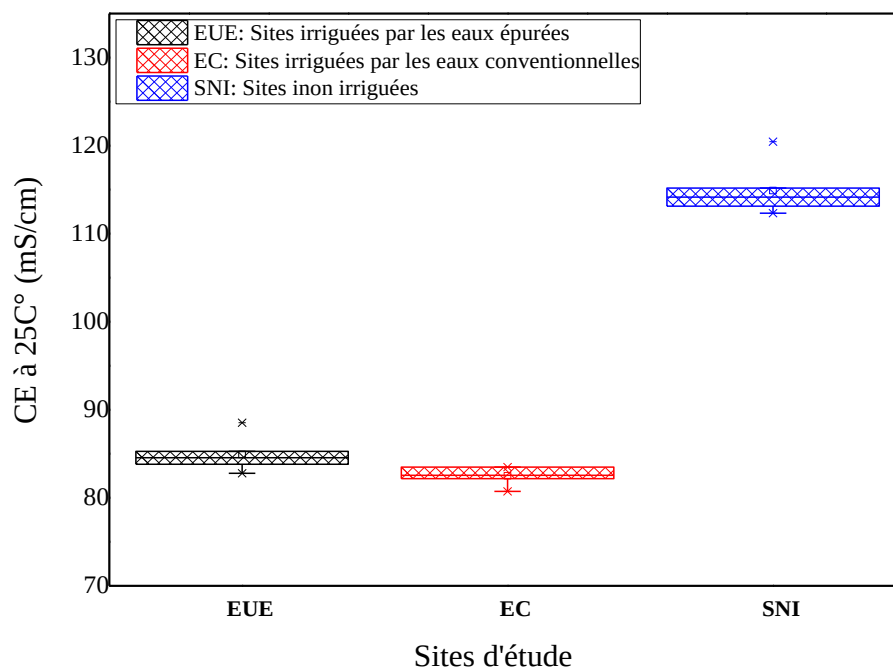


Figure 38. Variation moyenne de la conductivité E. des eaux phréatiques entre 2015 et 2019

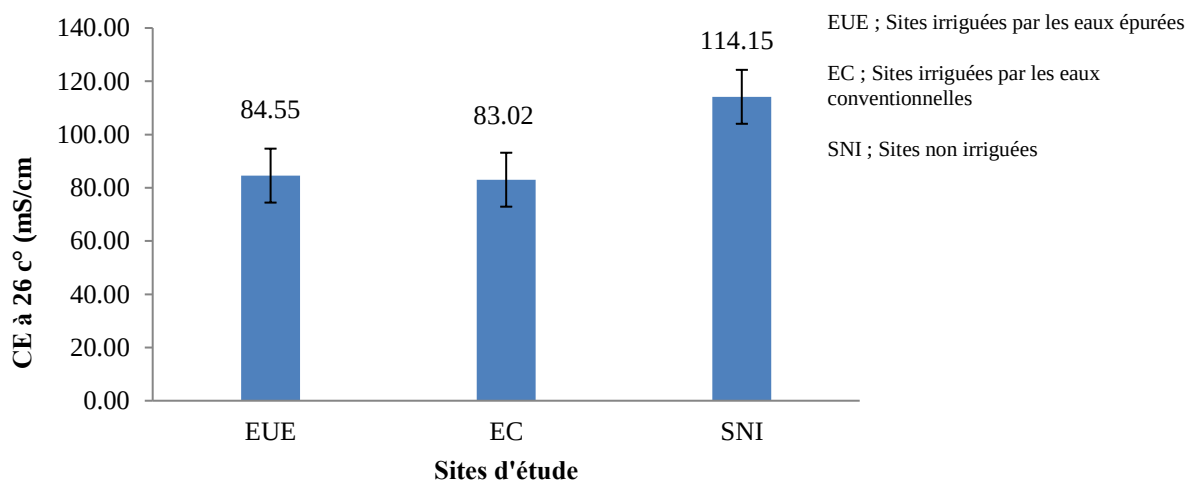


Figure 39. Variation moyenne de la conductivité E. pendant les périodes hivernales.

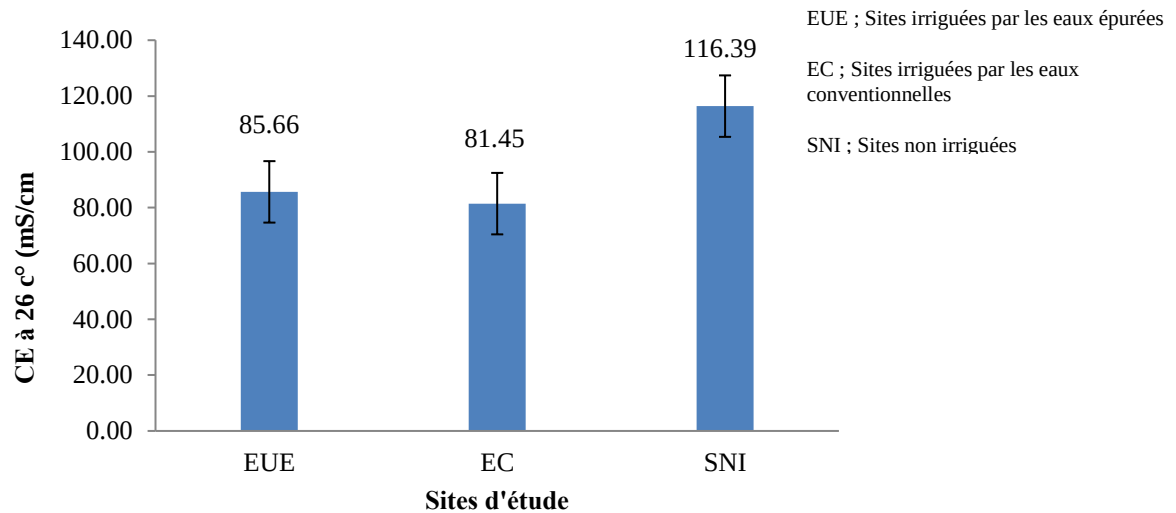


Figure 40. Variation moyenne de la conductivité E. pendant les périodes estivales

Les présentations graphiques n° 41 et 42 montrent que le périmètre d'étude présente une variabilité de la salinité d'un site à l'autre. Sept intervalles de la salinité sont distingués dont ces derniers varient dans une gamme allée de 22mS/cm à supérieur de 140mS/cm (Fig. 41 et 42).

L'analyse des résultats présenté par les figures 41 et 42 indique que le vers la fin de l'expérimentation, le périmètre d'étude a connu une augmentation moyenne de la salinité des eaux phréatique estimé à 2 mS/cm, cela est liée à la valorisation agricole des eaux chargé en sels. De Plus, au début de l'essai, la pratique de réutilisation agricole des eaux épurées est assez importante dans la zone d'étude, où 51% des sites étudiées sont irriguées par les eaux épurées en 2015 (Voir partie 3 ; chapitre III), vers la fin de l'essai, cette pratique a connu une certaine réticence d'utilisation dans la zone d'étude où seul 9% des sites sont irriguées par les eaux épurées à la fin de 2019. Ce changement des eaux et pratique d'irrigation appliquées a influencé d'une manière indirecte l'augmentation de la salinité des eaux de la nappe phréatique superficielle qui constitue le réservoir et une zone d'accumulation des sels lessivés à travers les couches des sols.

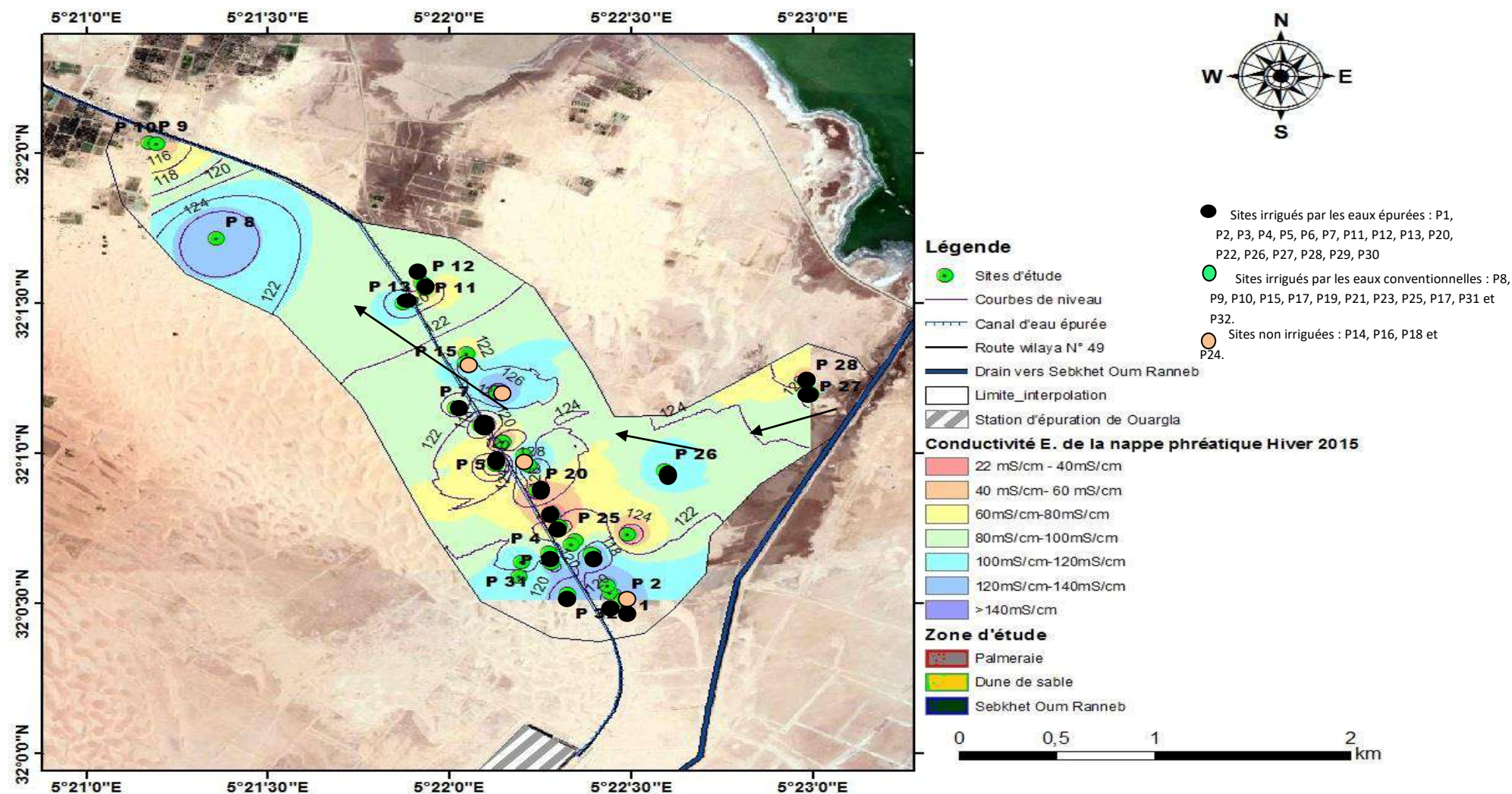


Figure 41. Variation spatiale de la salinité des eaux de la nappe phréatique en Hiver 2015

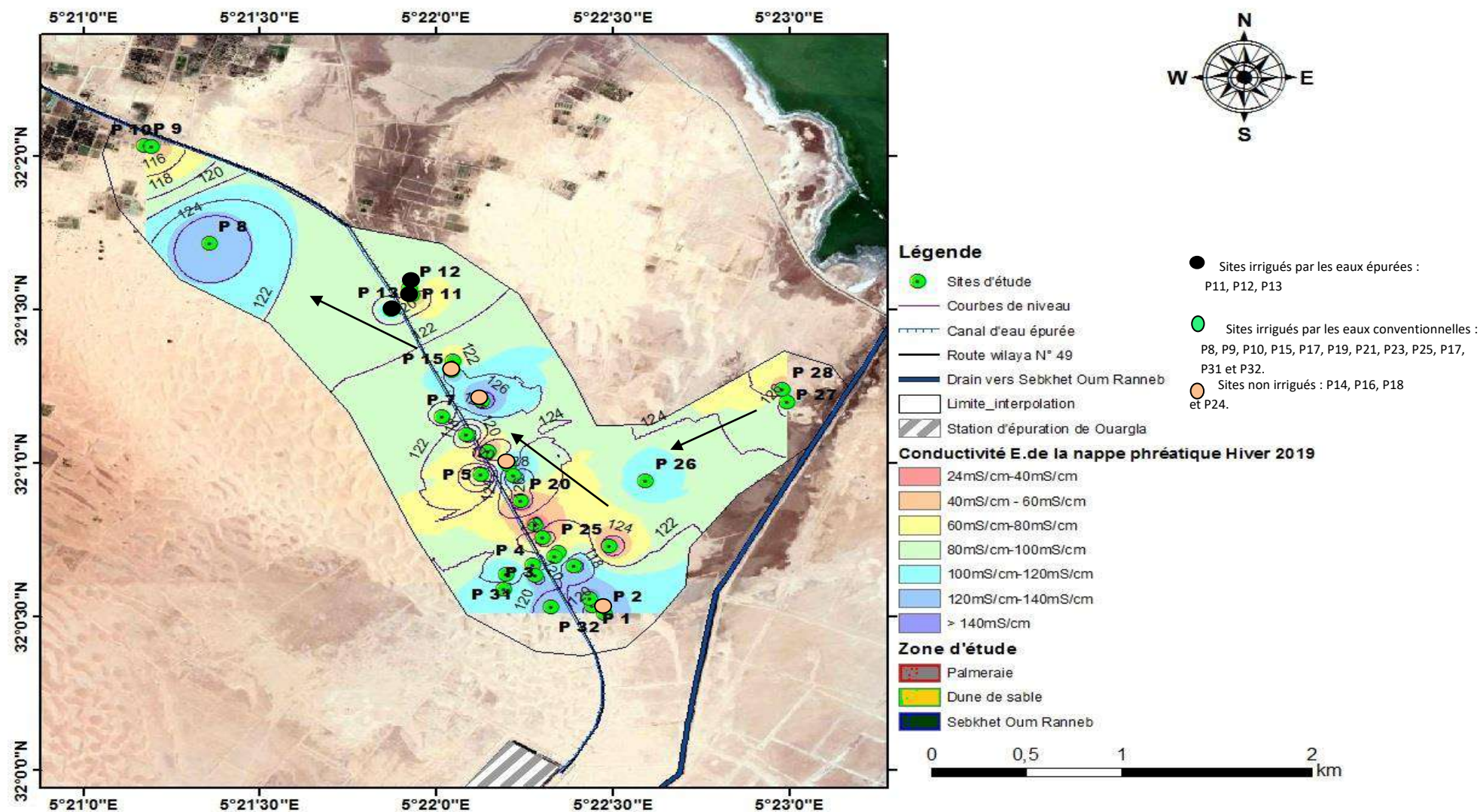


Figure 42. Variation spatiale de la salinité des eaux de la nappe phréatique en Hiver 2019

2.3. Oxygène dissous

L'oxygène dissous dans l'eau est un élément fondamental qui intervient dans la majorité des processus biologiques ; végétaux et animaux. Il participe également aux dégradations biochimiques et chimiques. Il se dissout dans cette eau par diffusion, jusqu'à un équilibre appelé "saturation". Cette saturation ou solubilité maximale de l'oxygène dans l'eau est, pour l'essentiel, fonction de la température et de la salinité (Hubiche, 2002).

L'évaluation de la teneur en oxygène dissous à travers les périodes d'observations permet de distinguer que la teneur de cet élément au niveau des eaux phréatiques est assez variable. En hiver 2015, c'est la campagne de début de l'essai, les concentrations enregistrées dans les stations non irriguées varient entre 3,2mg/l pour les sites P18 et P24 à 5,2mg/l pour le P16 (Fig. 43). Parallèlement, les concentrations de cet élément ont été oscillées entre 4,5mg/l et 5,3mg/l pour les sites irrigués par les eaux conventionnelles (P8, P9, P10, P15, P19, P23, P25, P30, P31 et P32 (Fig. 44). Concernant les sites irrigués par les eaux usées épurées (P1-7, P11-13, P20, P22, P26-29 et P33), les concentrations en Oxygène dissous ont variées entre 4mg/l et 6,3mg/l (Fig.44). Quoique l'analyse de nos résultats obtenus indique l'existence d'une certaine variation des concentrations d'oxygène dissous en fonction du mode de gestion des sites étudiés, la salinité des eaux phréatiques reste le paramètre discriminant de cette dernière. L'augmentation de la salinité empêche la solubilité de cet élément. Ce qui est confirmé par nos résultats. L'analyse factorielle discriminante (Annexe 19) indique que l'oxygène dissous est un facteur caractérisant les sites irrigués dans la zone d'étude. Toutefois, l'analyse de la variance et le test de Newman-Keuls (Annexe 20 et 21) montrent que les variations d'oxygène dissous entre les sites étudiés sont non significatives.

Les recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement conseil canadien des ministres de l'environnement (1999), ont signalé que dans un milieu salin, la solubilité de l'oxygène dans l'eau diminue en fonction de la salinité (la solubilité de l'oxygène est de 9 mg/l dans l'eau douce et de 7,4 mg/l dans de l'eau salée à 35‰ et dans les couches plus profondes, en particulier aux endroits où l'intensité lumineuse est faible.

Pour les périodes estivales. Les températures sont plus élevées et les périodes de luminosités sont plus longues, ce qui traduit par des consommations plus élevées en oxygène dissous pour la plupart des sites d'étude (Fig. 43 ; 44 ; 45). Nos résultats obtenus des concentrations d'oxygène dissous des eaux souterraines se concorde avec ceux déclaré par Djidel (2008), l'auteur a signalé que les concentrations de cet élément allant de 1.5 à 5.3 mg/l.

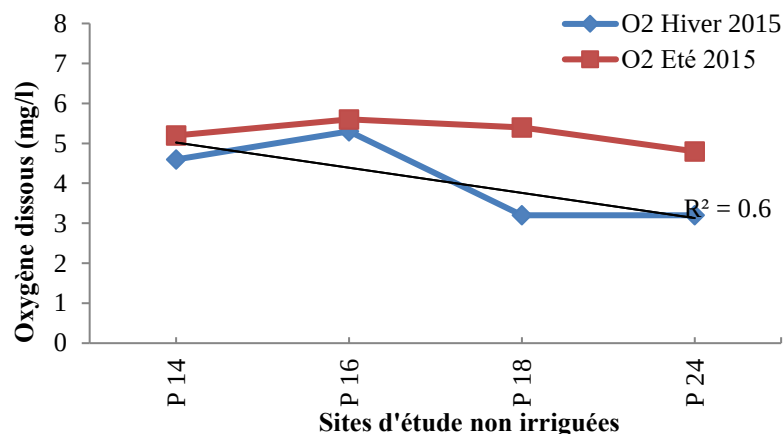


Figure 43. Variation spatiotemporelle de l'oxygène dissous des sites non irrigués

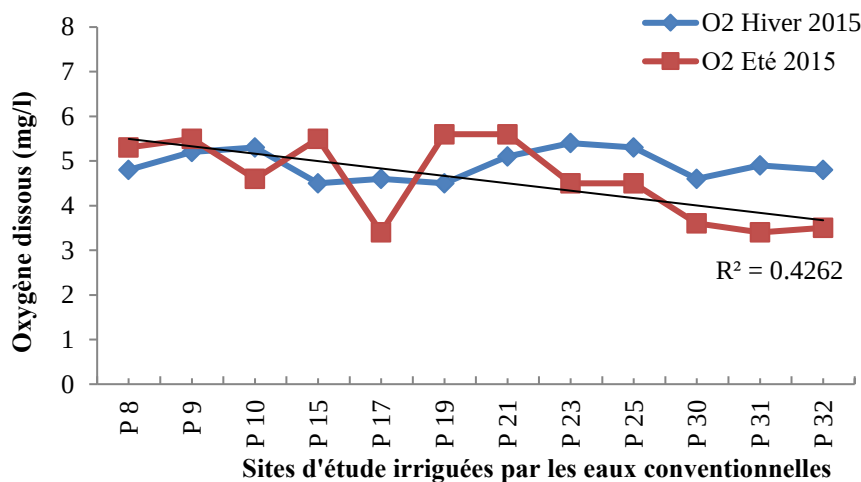


Figure 44. Variation spatiotemporelle de l'oxygène dissous des sites irrigués par les eaux conventionnelles

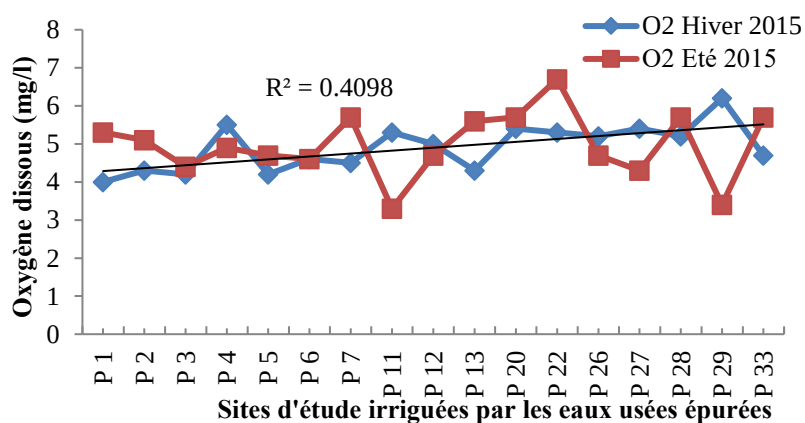


Figure 45. Variation spatiotemporelle de l'oxygène dissous des sites irrigués par les eaux épurées

2.4. Composition cationique des eaux phréatiques

2.4.1. Calcium

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature, en particulier dans les roches calcaires, sous forme de carbonates. Composant majeur de la dureté de l'eau (Rodier et *al.*, 2009).

Les valeurs moyennes du calcium des eaux phréatiques varient entre les sites, et les périodes d'étude, quoique cette variation reste non significative. Les concentrations moyennes de calcium sont reflétées par l'enregistrement d'un minimum de $2457,68 \pm 1745 \text{ mg/l}$ et un maximum $3150,26 \pm 2371,91 \text{ mg/l}$ pour les sites irrigués par les eaux épurées (Fig. 46). Pour les sites irrigués par les eaux conventionnelles, les teneurs moyens de ce cation ont été variés entre un minimum de $2004,98 \pm 1340,72 \text{ mg/l}$ et un maximum de $3792,69 \pm 2487,69 \text{ mg/l}$ (Fig. 46). Concernant les sites non irrigués, les concentrations moyennes de calcium sont allées de $3316,05 \pm 1130,15 \text{ mg/l}$ et $4261,90 \pm 3302,94 \text{ mg/l}$ (Fig. 46).

D'un autre côté, pendant les périodes des hautes eaux (Fig. 47), les concentrations moyennes de calcium au niveau des sites irrigués par les eaux épurées allées de $2457,68 \text{ mg/l}$ à $3150,26$ avec un moyen de $2866,26 \pm 296,25 \text{ mg/l}$. celles des sites irrigués par les eaux conventionnelles varient entre $2004,98 \text{ mg/l}$ à $2883,69$ avec une moyenne de $2444,54 \pm 362,98 \text{ mg/l}$. Concernant les sites non irrigués, les teneurs moyennes de calcium des eaux phréatiques oscillent entre $3345,7 \text{ mg/l}$ à $4261,9 \text{ mg/l}$, avec une moyenne de $3773,89 \pm 446,87 \text{ mg/l}$.

Parallèlement pendant les périodes estivales, la variation des concentrations de calcium reste toujours négligeable et non significatifs (Fig. 48). Les concentrations moyennes enregistrées évalués à $2589,85 \pm 125,07 \text{ mg/l}$ au niveau des sites irrigués par les eaux épurées, de $3081,92 \pm 1005,18 \text{ mg/l}$ pour les sites irrigués par les eaux conventionnelles et $3676,90 \pm 510 \text{ mg/l}$ pour les sites non irrigués. Par ailleurs, l'analyse factorielle discriminante (Annexe 19) indique que le calcium est un facteur caractérisant les eaux phréatiques des sites non irrigués, l'analyse de la variance et le test de Newman-Keuls (Annexe 20 et 21) montrent que les variations de calcium entre les sites étudiés sont non significatives.

Les travaux antérieurs réalisés au niveau de la zone d'étude ont montré la richesse des eaux phréatique en calcium. D'après les analyses chimiques faites au niveau de la cuvette par Djidel, (2008), les concentrations en calcium varient en période des hautes eaux entre 200 mg/l et 1100 mg/l , et en période des basses eaux les concentrations de

calcium allant de 200 mg/l à 1400 mg/l. Nos résultats obtenus sont assez élevés, cela for probablement lié à la situation géographique de site d'étude proche de Sebkhet Oum Erraneb. Selon Aït Boughrous (2007) ; Djidel (2008) ; Gouaidia (2008) ; Dib (2009) et Boutteli, (2011), les concentrations très élevées de calcium auraient pour origine la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3) et des formations gypseuses (CaSO_4) qui sont facilement solubles dans la région de Ouargla.

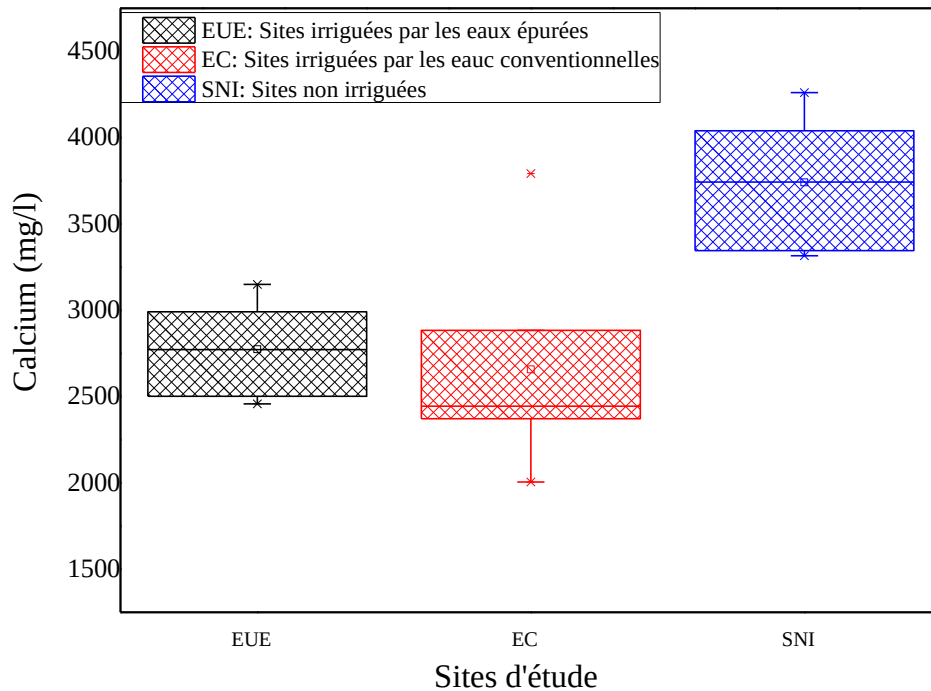


Figure 46. Variation Calcium des eaux phréatique entre 2015 et 2019

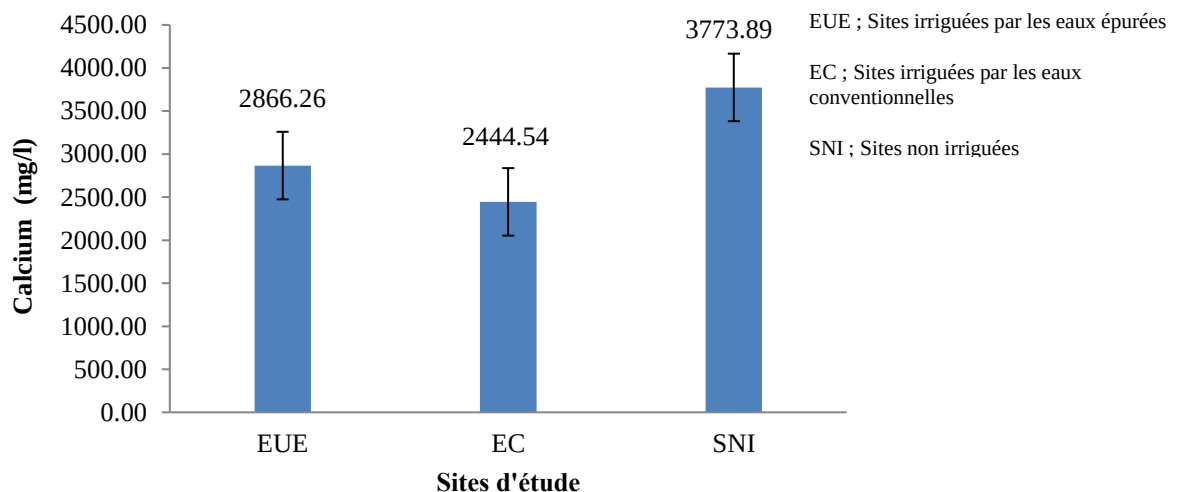


Figure 47. Variation moyenne de Calcium pendant les périodes hivernales

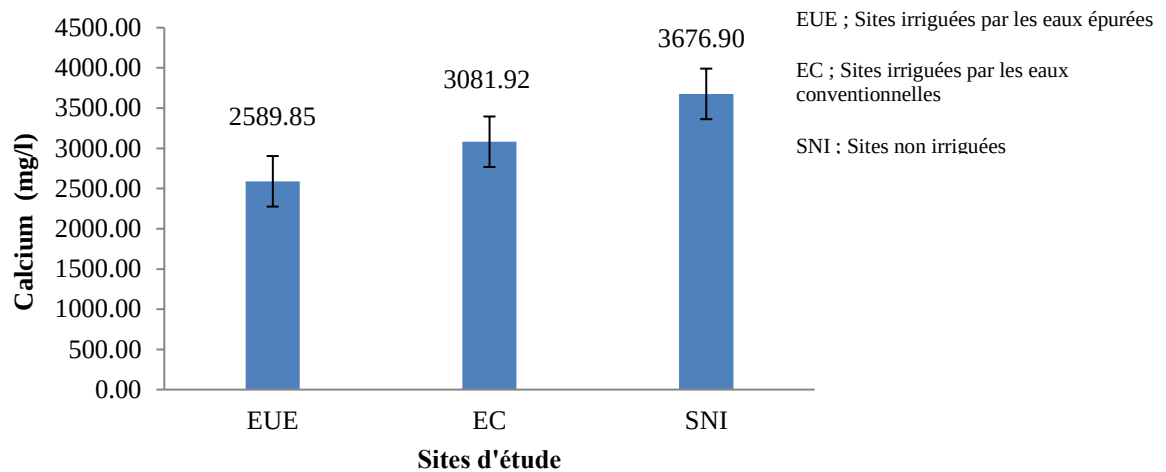


Figure 48. Variation moyenne de Calcium pendant les périodes estivales

2.4.2. Magnésium

Le magnésium est un des éléments les plus répandus dans la nature, il constitue environ 2,1 % de l'écorce terrestre. Son abondance géologique et sa grande solubilité, font que les teneurs dans l'eau peuvent être importantes (Rodier et *al.*, 2009).

Les valeurs moyennes du magnésium des sites irrigués par les eaux épurées varient entre un minimum de $355,60 \pm 235 \text{ mg/l}$ et un maximum $823,02 \pm 570,29 \text{ mg/l}$ (P24) (Fig. 49). Au sein des sites irrigués par les eaux conventionnelles, les teneurs moyennes de même élément varient entre un minimum de $327,68 \pm 258,73 \text{ mg/l}$ et un maximum de $569,21 \pm 508,63 \text{ mg/l}$ (Fig. 49). Concernant les sites non irrigués, les concentrations de magnésium sont allées de $369,12 \pm 327 \text{ mg/l}$ à $872,5 \pm 593,34 \text{ mg/l}$ (Fig. 49).

Les concentrations moyennes de magnésium enregistrées pendant les périodes hivernales varient entre $564,10 \pm 201,75 \text{ mg/l}$ au niveau des sites irrigués par les eaux épurées à $464,75 \pm 127,61 \text{ mg/l}$ au niveau des sites irrigués par les eaux conventionnelles. Celle des sites non irrigués sont estimées à $622,27 \pm 199,03 \text{ mg/l}$ (Fig. 50).

Parallèlement pendant les périodes estivales, les concentrations de cet élément a connu une certaine diminution au niveau de tous les sites d'étude (Fig. 51), quoi que cette réduction reste toujours non significative. Les concentrations moyennes de magnésium varient entre $411,74 \pm 75,99 \text{ mg/l}$ pour les sites irrigués par les eaux épurées à $429,90 \pm 144,55 \text{ mg/l}$ pour les sites irrigués par les eaux conventionnelles. Celles des sites non irrigués sont évaluées à $453 \pm 118,62 \text{ mg/l}$ (Fig. 51).

L'analyse factorielle discriminante (Annexe 20) indique que le magnésium est un facteur caractérisant les eaux phréatiques des sites non irrigués dans la zone d'étude. En

revanche, la variation de magnésium entre les sites d'étude reste non significative d'après l'analyse de la variance et le test de Newman-Keuls (Annexe 21 et 22).

Les travaux de recherche antérieurs réalisés au niveau de la zone d'étude, notamment le travail de Djidel (2008) a montré que les concentrations de magnésium dans les eaux souterraines à Ouargla varient entre 70 et 20000mg/l.

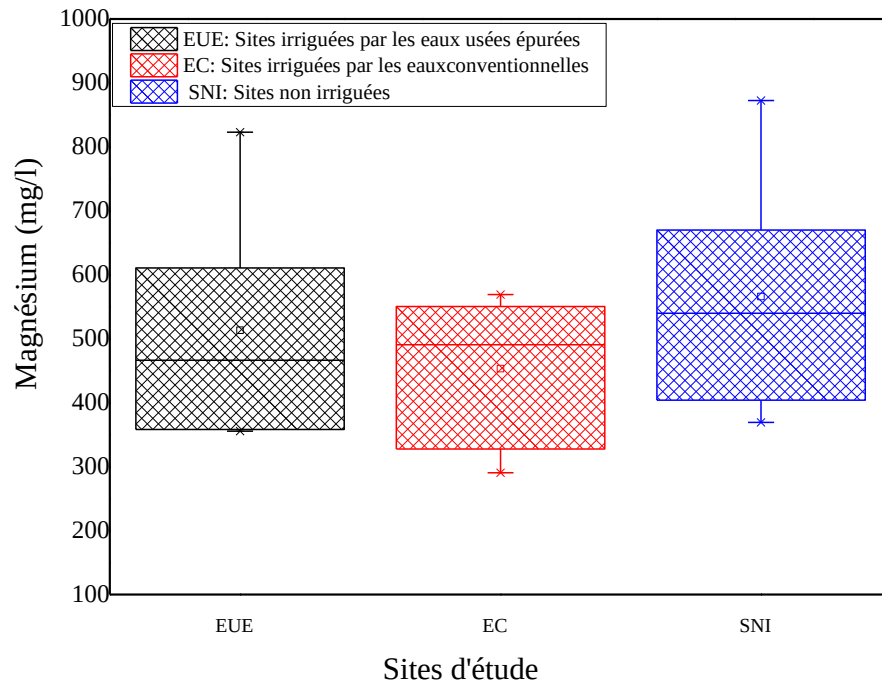


Figure 49. Variation moyenne de Magnésium des eaux phréatiques entre 2015 et 2019

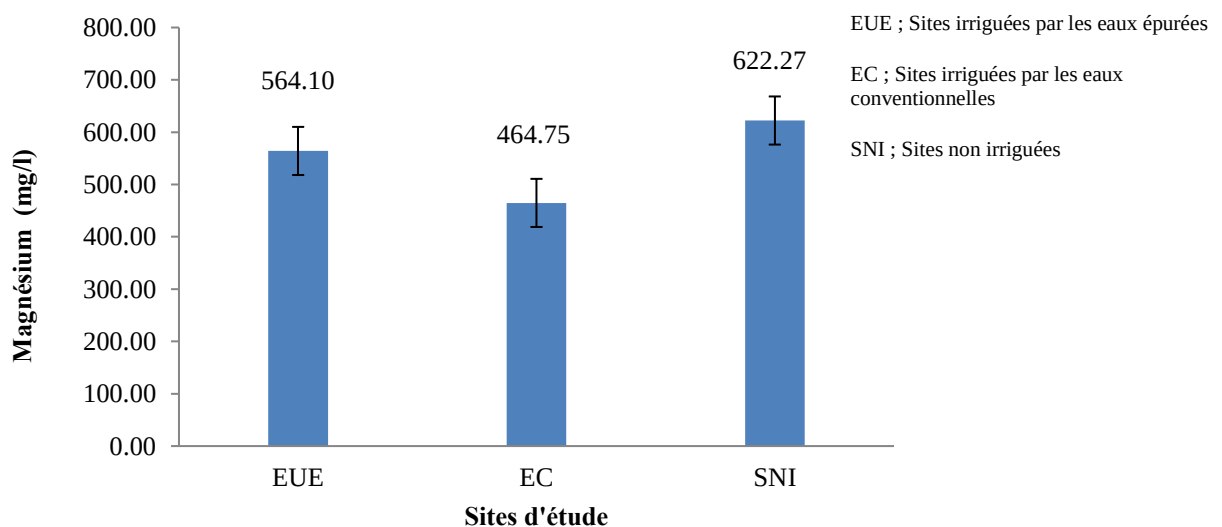


Figure 50. Variation moyenne de Magnésium pendant les périodes hivernales

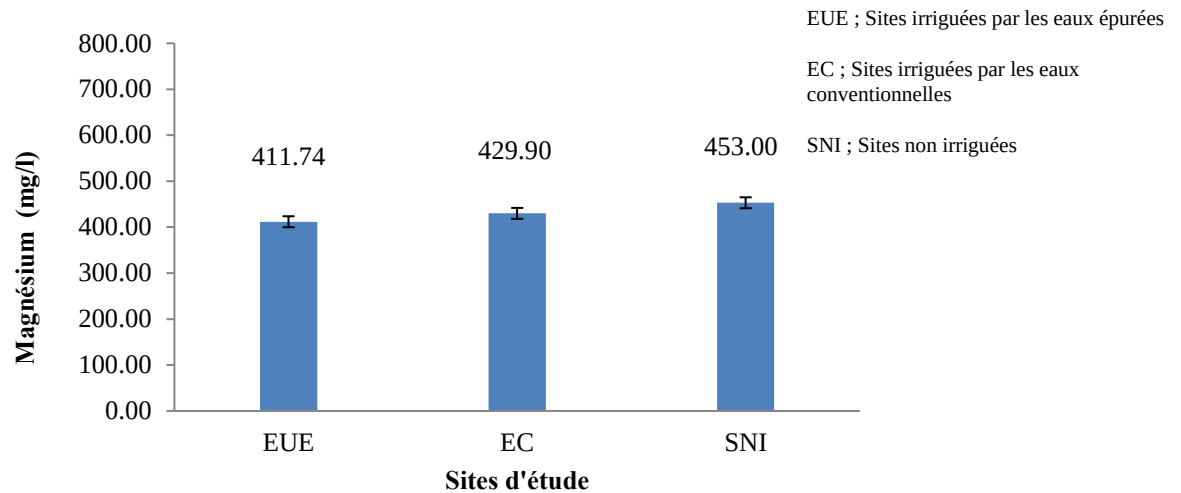


Figure 51. Variation moyenne de Magnésium pendant les périodes estivales

2.4.3. Sodium

L'origine de sodium est liée principalement à la dissolution de l'Halite (NaCl) (Boutteli, 2011). Indépendamment de la lixiviation des formations géologiques contenant du chlorure de sodium, le sel peut provenir de la décomposition des sels minéraux, comme les silicates de sodium et d'aluminium (Rodier et *al.*, 2005).

La représentation graphique (Fig. 52) des teneurs moyennes du Na^+ des eaux phréatiques a montré que les concentrations enregistrées dans les sites irrigués par les eaux épurées allées d'un minimum de l'ordre de $5658,87 \pm 5498,22$ mg/l et un maximum de 17210 ± 15607 mg/l (Fig. 52). Concernant les sites irrigués par les eaux conventionnelles, les teneurs moyennes de Na^+ varient de $6642,18 \pm 3526,83$ mg/l à $18399,58 \pm 13577,68$ mg/l (Fig. 54). Parallèlement, les concentrations des sites non irrigués en sodium allées de $5925,43 \pm 3480,07$ à $14526,38 \pm 4152,47$ mg/l (Fig. 52). Nos résultats des teneurs de sodium obtenus sont comparables à ceux déclarés par quelques travaux de recherche réalisés dans le même axe au niveau la zone d'étude.

D'un autre côté, l'analyse plus profonde de la variation spatiotemporelle des teneurs moyenne de sodium des eaux phréatique a montré que pendant les périodes des hautes eaux les concentrations varient entre $12506,21 \pm 5446,96$ mg/l pour les sites irrigués par les eaux épurées (Fig. 53), à $13282,43 \pm 5765,75$ mg/l pour les sites irrigués par les eaux conventionnelles (Fig. 53). Celles des sites non irrigués évalués à $10775,14 \pm 3990,55$ mg/l (Fig. 53).

Concernant les périodes estivales, quoi que les concentrations de sodium a connu une certaine diminution sur tout le périmètre par rapport les périodes hivernales (Fig. 54). Les teneurs moyennes varient entre $10391,41 \pm 6692,81$ mg/l pour les sites irrigués par les eaux

épurées à $10070,76 \pm 4848,74 \text{ mg/l}$ pour les sites irrigués par les eaux conventionnelles. Celles des sites non irrigués évaluent à $10634,46 \pm 6320,36 \text{ mg/l}$ (Fig.54). En revanche, cette variation temporelle de sodium reste non significative, l'analyse factorielle discriminante (Annexe 20) indique que le sodium est un facteur caractérisant les eaux phréatiques des sites non irrigués dans la zone d'étude. Simultanément, l'analyse de la variance et le test de Newman-Keuls (Annexe 21 et 22) montrent que les variations de sodium entre les sites étudiés sont non significatives.

Par ailleurs, nos résultats obtenus de sodium sont comparables à ceux déclarés par Boutteli, (2011). L'auteur a signalé que les concentrations de Na^+ des eaux phréatiques à Ouargla sont allées de 5600 mg/l à $68141,67 \text{ mg/l}$ au niveau des zones proches des Sebkha. De plus, Djidel (2008), a montré que les concentrations en sodium dans les eaux souterraines à Ouargla allant de 400 mg/l à 100 g/l ($100\,000 \text{ mg/l}$). Les résultats obtenus par Mecheri (2009) pour la nappe phréatique de Ouargla, apparaît plus faibles variant entre 23 à $386,2 \text{ mg/l}$.

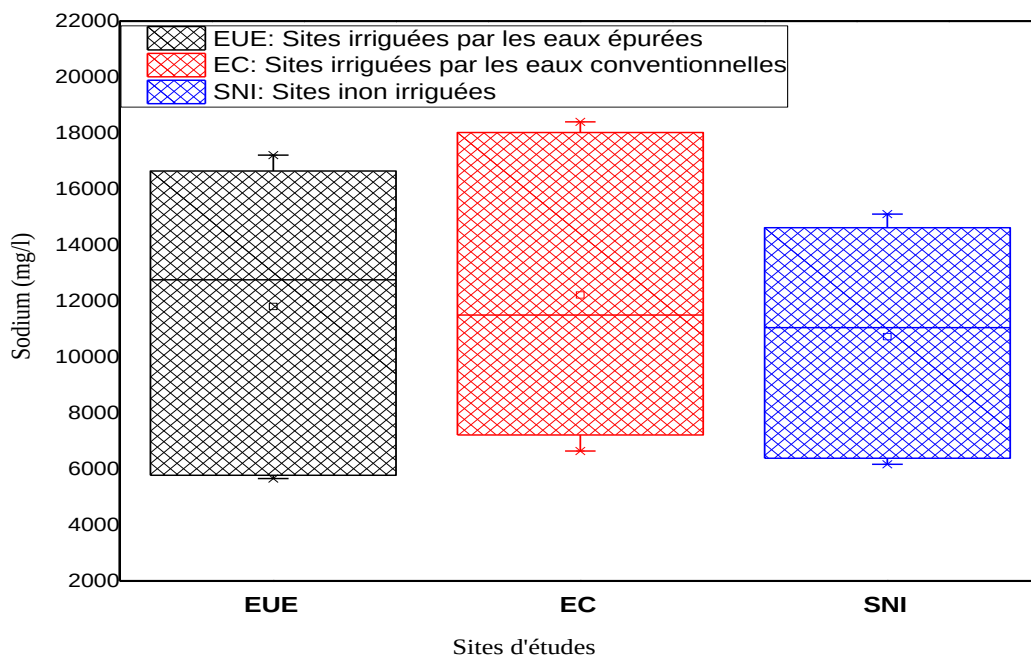


Figure 52. Variation de sodium des eaux phréatiques entre 2015 et 2019

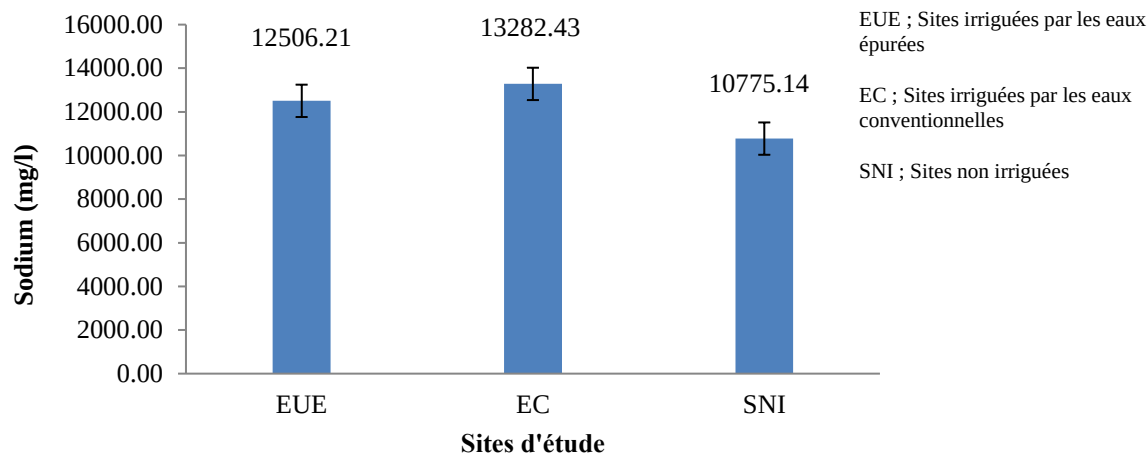


Figure 53. Variation moyenne de sodium pendant les périodes hivernales

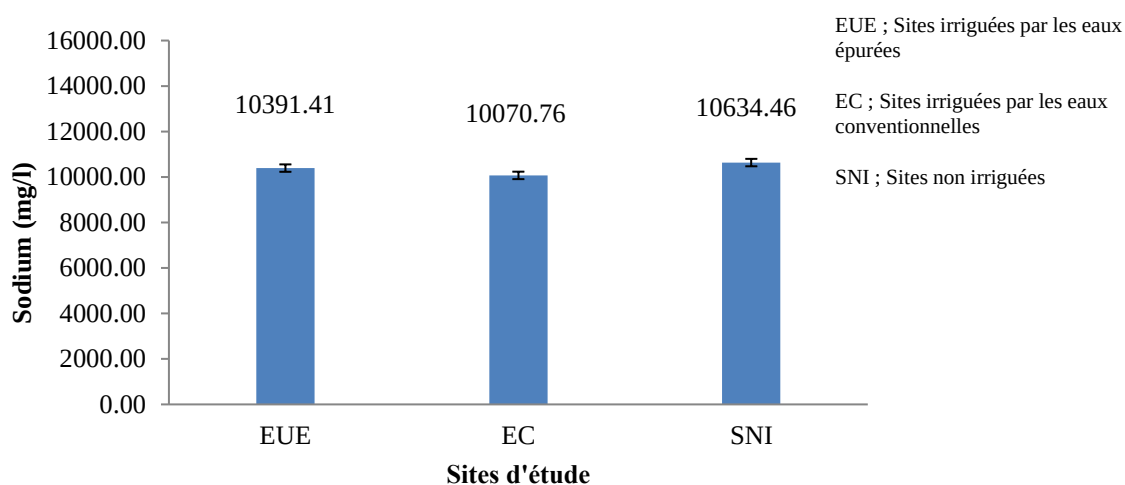


Figure 54. Variation moyenne de sodium pendant les périodes estivales

2.4.4. Potassium

La représentation graphique (Fig. 55) des teneurs moyennes du K^+ des eaux phréatiques durant la période d'étude a montré que les teneurs enregistrées de cet élément dans les sites irrigués par les eaux épurées varient entre un minimum de $1420,59 \pm 1355,32 \text{ mg/l}$ et un maximum de $2831,06 \pm 1547,05 \text{ mg/l}$. Concernant les sites irrigués par les eaux conventionnelles, les teneurs moyennes de K^+ allant de $1730,83 \pm 1097,19 \text{ mg/l}$ et un maximum de $3117,17 \pm 1218,79 \text{ mg/l}$ (Fig. 55). Parallèlement, les concentrations moyennes de potassium au niveau des sites non irrigués varient de $1908,93 \pm 910,26 \text{ mg/l}$ à $3326,50 \pm 2119,15 \text{ mg/l}$ (Fig. 55).

Les concentrations moyennes des périodes hivernales varient entre $1759,97 \pm 581,39 \text{ mg/l}$ pour les sites irrigués par les eaux épurées à $2314,86 \pm 579,66$ pour les sites irrigués par les eaux conventionnelles. Celles des sites non irrigués sont évaluées à $2630,75 \pm 553,01 \text{ mg/l}$ (Fig. 56).

De plus, l'analyse de nos résultats indique que les périodes estivales connues des augmentations des concentrations moyennes de potassium. Ces derniers sont variés de $2171,54 \pm 932,71 \text{ mg/l}$ à $2643,88 \pm 669,33 \text{ mg/l}$ pour les sites irrigués par les eaux épurées et les eaux conventionnelles successivement (Fig. 57). Simultanément, la concentration moyenne de K^+ des sites non irrigués est évaluée à $2617,71 \pm 1002,38 \text{ mg/l}$ (Fig. 57). Toutefois, l'analyse factorielle discriminante (Annexe 20) indique que le potassium est un facteur caractérisant les eaux phréatiques des sites irrigués. De même, l'analyse de la variance et le test de Newman-Keuls (Annexe 21 et 22) montrent que les variations de potassium entre les sites étudiés sont non significatives.

Nos résultats des teneurs de potassium obtenus sont comparables à ceux déclarés par quelques travaux de recherche réalisés dans le même axe au niveau la zone d'étude. Selon Djidel (2008) le potassium varie entre 20 mg/l et 10000 mg/l . Slimani (2016), a déclaré que les teneurs moyennes de cet élément dans les eaux phréatiques à Ouargla évaluée à 1264 mg/l .

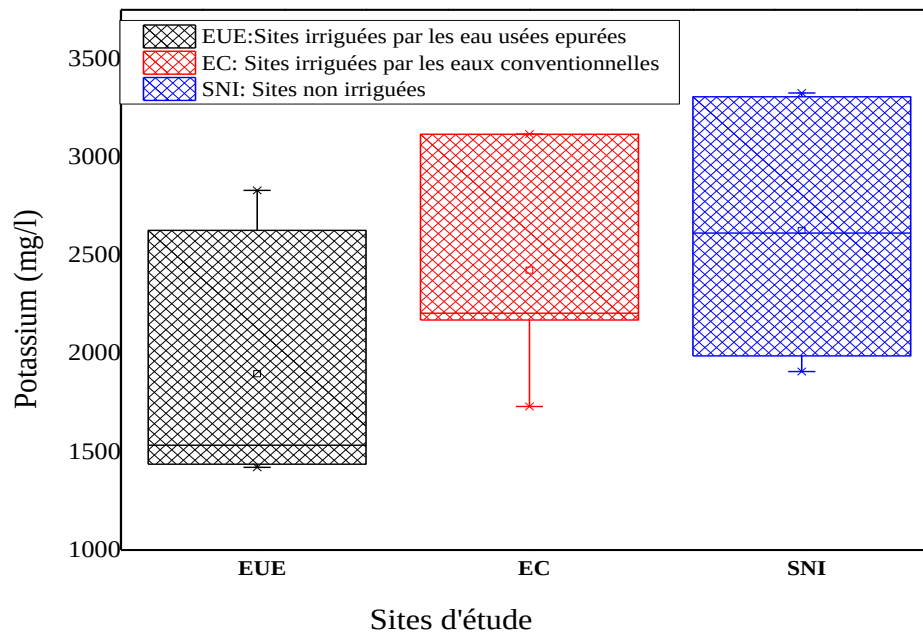


Figure 55. Variation moyenne de potassium des eaux phréatiques entre 2015 et 2019

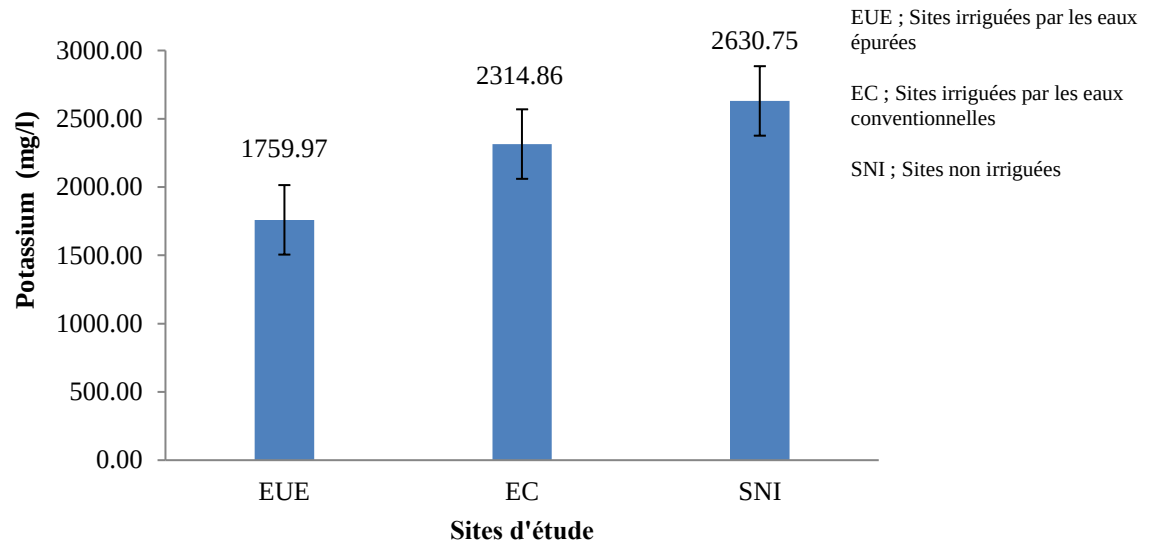


Figure 56. Variation moyenne de potassium pendant les périodes hivernales

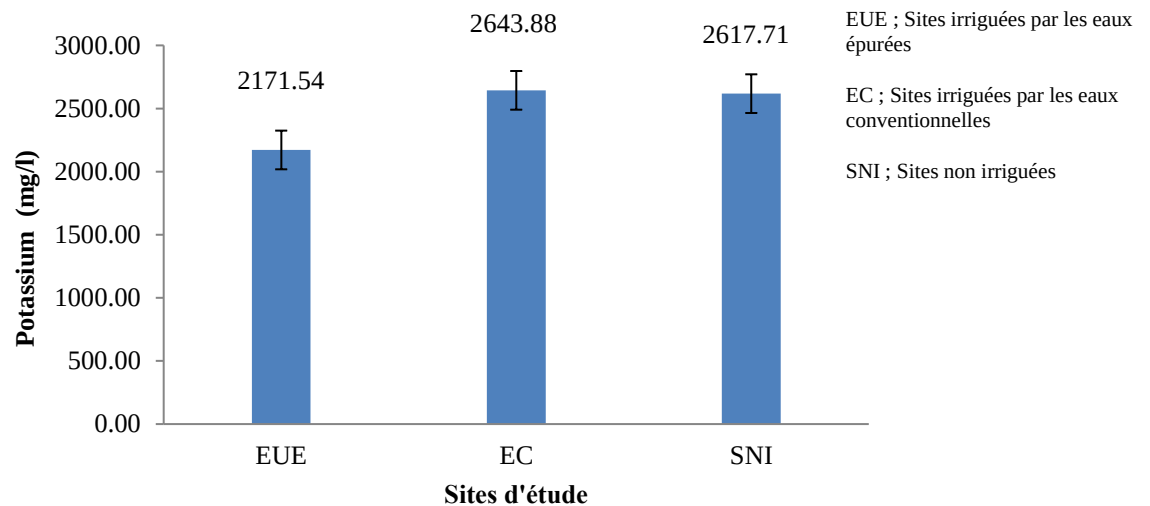


Figure 57. Variation moyenne de potassium pendant les périodes estivales

2.5. Composition anionique des eaux

2.5.1. Chlore total

D'après Rodier et *al.* (2009), l'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est présent dans le sol que dans la solution du sol, sous forme de Cl^- . Il n'est pas fixé et ne participe en aucun cas aux précipitations et reste très mobile. Djidel (2008) ; Dib (2009), ont signalé que l'origine des chlorures dans les eaux souterraines est liée principalement à la dissolution des formations salifères, et secondairement à la contamination des eaux par les eaux usées. Les introductions de polluants dans le sous-sol peuvent être une conséquence de déversements des eaux domestique, de lessivages des eaux chargés par irrigation par entraînement vers la profondeur, ou ils rencontrent les eaux phréatiques.

Les concentrations de chlore total est un paramètre discriminant pour déterminer la qualité de l'eau, notamment les eaux souterraines qui constituent un compartiment environnemental nécessite une préservation durable. Les analyses des eaux phréatiques ont révélé des fortes teneurs en chlore total. Les concentrations moyennes des chlorures des eaux phréatiques au niveau des stations irriguées par les eaux épurées varient un minimum de $14120 \pm 8999,96 \text{ mg/l}$ et un maximum de $36925,17 \pm 31997 \text{ mg/l}$ (Fig.58). Concernant les sites irrigués par les eaux conventionnelles, les teneurs moyennes de Cl^- allant de $17450,3 \pm 11133 \text{ mg/l}$ à $35417,86 \pm 28205,89 \text{ mg/l}$ (Fig. 58).

Parallèlement, les concentrations en chlore au niveau des sites non irrigués sont allées de $14362,24 \pm 2265,02 \text{ mg/l}$ à $24091,9 \pm 17670,04 \text{ mg/l}$ (Fig. 58). Par ailleurs, pendant les périodes hivernales, les concentrations moyennes de chlore sont oscillées entre $25639,83 \pm 12512,61 \text{ mg/l}$ pour les sites irrigués par les eaux épurées (Fig. 59), à $26433,95 \pm 12705 \text{ mg/l}$ pour les sites irrigués par les eaux conventionnelles. Concernant les sites non irrigués, la concentration moyenne de même élément durant les mêmes périodes est évaluée à $16573,96 \pm 2947,36 \text{ mg/l}$.

De plus, l'analyse de nos résultats présentés par la figure 60 montre que les périodes estivales connue presque la même allure de l'élément chlore à travers toute la zone, avec des fluctuations des concentrations. Ces derniers varient entre $23718 \pm 13573,55 \text{ mg/l}$ pour les sites irrigués par les eaux épurées à $26433,9 \pm 12705 \text{ mg/l}$ pour les sites irrigués par les eaux conventionnelles. Celles des sites non irrigués sont estimées à $20097,66 \pm 5648,69 \text{ mg/l}$.

Toutefois, l'analyse factorielle discriminante (Annexe 20) indique que le calcium est un facteur caractérisant les eaux phréatiques des sites non irrigués dans la zone d'étude. Parallèlement, l'analyse de la variance et le test de Newman-Keuls (Annexe 21 et 22) montrent que les variations de chlore entre les sites étudiés sont non significatives.

Dans le même axe Djidel (2008), a déclaré que les teneurs des chlorures dans la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla varient entre $400 \text{ mg/l} \leq \text{Cl}^- \leq 200 \text{ g/l}$.

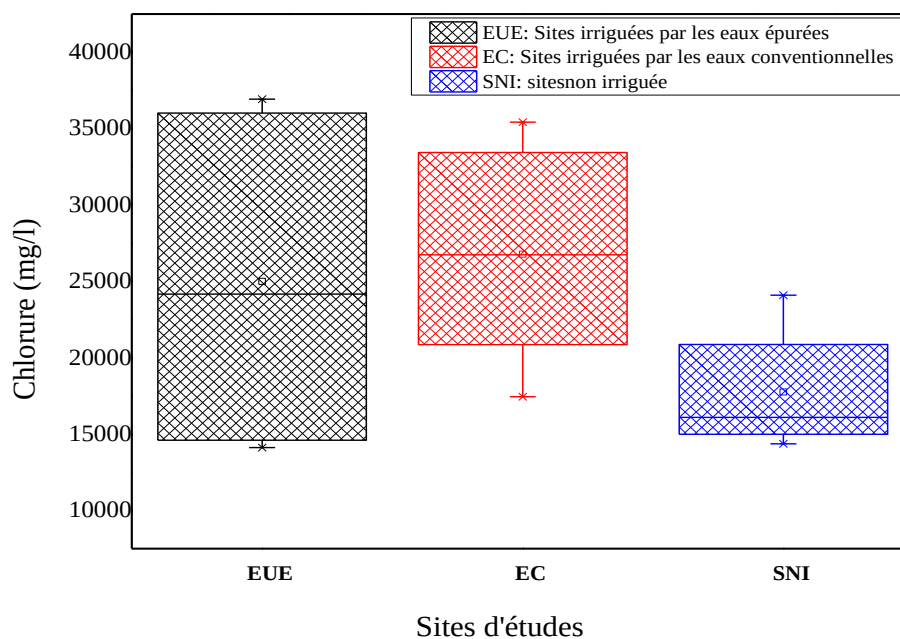


Figure 58. Variation de Chlore des eaux phréatiques entre 2015 et 2019

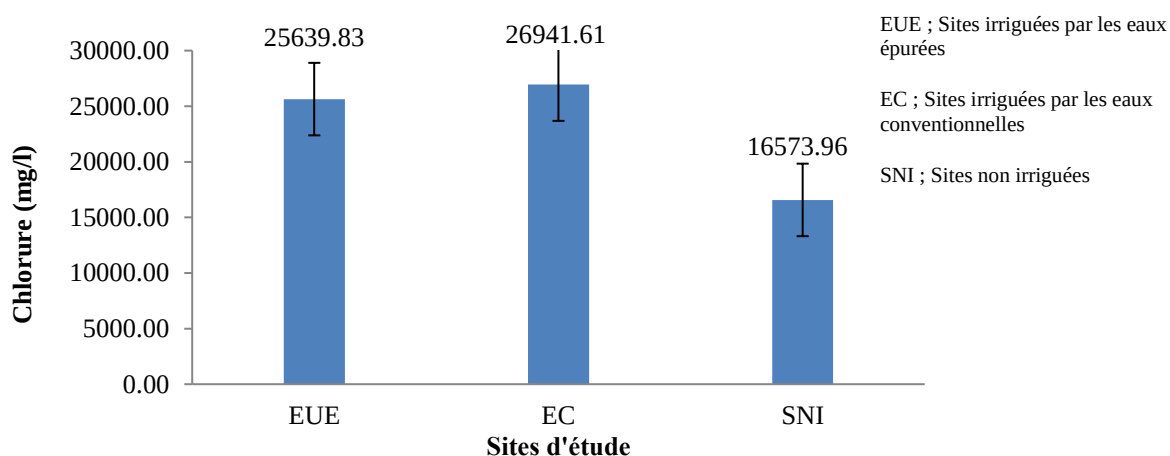


Figure 59. Variation moyenne de Chlore pendant les périodes hivernales

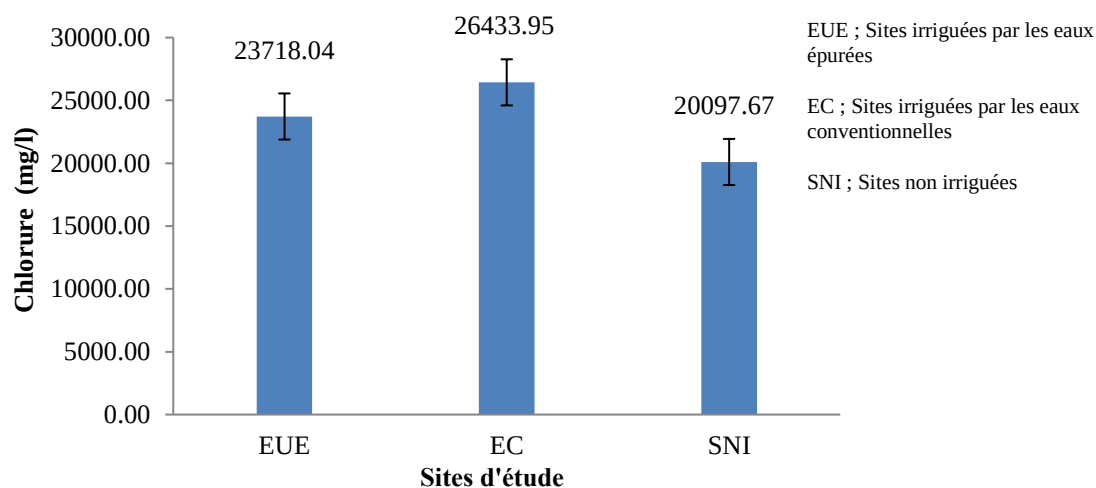


Figure 60. Variation moyenne de Chlore pendant les périodes estivales

2.5.2. Bicarbonates

L'élément bicarbonates présente la même allure des fluctuations des concentrations au niveau des eaux phréatiques, avec une certaine augmentation des teneurs vers la fin de l'essai. Les concentrations moyennes de bicarbonates au niveau des stations irriguées par les eaux épurées varient entre un minimum de $202,89 \pm 124,65 \text{ mg/l}$ et un maximum de $208,37 \pm 153,92 \text{ mg/l}$ (Fig. 61). Concernant les sites irrigués par les eaux conventionnelles, les teneurs moyennes de bicarbonates allant de $161,26 \pm 75,15 \text{ mg/l}$ à $202,23 \pm 126,94 \text{ mg/l}$ (Fig. 63). Parallèlement, les concentrations moyennes de même élément au niveau des sites non irrigués allant de $107,83 \pm 38,8 \text{ mg/l}$ à $181,20 \pm 106,15 \text{ mg/l}$ (Fig. 61).

Parallèlement, pendant les périodes hivernales, les concentrations moyennes de bicarbonates des sites irrigués par les eaux épurées sont évaluées à $206,14 \pm 1,69 \text{ mg/l}$, celles des sites irrigués par les eaux conventionnelles estimés à $184,31 \pm 17,03 \text{ mg/l}$. La concentration moyenne de bicarbonates des sites non irrigués estimé à $172,80 \pm 7,78 \text{ mg/l}$ (Fig. 62).

D'un autre côté, l'analyse de nos résultats présentés par la figure 63 montre que les périodes estivales connue presque la même allure des concentrations de bicarbonates à travers toute la zone, avec des fluctuations entre sites irrigués par les eaux épurées ($205,34 \pm 3,69 \text{ mg/l}$), sites irrigués par les eaux conventionnelles ($182,08 \pm 20,86 \text{ mg/l}$) et sites non irrigués ($136,90 \pm 41,11 \text{ mg/l}$). Par ailleurs, l'analyse factorielle discriminante (Annexe 20) indique que le bicarbonate est un facteur caractérisant les eaux phréatiques des sites irrigués. De même, l'analyse de la variance et le test de Newman-Keuls (Annexe 21 et 22) montrent que les variations de bicarbonates entre les sites étudiés restent non significatives.

Djidel (2008), a déclaré que les teneurs des bicarbonates dans la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla varient entre 50 mg/l et 1000 mg/l). Dans le même axe, Slimani (2006) a déclaré que les teneurs en bicarbonates des eaux phréatiques dans la même région allant de 111 à 367 mg/l selon les périodes et les zones de prélèvements.

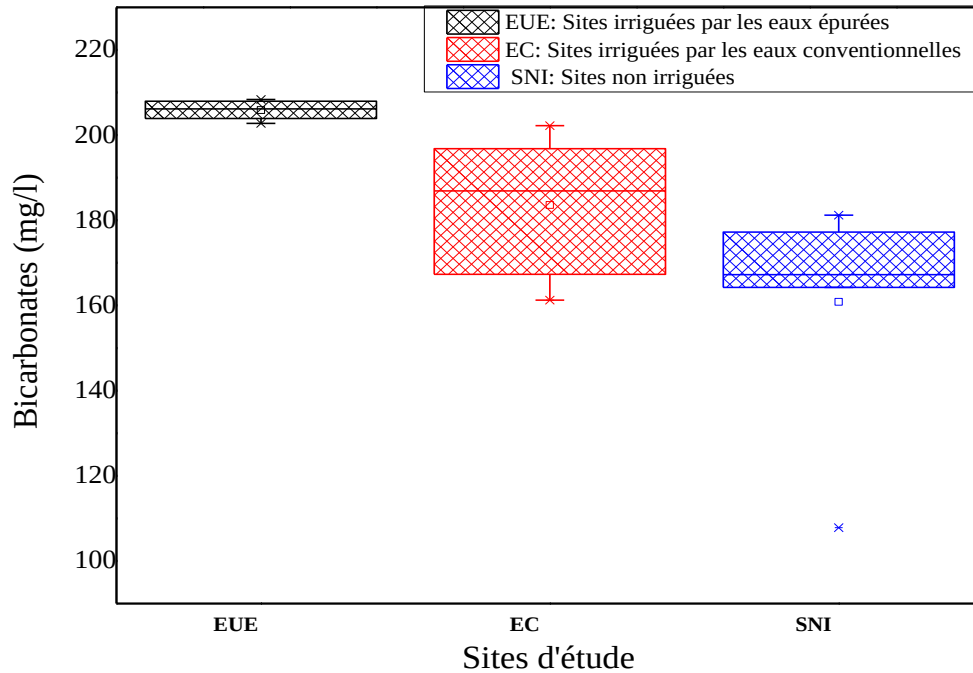


Figure 61. Variation moyenne de bicarbonates des eaux phréatiques entre 2015 et 2019

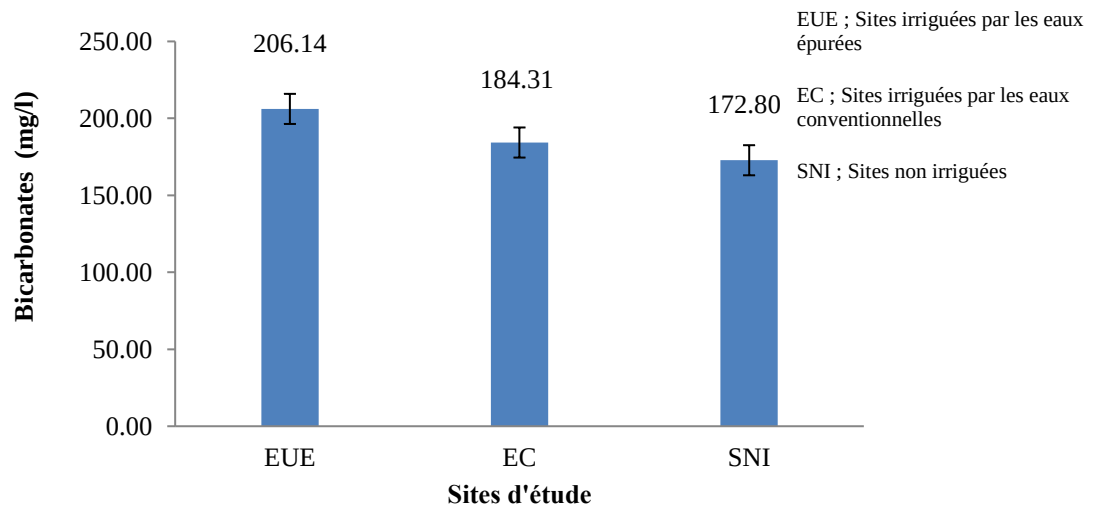


Figure 62. Variation moyenne de bicarbonates pendant les périodes hivernales

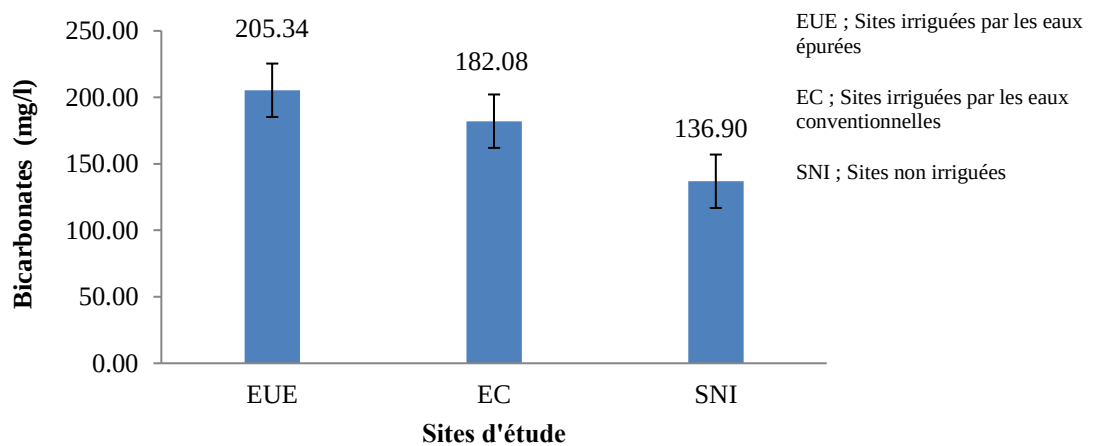


Figure 63. Variation moyenne de bicarbonates pendant les périodes estivales

2.5.3. Sulfates

Selon Rodier et *al.* (2009), les concentrations en ion sulfates des eaux naturelles sont très variables, de plus, les terrains ne contenant pas une proportion importante de sulfates minéraux, elles peuvent atteindre 30 à 50 mg/l, mais ce chiffre peut être très largement dépassé dans les zones contenant du gypse ou lorsque le temps de contact avec la roche est élevé.

Dans notre cas, des fortes valeurs de sulfates sont enregistrées. Les concentrations moyennes des eaux phréatiques en sulfates au niveau des stations irriguées par les eaux épurées varient entre $2736,91 \pm 1361,40$ mg/l et un maximum de $3018,94 \pm 1713,53$ mg/l (Fig. 64). Concernant les sites irrigués par les eaux conventionnelles, les teneurs moyennes de sulfates sont oscillées entre $3050,25 \pm 1543,07$ mg/l et $4634,67 \pm 2794,17$ mg/l (Fig. 64). Parallèlement, les concentrations de sulfates au niveau des sites non irrigués sont allées de $2006,25 \pm 500,16$ mg/l à $3191,25 \pm 1592,63$ mg/l (Fig. 64).

Successivement, à travers les campagnes de prélèvement réalisées, les concentrations moyennes des sulfates ont connues des fluctuations sur tout le périmètre. Durant les périodes hivernales, les concentrations moyennes de cet élément varient entre $2827,31 \pm 199,42$ mg/l pour les sites irrigués par les épurées à $3827,02 \pm 798,10$ mg/l pour les sites irrigués par les eaux de forage. Celle des sites non irrigués a évalué de $2592,84 \pm 599,62$ mg/l (Fig. 65). Entre autres, les teneurs moyennes de même élément des eaux phréatiques pendant les périodes estivales connues presque la même allure. La concentration moyenne des sites irrigués par les eaux épurées est estimée à $2877 \pm 199,42$ mg/l, celles des sites irrigués par les eaux conventionnelles a évalué de $3464,13 \pm 386,37$ mg/l et celles des sites non irrigués est estimée à $3293,63 \pm 452,37$ mg/l (Fig. 66). En revanche, quoique l'analyse factorielle discriminante (Annexe 20) indique que le sulfate est un facteur caractérisant les eaux phréatiques des sites irrigués, l'analyse de la variance et le test de Newman-Keuls (Annexe 21 et 22) montrent que les variations de sulfates entre les sites étudiés sont non significatives.

La comparaison de nos résultats avec les études antérieures réalisées dans la zone d'étude a montré que les concentrations des SO_4^{--} dans la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla sont très élevées. Slimani (2006), a signalé que les teneurs moyennes des sulfates des eaux phréatiques dans la même région varient entre 1529 mg/l et 60932 mg/l selon les périodes et les sites de prélèvement. D'autre part, Djidel (2008), a déclaré que les sulfates

des eaux phréatiques de Ouargla sont variés entre 1000 mg/l et 31000 mg/l entre Février et Juin 2007.

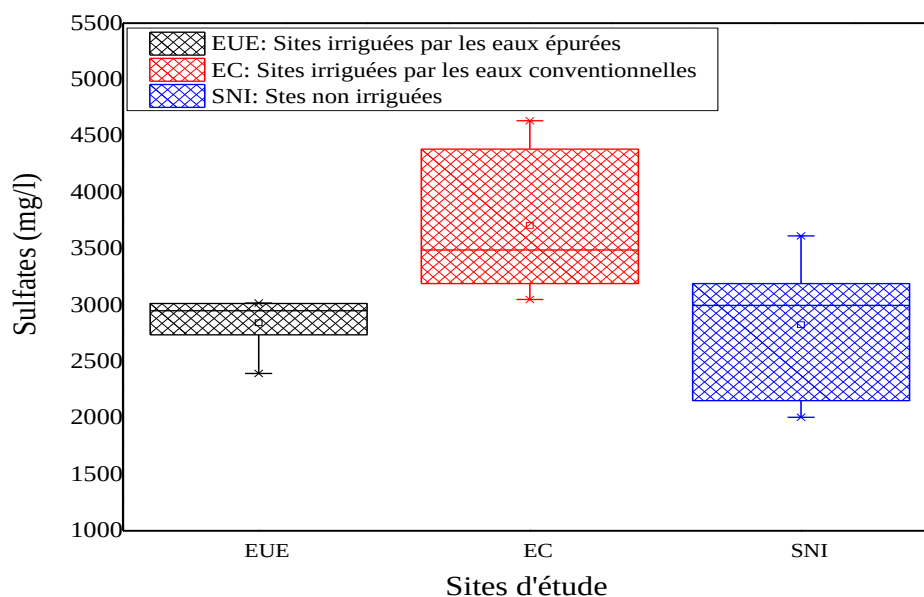


Figure 64. Variation moyenne de sulfates des eaux phréatiques entre 2015 et 2019

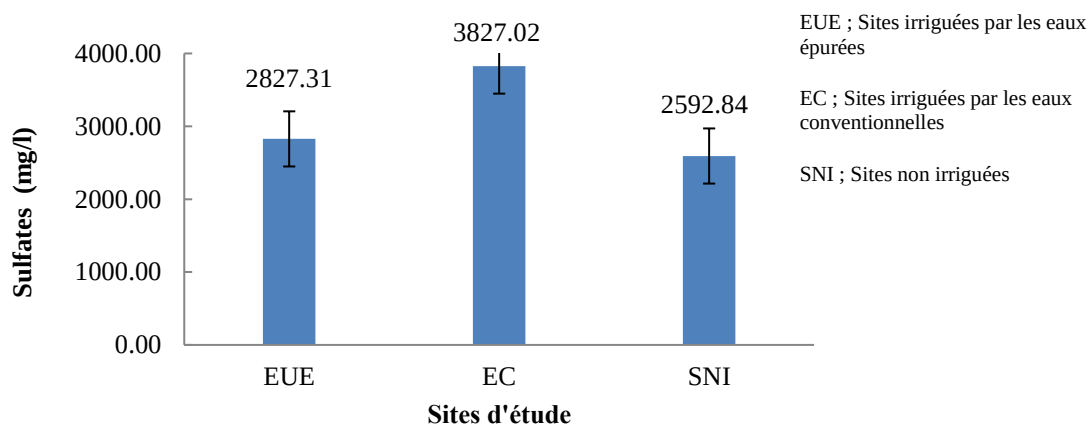


Figure 65. Variation moyenne de sulfates pendant les périodes hivernales

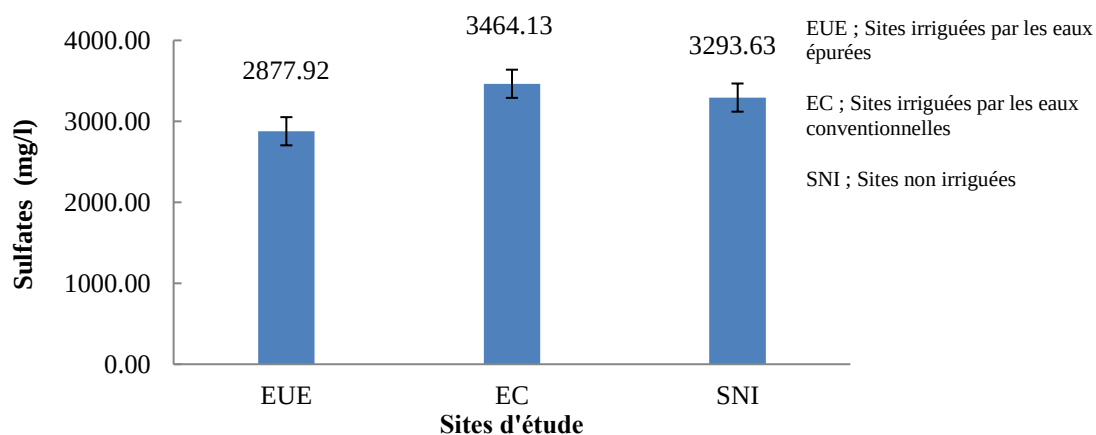


Figure 66. Variation moyenne de sulfates pendant les périodes estivales

2.6. Sodicité des eaux phréatiques

La figure 67 de SAR des eaux phréatiques montre que ces derniers présentent un degré d'alcalinisation sévère sur toute la zone sauf pour les sites P5, P6, P7, P26 et P31, où l'alcalinisation enregistrée est modérée. Dans les sites irrigués par les eaux usées épurées, le S.A.R. varie dans un intervalle borné entre 8,15 (P5) et 68,46 (P1), avec une moyenne de 29,63. Concernant les sites irrigués par les eaux conventionnelles, le S.A.R. varie entre 7,82 (P25) et 71,05 (P17), avec moyenne de 31,92. Les eaux phréatiques des sites non irrigués présentent un S.A.R. varie entre 10,82 (P16) et 23,83 (P18) avec une moyenne de 18,50 estimé durant la période d'étude. Cette sodicité excessive des eaux phréatiques peuvent engendrer une dégradation sévère des sols cultivés par l'enrichissement de la solution de sols par le sodium.

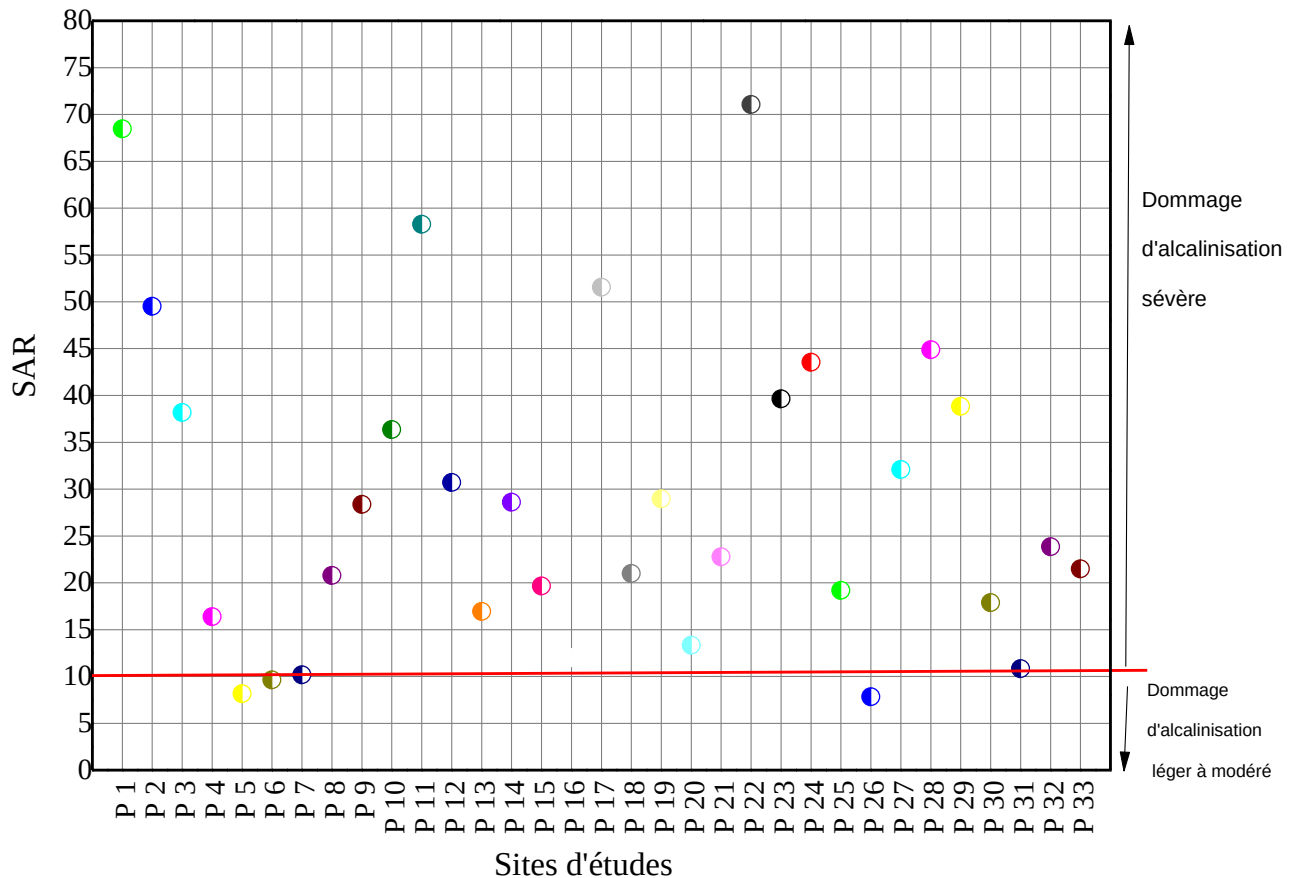


Figure 67. Variation spatiale moyenne de la sodicité des eaux phréatiques

2.7. Faciès chimiques des eaux

Pour identifier le faciès hydro-chimiques et pour avoir une bonne indication sur l'aspect qualitatif des eaux phréatiques étudiées, on y réfère au diagramme de Piper qui est réalisé par le logiciel Diagramme. La présentation des résultats des analyses hydro-

chimiques pour tous les sites, et à travers toutes les campagnes de prélèvement sur ce type de diagramme (Fig. 68 ; 69), a permis d'avoir une approche globale sur les faciès chimiques des eaux de la nappe superficielle dans la zone d'étude.

Les présentations graphiques n° 68 et 69 montrent une faible variation des faciès géochimique des eaux phréatique dans la zone d'étude. Au début de l'essai, deux faciès cationiques sont enregistrés : Le faciès calcique au niveau des sites P5, P25, P26 et P30, et le faciès sodique qui est dominé sur le reste du périmètre. De même, le faciès anionique est dominé par l'ion chlore (Fig. 68 A). Nos résultats obtenus indiquent que les eaux de la nappe phréatique étudiées ayant un faciès hydro-chimique hyper chloruré-sodique à hyper chloruré-calcique. Vers la fin de l'essai, le faciès hyper chloruré-sodique est presque dominé sur toute la zone (Fig. 68 D). Parallèlement, le faciès chimique des eaux phréatiques pendant les périodes estivales reste fluctuer entre hyper chloruré-sodique et hyper chloruré-calcique (Fig. 69).

Les résultats de faciès chimique des sites d'étude sont logiques si on référer à la nature des eaux d'irrigation qui appartient au même faciès. Le recours vers l'irrigation par les eaux conventionnelles dans la zone d'étude a influencé le changement des concentrations ioniques des eaux phréatiques par lixiviation des sels accumulés dans les sols notamment les sols irrigués par les eaux épurées.

Selon Djidel (2008), deux pôles de faciès chimiques caractérisant la nappe phréatique de Ouargla, le faciès chloruré sodique (eaux des dépressions, chotts et sebkhas) et l'autre sulfaté sodique (eaux de la ville et des affleurements du Mio-pliocène) avec une prédominance chlorurée.

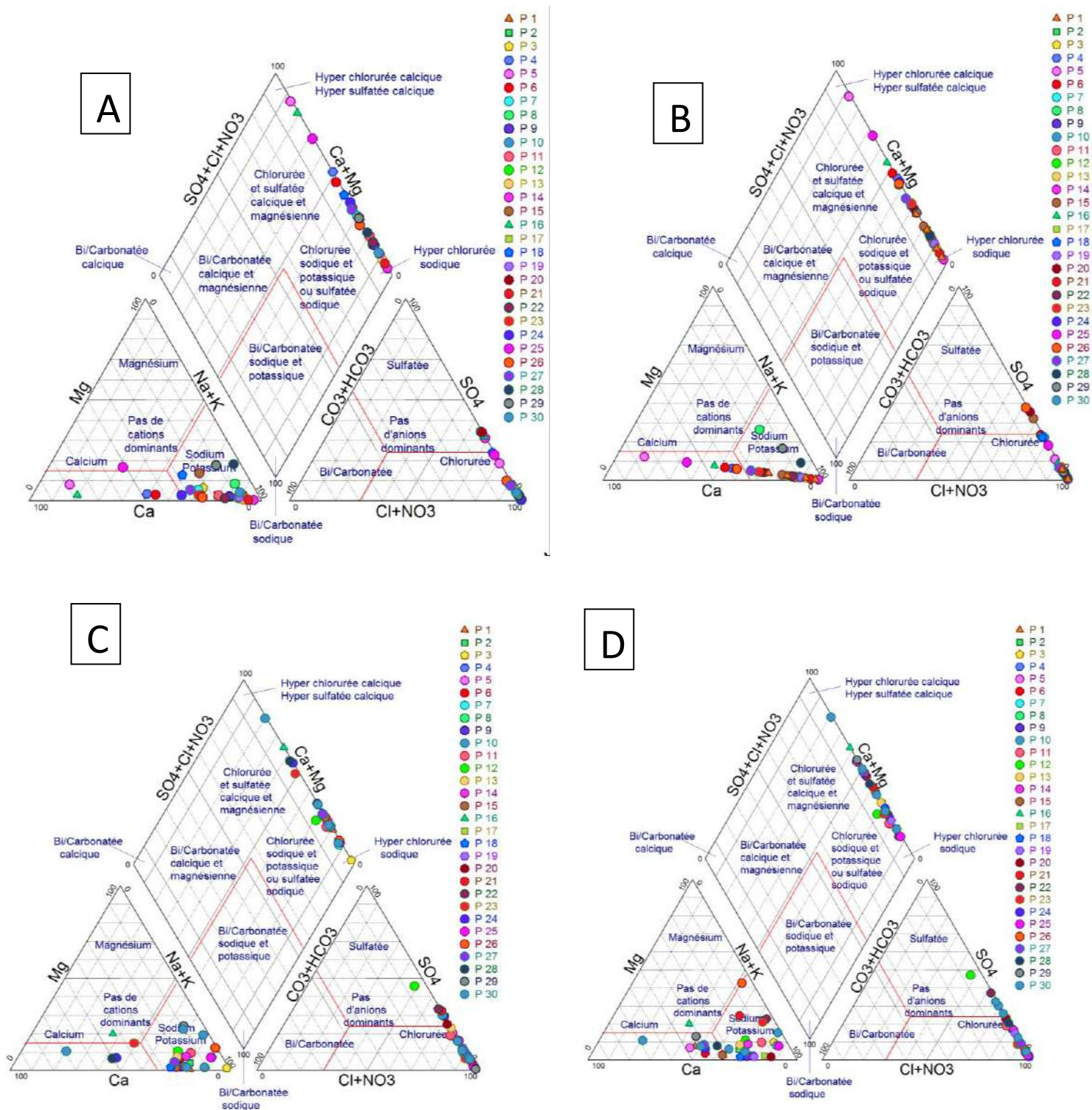


Figure 68. Faciès hydro-chimiques des eaux phréatiques pendant les périodes hivernales

A : Faciès des eaux pendant la campagne Hiver 2015 ; B : Faciès des eaux pendant la campagne Hiver 2017 ;
C : Faciès des eaux pendant la campagne Hiver 2018 ; D : Faciès des eaux pendant la campagne Hiver 2019.

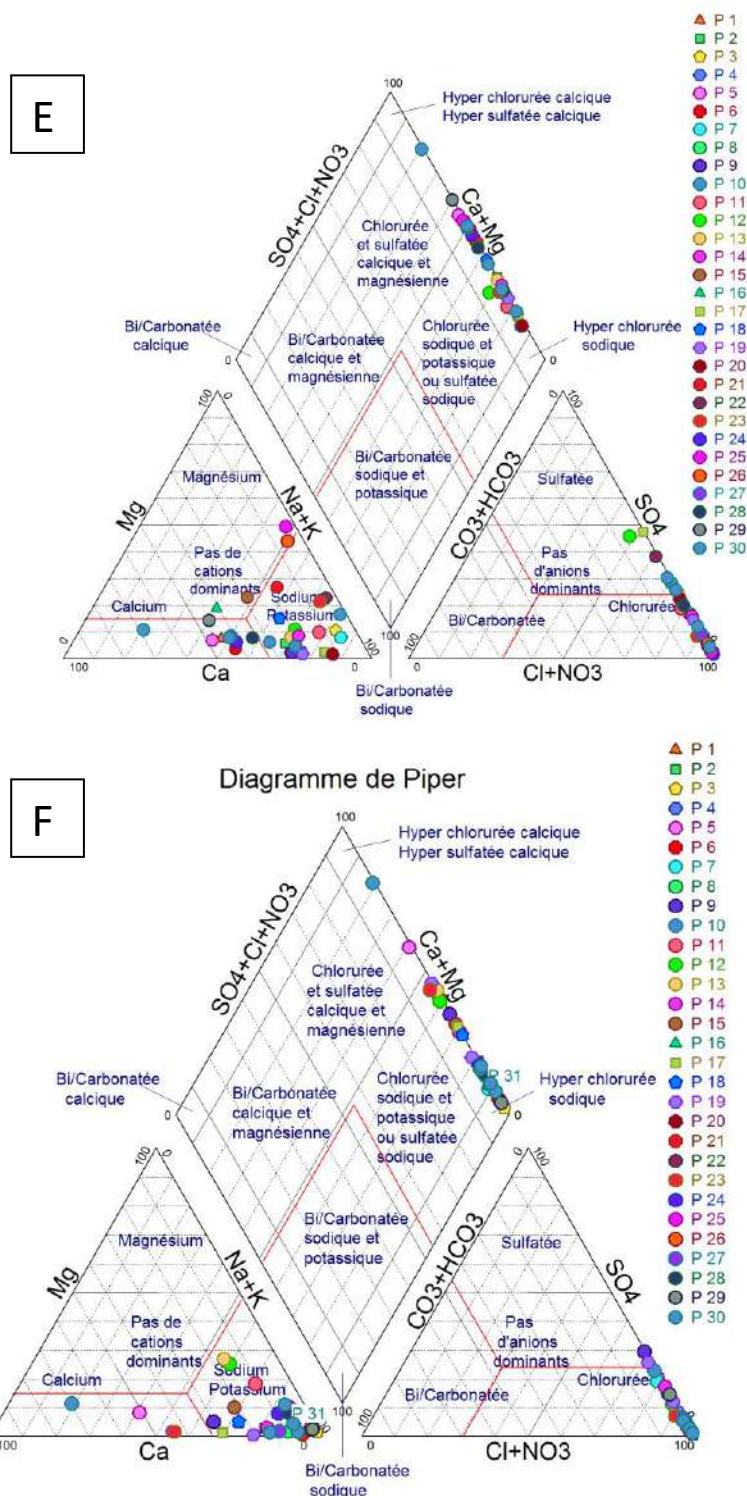


Figure 69. Faciès hydro-chimiques des eaux phréatiques pendant les périodes estivales

(E : Faciès des eaux pendant la campagne Été 2015 ; F : Faciès des eaux pendant la campagne Été 2019)

2.8. Pollution minérale des eaux

2.8.1. Ammonium

D'après Aïtoughrou (2007), la présence des ions ammonium dans les eaux est l'indice d'une contamination par les rejets d'origine humaine ou industrielle. De même, Rodier et *al.* (2005), ont signalé que la mise en évidence dans l'eau, de teneurs importantes en ammonium implique une contamination récente par les matières organiques en décomposition, de plus en profondeur, les eaux peuvent se charger en ions ammonium par réduction des nitrates sous l'action des bactéries autotrophes ou par les ions ferreux.

Les valeurs moyennes d'ammonium montrent que les teneurs des eaux phréatiques de cet élément dans la zone d'étude sont faibles, qui ne dépassent pas les 7 mg/l pour tous les prélèvements. Les concentrations moyennes d'ammonium au niveau des stations irriguées par les eaux épurées varient entre un minimum de $2,395 \pm 1,83$ mg/l et un maximum de $3,838 \pm 1,79$ mg/l (Fig. 70). Concernant les sites irrigués par les eaux conventionnelles, les teneurs moyennes d'ammonium sont allées de $1,03 \pm 0,8$ mg/l à $2,72 \pm 1,5$ mg/l (Fig. 70). Parallèlement, les concentrations de même élément au niveau des sites non irrigués allant de $0,138 \pm 0,015$ mg/l à $3,02 \pm 1,7$ mg/l (Fig. 70).

Pendant les périodes des basses eaux, les concentrations moyennes d'ammonium des sites irrigués par les eaux épurées ont été estimées à $2,88 \pm 0,64$ mg/l, celles des sites irrigués par les eaux conventionnelles ont été estimées à $1,72 \pm 0,72$ mg/l et des sites non irrigués ont été estimées à $1,53 \pm 1,22$ mg/l (Fig. 71). Parallèlement, la variation d'ammonium pendant les périodes estivales connue la même allure, où les concentrations moyennes enregistrées varient entre $3,07 \pm 0,95$ mg/l pour les sites irrigués par les eaux épurées à $1,95 \pm 0,92$ mg/l pour les sites irrigués par les eaux conventionnelles et $1,08 \pm 1,33$ mg/l pour les sites non irrigués (Fig. 72).

L'analyse des résultats obtenus indique que vers la fin de l'essai, les sites irrigués connaissent un certain enrichissement des eaux phréatiques en ammonium. Cela peut être le résultat de la décomposition de la matière organique apportée par les eaux épurées aux sols et affecter l'activité biologique, ainsi que la réduction des nitrates et nitrites en ammonium. Pour les sites irrigués par les eaux conventionnelles, les intrants agricoles et les engrais minéraux contribuent probablement à l'enrichissement de la nappe phréatique en ammonium. Toutefois, cette variation reste non significative entre les sites irrigués. D'un autre côté, l'analyse factorielle discriminante (Annexe 20) indique que l'ammonium est un facteur caractérisant les eaux phréatiques des sites irrigués dans la zone d'étude, et l'analyse

de la variance et le test de Newman-Keuls (Annexe 21 et 22) montrent que les variations d'ammonium entre les sites irrigués et non irrigués sont significatives dans la zone d'étude.

Dans le même axe, l'étude de Djidel (2008), a montré que les concentrations de NH_4^+ au niveau des eaux phréatiques à Ouargla sont bornées entre 0 mg/l et 7 mg/l. De même, les résultats obtenus par Slimani (2006), ont indiqué que la concentration de cet élément dans la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla dans les zones proches des rejets des eaux usées est variée entre 7,50 mg/l et 41,75 mg/l.

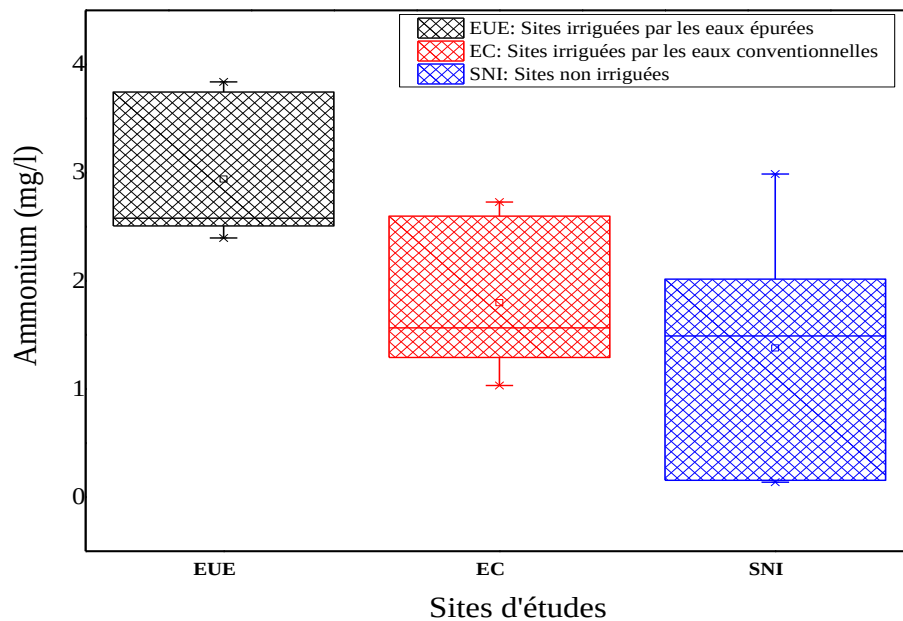


Figure 70. Variation d'ammonium des eaux phréatiques entre 2015 et 2019

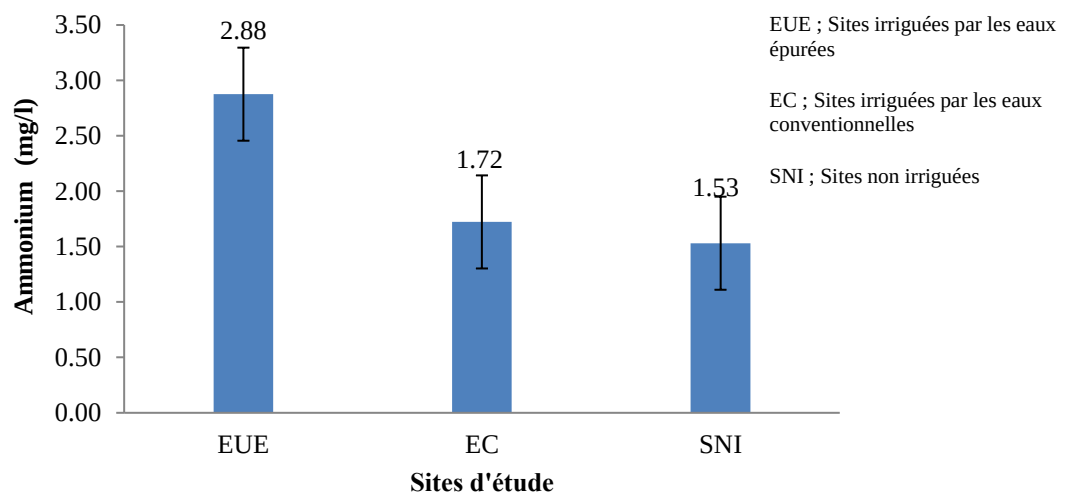


Figure 71. Variation moyenne d'ammonium pendant les périodes hautes eaux

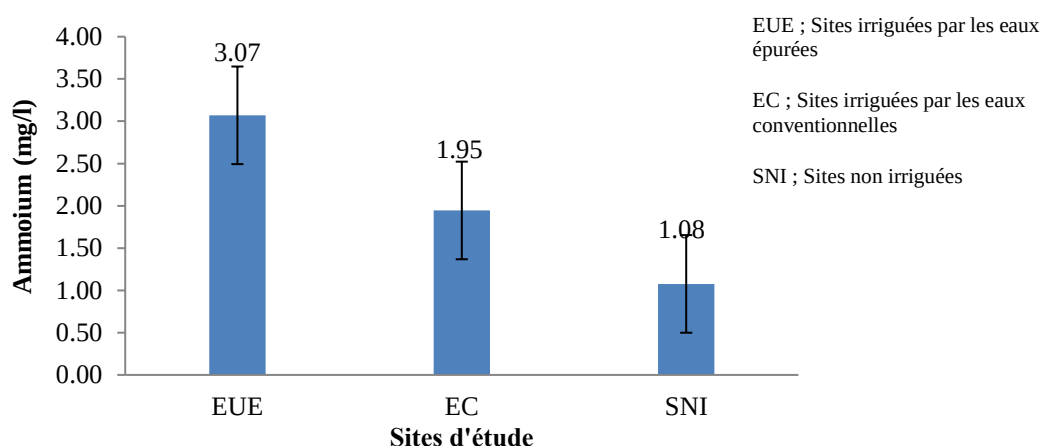


Figure 72. Variation moyenne d'ammonium pendant les périodes des basses eaux

2.8.2. Nitrites

Les nitrites constituent une forme de transition entre les nitrates et l'ammonium anaérobies en présence des sulfito-réducteurs. C'est une forme d'azote toxique et faiblement stable. Elles peuvent également être liées à l'oxydation bactérienne de l'ammoniac, elles proviennent d'une oxydation incomplète des matières organiques (Rodier *et al.*, 1996).

Les teneurs moyennes des nitrites au niveau des stations irriguées par les eaux épurées ont été oscillées entre un minimum de $0,19 \pm 0,19 \text{ mg/l}$ et un maximum de $0,28 \pm 0,22 \text{ mg/l}$ (Fig. 73). Concernant les sites irrigués par les eaux conventionnelles, les teneurs moyennes de nitrites allant de $0,13 \pm 0,12 \text{ mg/l}$ à $0,22 \pm 0,15 \text{ mg/l}$ (Fig. 73). Parallèlement, les concentrations moyennes de même élément des non irriguées allant de $0,03 \pm 0,02 \text{ mg/l}$ à $0,14 \pm 0,15 \text{ mg/l}$ (Fig. 73). Les périodes hivernales reflètent la même allure de variation de nitrite où les sites irrigués par les eaux épurées enregistrent un moyen de $0,23 \pm 0,029 \text{ mg/l}$, les sites irrigués par les eaux conventionnelles consignent un moyen de $0,16 \pm 0,04 \text{ mg/l}$ et les sites non irrigués enregistrent un moyen de $0,096 \pm 0,05 \text{ mg/l}$ (Fig. 74). Simultanément, pendant les périodes estivales, les sites irrigués par les eaux épurées consignent un moyen de $0,24 \pm 0,06 \text{ mg/l}$, les sites irrigués par les eaux conventionnelles enregistrent un moyen de $0,168 \pm 0,04 \text{ mg/l}$, et les sites non irrigués enregistrent un moyen de $0,049 \pm 0,027 \text{ mg/l}$ (Fig. 75).

L'analyse factorielle discriminante (Annexe 20) indique que le nitrite est un facteur caractérisant les eaux phréatiques des sites irrigués. Toutefois, l'analyse de la variance et le test de Newman-Keuls (Annexe 21 et 22) montrent que les variations de nitrite entre les sites étudiés restent non significatives.

Nos résultats obtenus des concentrations de l'élément nitrite dans les eaux de la nappe phréatique de Ouargla sont largement supérieures à ceux déclarés par Slimani (2006). L'auteur a signalé que les teneurs de nitrites dans la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla varient entre ($0,03 \text{ mg/l} \leq \text{NO}_2 \leq 0,07 \text{ mg/l}$), en revanche nos observations sont comparables à ceux signalés par Djidel (2008), où il a déclaré que les teneurs des nitrites sont allées de $0,4 \text{ mg/l}$ pendant les périodes des hautes eaux à 2 mg/l pendant les périodes basses eaux.

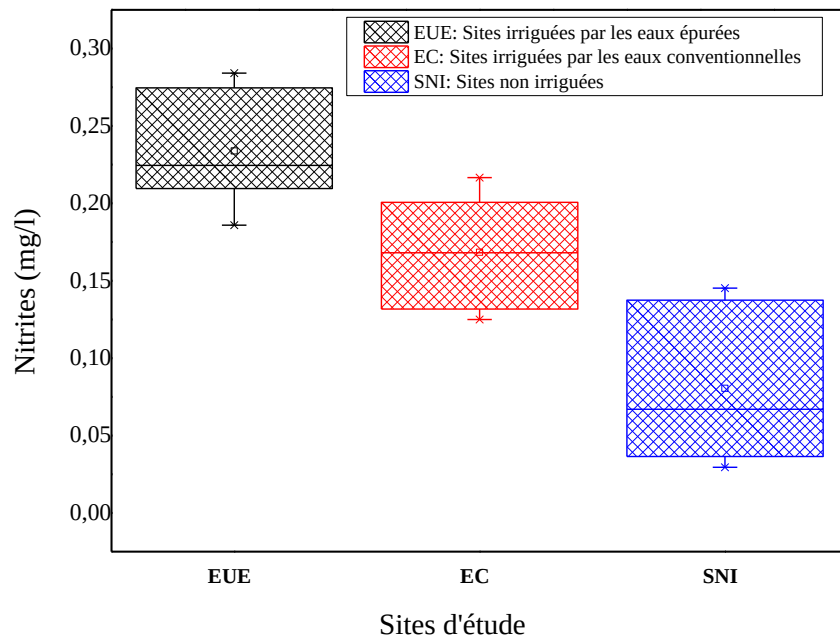


Figure 73. Variation de nitrites des eaux phréatiques entre 2015 et 2019

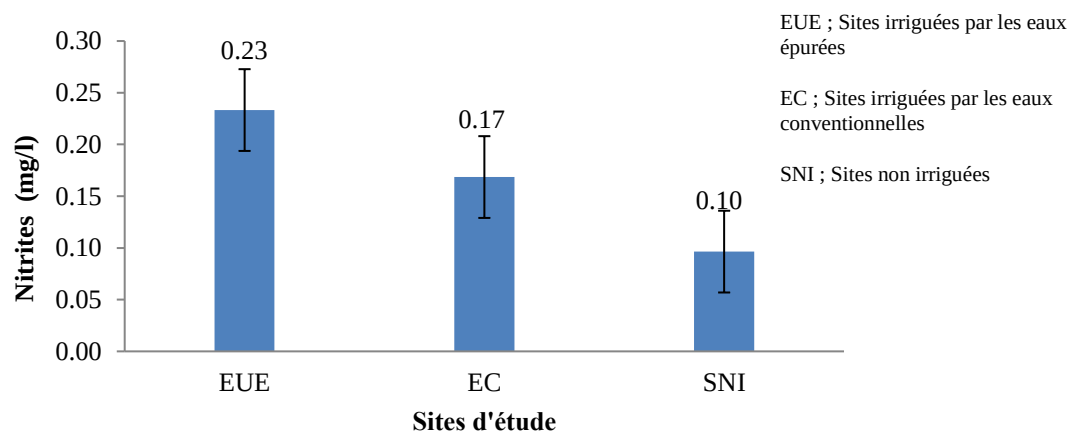


Figure 74. Variation moyenne de nitrites pendant les périodes des hautes eaux

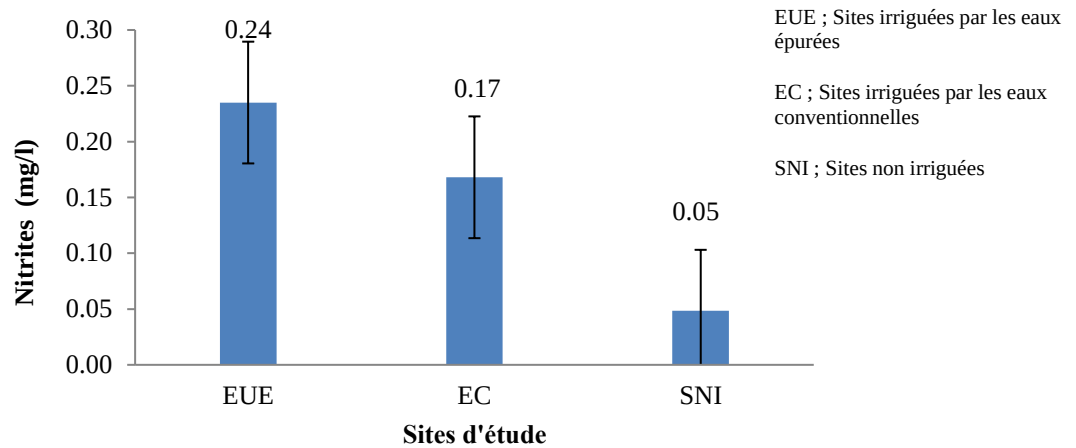


Figure 75. Variation moyenne de nitrites pendant les périodes des basses eaux

2.8.3. Nitrate

Selon Rodier et *al.* (2005), toutes les formes de l'azote (azote organique, ammoniacque, nitrites, etc.) sont susceptibles d'être à l'origine des nitrates par un processus d'oxydation biologique. De plus, Brabier et *al.* (2000), ont déclaré que dans les eaux naturelles non polluées, le taux des nitrates est très variable selon la saison et à l'origine des eaux, il peut varier de 1 à 15 mg/L et une concentration de 5 ou 8 mg/l est tout à fait normale

Les représentations graphiques n° 76, 77 et 78 des teneurs moyennes de nitrate des sites étudiées montrent que les eaux phréatiques reflètent des faibles concentrations de cet élément, dont ces derniers ne dépassent pas 1 mg/l pour toutes les compagnes. En revanche, certaines fluctuations de concentrations de nitrate sont enregistrées à travers les sites d'étude selon leurs modes de gestion d'irrigation.

Nos résultats obtenus montrent que les concentrations moyennes de nitrate enregistré dans les stations irriguées par les eaux usées épurées varient de $0,40 \pm 0,23$ mg/l à $0,528 \pm 0,23$ mg/l (Fig.76). Parallèlement, au niveau des sites irrigués par les eaux conventionnelles, les teneurs moyennes de même élément allant de $0,299 \pm 0,13$ mg/l à $0,637 \pm 0,20$ mg/l (Fig. 76). Les sites non irrigués présentent des valeurs allant de $0,27 \pm 0,05$ mg/l à $0,47 \pm 0,07$ mg/l (Fig.76). Pendant les périodes des hautes eaux, la concentration moyenne de nitrates des sites irrigués par les eaux épurées évaluées à $0,48 \pm 0,07$ mg/l, celles des sites irrigués par les eaux conventionnelles estimées à $0,50 \pm 0,17$ mg/l, et celles des sites non irrigués évaluées à $0,38 \pm 0,10$ mg/l (Fig. 77). Successivement, les périodes estivales enregistrent la même allure de variation de nitrates dans la zone d'étude, où les teneurs moyens les plus élevées sont enregistrés au niveau des sites irrigués par les eaux conventionnelles avec un moyen de $0,54 \pm 0,14$ mg/l (Fig. 78),

celles des sites irrigués par les eaux épurées est $0,52 \pm 0,01 \text{ mg/l}$ et les sites non irrigués est $0,46 \pm 0,01 \text{ mg/l}$ (Fig.78).

La variation de nitrate dans le périmètre d'étude a connu presque la même allure avec une tendance d'enrichissement des eaux phréatiques des sites irrigués vers la fin de l'essai. C'est tout à fait logique avec le changement radical des pratiques culturales qu'a connue la zone, notamment les eaux d'irrigation. Cela peut agir sur le lessivage des sols de toutes les accumulations des eaux épurées.

De même, l'analyse factorielle discriminante (Annexe 20) indique que le nitrate est un facteur caractérisant les eaux phréatiques des sites irrigués dans la zone d'étude, et l'analyse de la variance et le test de Newman-Keuls (Annexe 21 et 22) montrent que les variations de nitrates entre les sites étudiés sont non significatives.

Nos résultats obtenus sont comparables à celle signalé par l'ANRH entre 2010 et 2014, où les concentrations publiées de nitrate des eaux phréatiques à Ouargla varient entre 0 à 50 mg/l (Annexe 19). De même, les teneurs de nitrate enregistrées par Djidel (2008), au niveau de la même région ont été estimées entre $5,4 \text{ mg/l}$ et 270 mg/l .

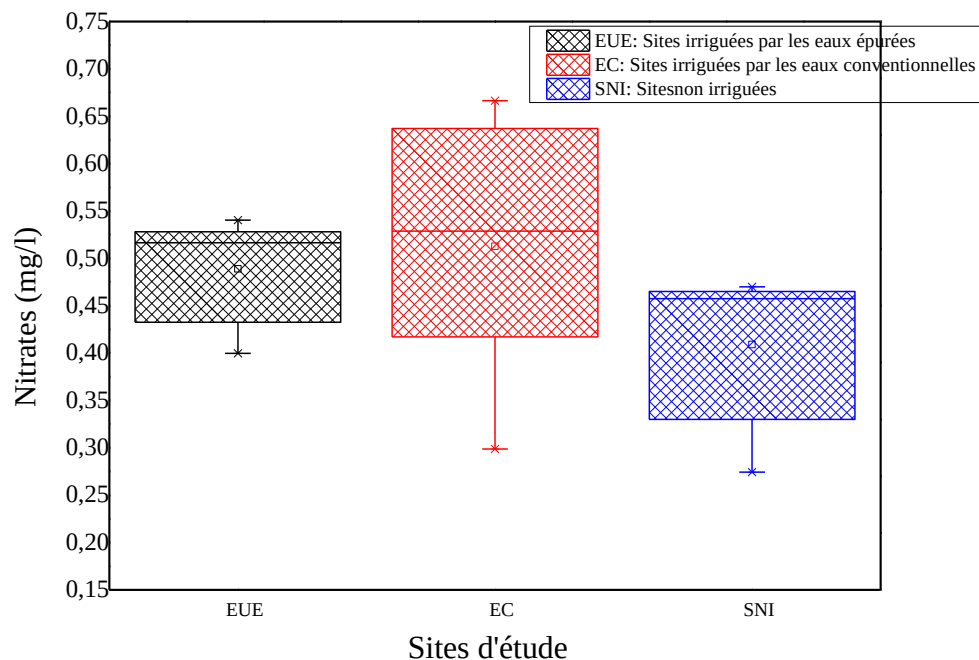


Figure 76. Variation de nitrates des eaux phréatiques entre 2015 et 2019

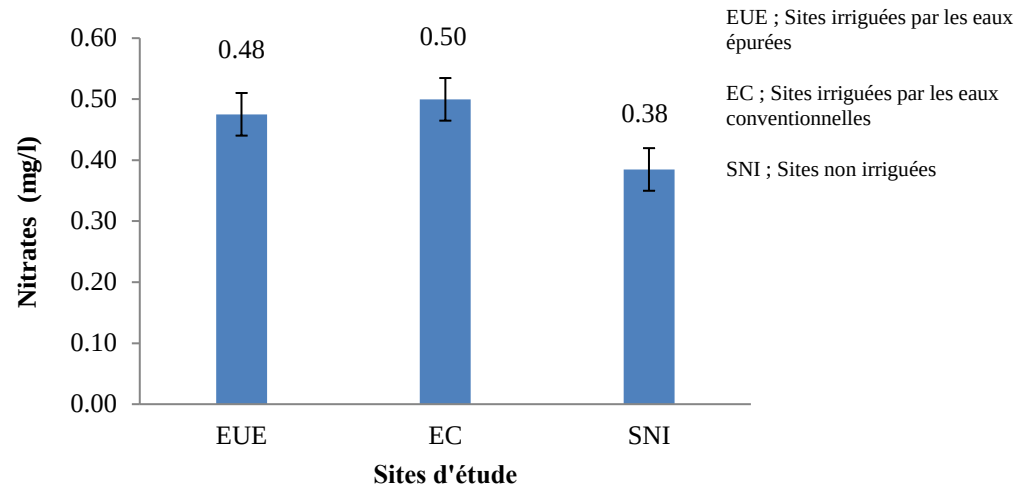


Figure 77. Variation moyenne de nitrates pendant les périodes des hautes eaux

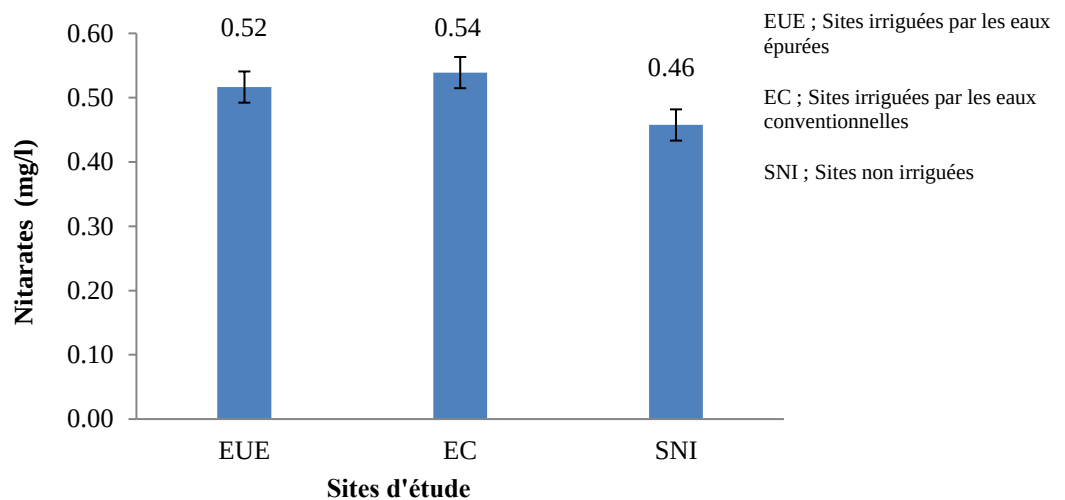


Figure 78. Variation moyenne de nitrates pendant les périodes des basses eaux

2.8.4. Phosphates

Le phosphore bio-disponible ou assimilable désigne, au sein de la quantité totale d'un sol, la fraction de P. L'ortho-phosphates la seule forme soluble à être directement utilisée par les organismes aquatiques. D'après Milin (2012), l'ortho-phosphates susceptible d'être prélevée par la plante, cette dernière absorbe le phosphore dans la solution du sol essentiellement par ses racines, sous forme d'ions ortho-phosphates dissous (H_2PO_4^- , PO_4^{3-} ou PO_4^{3-}). Pour cela, ce paramètre fait généralement l'objet d'un suivi particulier.

Une campagne d'analyse hivernale et autre estivale des phosphates sont réalisées, dont les résultats sont présentés par les figures 79, 80 et 81. Nos données obtenus montrent que les concentrations des ortho-phosphates dans les eaux phréatiques étudiées sont

généralement notables et dépasse les normes marocaines de pollutions préconisées (<0.010 mg/l), sauf pour les sites non irrigués.

Pendant la période des hautes eaux, au niveau des sites irrigués par les eaux épurées, les teneurs de cet élément allées de 0,2mg/l (P10) à 0,28mg/l (P12) (Fig. 79). Pour les sites irrigués par les eaux conventionnelles les teneurs sont variés entre de 0.1 mg/l et 0,2 mg/l (Fig. 80). Concernant les sites non irrigués, les teneurs en phosphates sont au-dessous de 0,005mg/l pour tous les sites (Fig. 81). Les périodes des basses eaux, ont connu la même allure de variations de PO_4^{3-} dans les eaux phréatiques. Les sites irrigués par les eaux non conventionnelles présentes les teneurs les plus élevées, elles sont succédées par les deux types restants, notamment les sites irrigués par les eaux conventionnelles et les sites non irriguée. L'analyse de nos résultats a montré l'apparition d'une certaine contamination de la nappe phréatique par les phosphates suite à l'irrigation par les eaux épurées par rapport aux sites irrigués par les eaux conventionnelles. Toutefois, l'analyse factorielle discriminante (Annexe 20) indique que les phosphates sont un facteur caractérisant les eaux phréatiques des sites irrigués. D'un autre côté, l'analyse de la variance et le test de Newman-Keuls (Annexe 21 et 22) montrent que les variations des phosphates entre les sites étudiés sont significatives.

Nos résultats obtenus sont comparables à ceux trouvés par Slimani (2006), l'auteur a déclaré que les teneurs des eaux phréatiques de Ouargla en phosphates allées de 0,4 mg/l à 0,86 mg/l. Dans le même axe Djidel (2008), a montré que les teneurs en phosphates variés entre 0,01 mg/l et 0,7 mg/l).

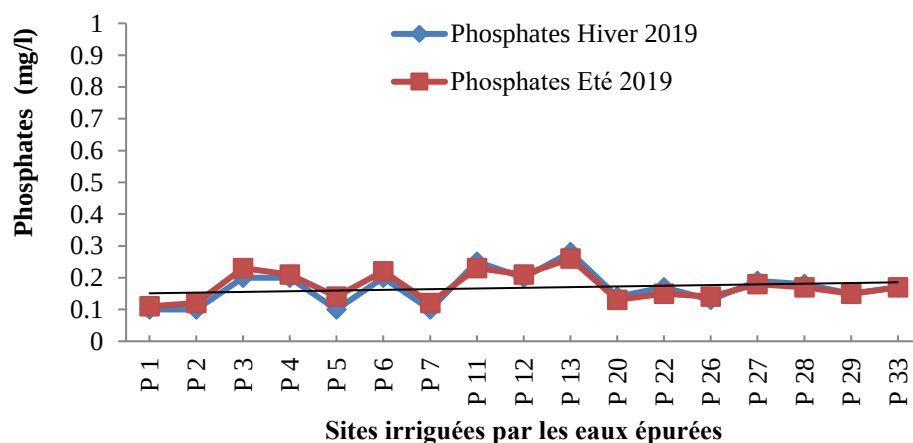


Figure 79. Variation spatiotemporelle de phosphate des sites irrigués par les eaux épurées

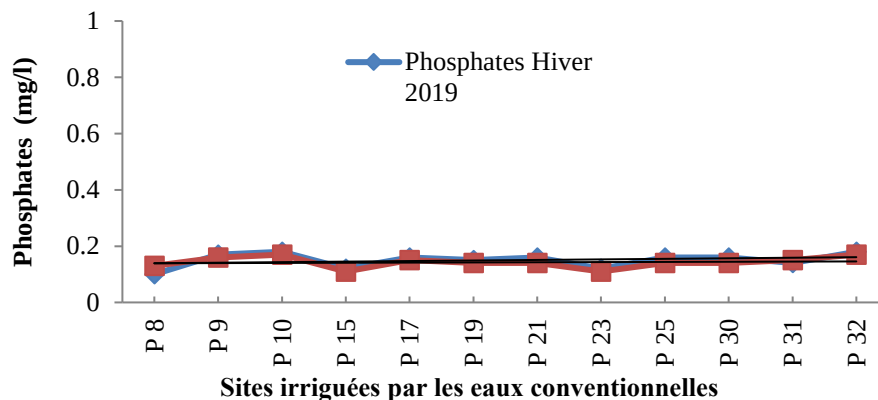


Figure 80. Variation spatiotemporelle de phosphate des sites irrigués par les eaux épurées

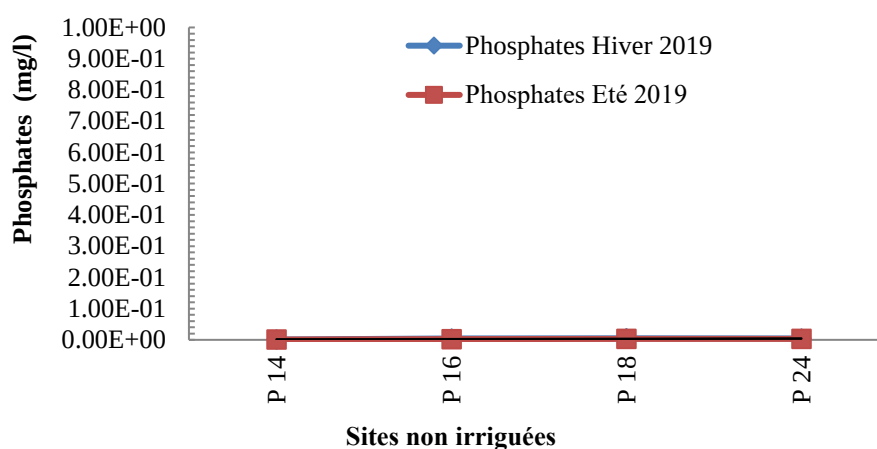


Figure 81. Variation spatiotemporelle de phosphate des sites non irrigués

2.9. Paramètres de pollution organique

Les paramètres de pollution de caractère organique sont la demande biologique en oxygène (DBO), et la demande chimique en oxygène (DCO). Selon Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec (2014), la dégradation des matières organiques entraîne une consommation de l'oxygène dissout dans l'eau. Cela se fait en présence des organismes vivants, et peut entraîner ainsi l'asphyxie du milieu et la pollution par les matières organiques. Parallèlement, Dufour (1982), a déclaré que la DBO₅ est inhibée d'autant plus longtemps que la salinité du milieu récepteur (à 35%) élevée, où cette inhibition est toujours retardée la minéralisation.

Une seule campagne d'analyse de DBO₅ et DCO sont réalisées pendant la période des hautes eaux en 2019. Les résultats consignés dans les figures n°81,82 et 83 montrent que les valeurs de la DBO₅ dans les eaux phréatiques au niveau des sites irrigués par les eaux épurées pour la période considérée varient entre 33mg/l (P12) à 37mg/l (P11) (Fig.

82). Pour les sites irrigués par les eaux conventionnelles, les teneurs de DBO_5 estimés entre 20mg/l pour (P15) et 42mg/l pour les sites P5, P21, P22, P25, P27, P29 et P32 (Fig. 83). Concernant les sites non irrigués, les teneurs de DBO_5 sont oscillées entre 17mg/l pour P24 et 19mg/l pour P18 (Fig. 81). L'analyse de la variation spatiale du DBO_5 a montrée l'effet inhibiteur de la salinité sur ce paramètre, où on y constater l'évolution antagoniste entre le DBO et la salinité de milieu.

Concernant la DCO, nos résultats montrent que les valeurs dans les eaux phréatiques au niveau des sites irrigués par les eaux épurées sont estimées entre 65mg/l et 75mg/l pour la période considéré (Fig. 82). Les teneurs de la DCO au niveau des sites irrigués par les eaux conventionnelles variés entre 60mg/l (P4) et 95mg/l (P1) (Fig. 83). En ce qui concerne les sites non irrigués, la DCO variés entre 42mg/l (P24) et 48mg/l (P18) (Fig. 84).

Toutefois, l'analyse factorielle discriminante (Annexe 20) indique que le DBO_5 et DCO sont des facteurs caractérisant les eaux phréatiques des sites irrigués dans la zone d'étude. Parallèlement, l'analyse de la variance et le test de Newman-Keuls (Annexe 21 et 22) montrent que les variations de DBO_5 et DCO entre les sites irriguées et non irriguées sont significatives. En revanche, cette variation reste non significative entre les sites irrigués par les eaux conventionnelles et les eaux non conventionnelles, ce qui traduit l'effet de la pratique d'irrigation dans le périmètre d'étude.

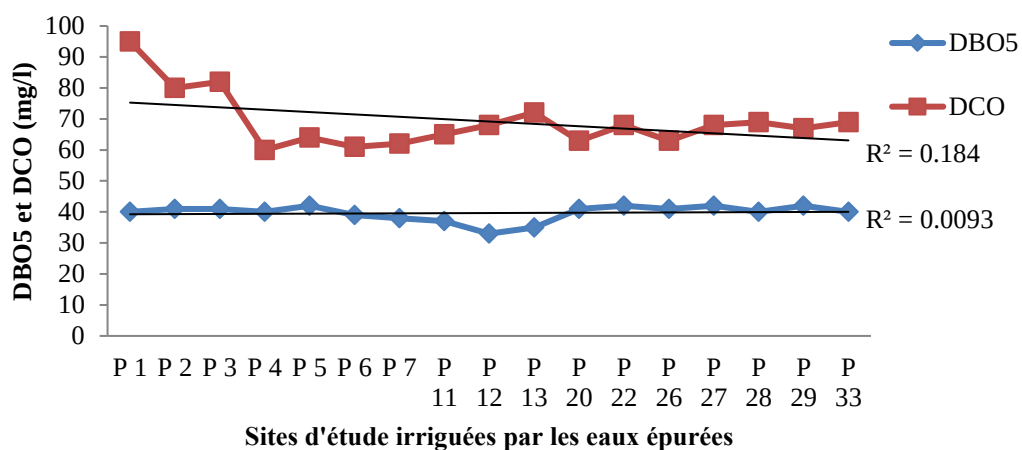


Figure 82. Variation spatiale de DBO_5 et DCO des sites irrigués par les eaux épurées

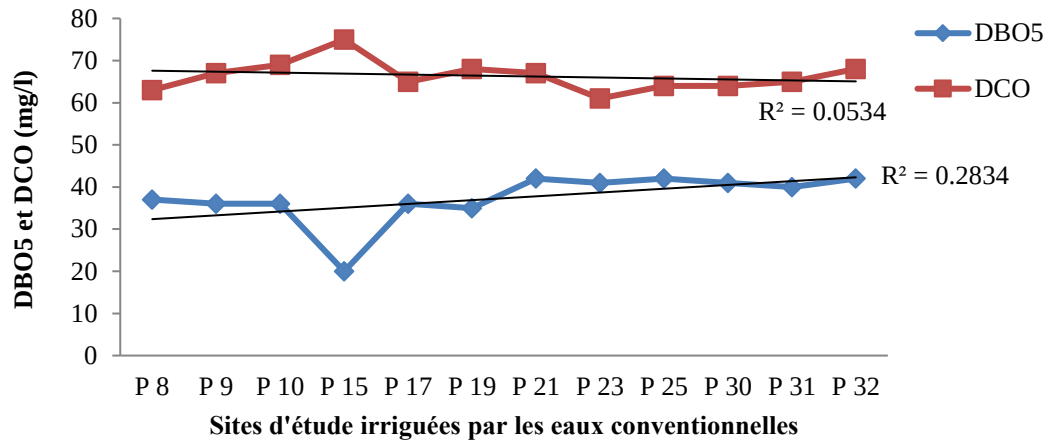


Figure 83. Variation spatiale de DBO₅ et DCO des sites irrigués par les eaux conventionnelles

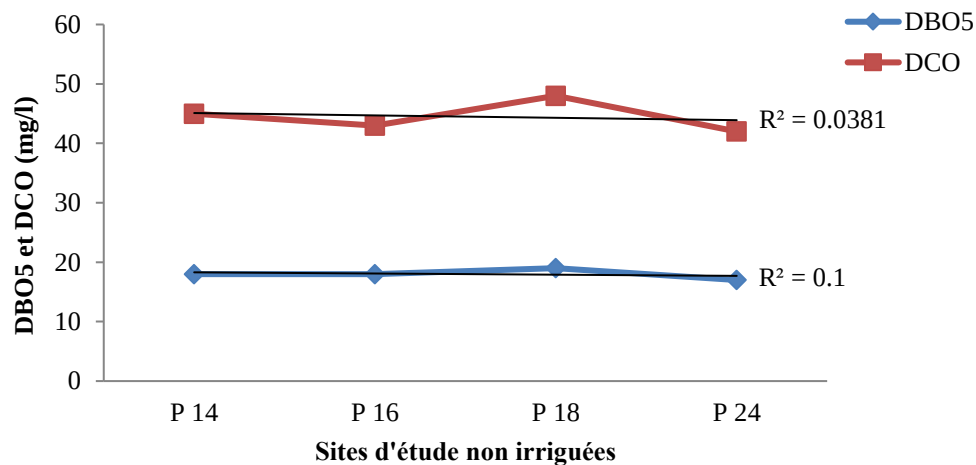


Figure 84. Variation spatiale de DBO₅ et DCO des sites non irrigués

2.10. Indice de pollution organique

Les valeurs de l'indice de la pollution organique indiquent la variation spatiale des classes de pollution par décomposition ou auto-purification de l'eau. La figure 85 montre que les eaux phréatiques étudiées ont des indices allant de 1,50 à 3,25. Les sites irrigués par les eaux épurées ont des indices variés entre 1,75 à 2 (P11, P12, P13). Concernant les sites irrigués par les eaux conventionnelles, IPO a varié entre 1,5 à 2,5 (Fig. 85). L'indice de pollution organique variée entre 3 à 3,25, qui reflètent une pollution modérée (Table. X). L'évolution spatiale de IPO reflète une forte à très forte pollution caractérise l'environnement souterraine du périmètre d'étude avec une évolution nette d'auto-purification au niveau des sites irrigués par les eaux épurées.

Nos résultats obtenus de la variation de pollution organique ont montré que la zone d'étude est déjà affectée par une pollution organique modéré, due que le périmètre est

situé proche à une ancienne zone d'épandage des eaux usées de la ville de Ouargla (Sebkhet Oum Erraneb), cette situation est aggravée par la vulnérabilité de pollution qui caractérise la nappe phréatique étudiée. En revanche, la réutilisation agricole des eaux épurées a influé sur l'évolution de pollution organique. Parallèlement, l'utilisation des intrants organiques et minéraux au niveau des sites irrigués par les eaux conventionnelles peut entraîner une pollution des eaux phréatiques peu profondes.

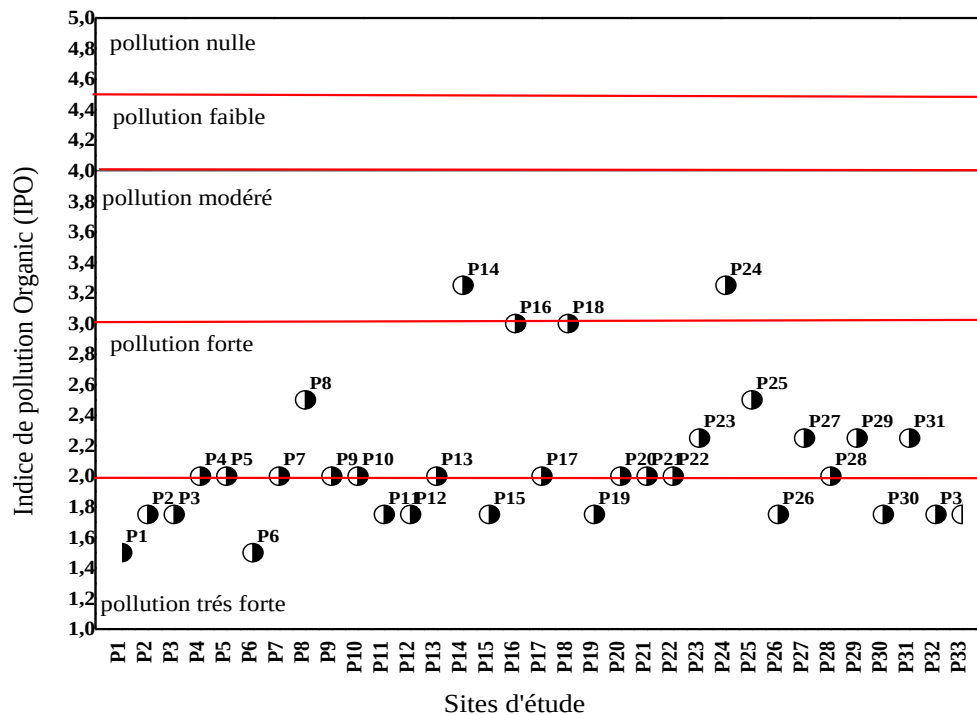


Figure 85. Variation d'indice de pollution organique des eaux phréatiques

L'interprétation de la carte d'indice de pollution organique des eaux étudiées (Fig. 86) indique le degré d'altération des eaux de la région d'étude. On note que la qualité des eaux oscille entre forte et très forte pollution organique de l'amont vers l'aval de la nappe phréatique, cela est probablement dû à la situation géographique du périmètre proche de Sebkhet Oum Erraneb et les quantités des eaux épurées réutilisées en irrigation ayant un indice de pollution organique très forte. Dans le même axe d'étude, Djidel (2008) a signalé que les eaux souterraines présentent une forte pollution organique, ce qui entraîne une infiltration de polluants par l'entremise de la zone non saturée perméable et de faible épaisseur (entre 0 -1,5 m) d'une lithologie se compose principalement de sable riche en gypse, reflétant la sensibilité de la zone vulnérable à l'infection par la pollution.

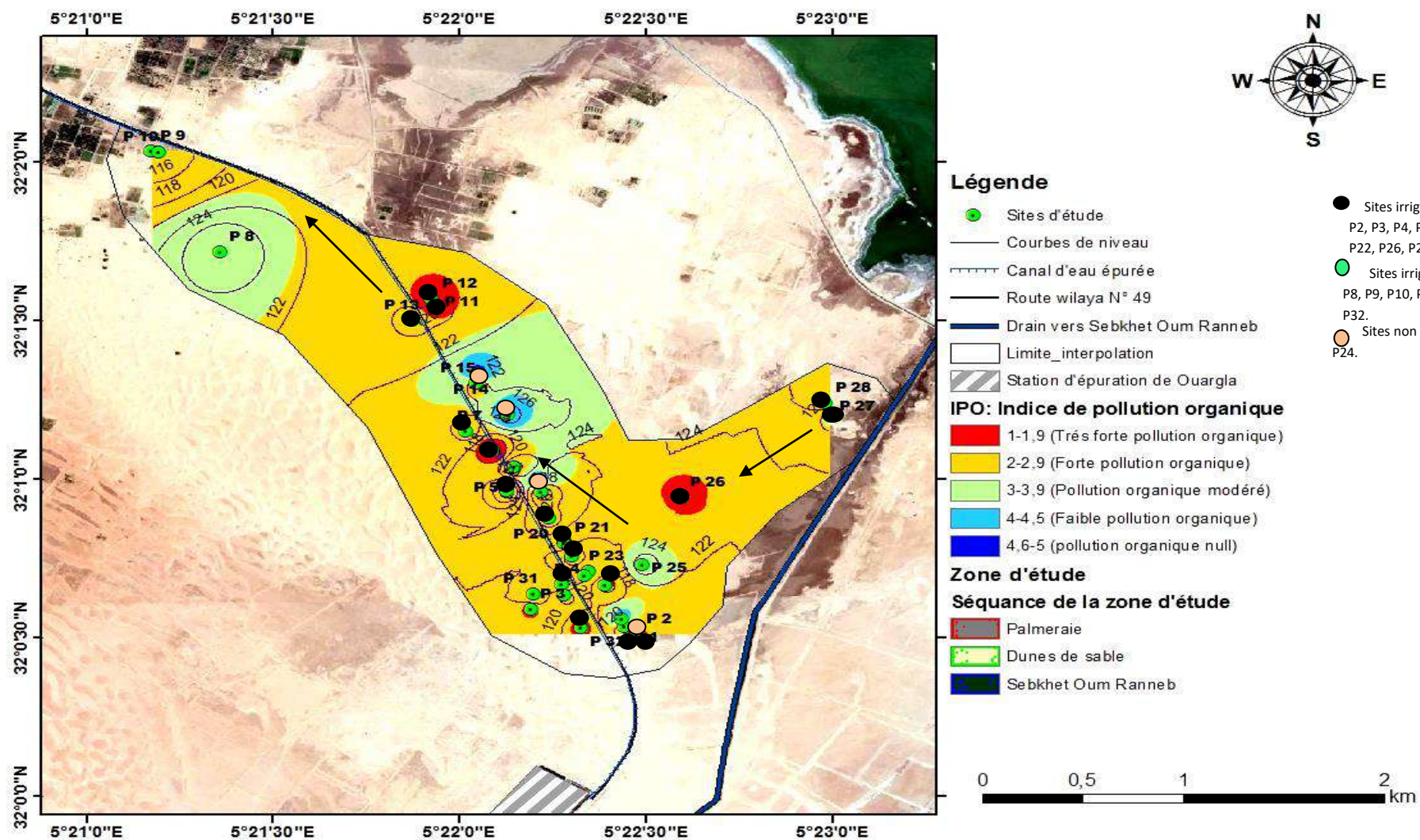


Figure 86. Variation spatiale de l'IPO des eaux phréatiques

2.11. Indice de biodégradabilité

L'indice de biodégradabilité (IB) indique l'auto-purification qui décrit les milieux riches ou pauvres en matière organique. La variation spatiale du rapport DCO/DBO₅ a montré que l'indice de biodégradabilité varie dans les eaux étudiées entre 1,5 et 3,75 (Fig. 87). L'IB au niveau des sites irrigués par les eaux épurées varie entre 1,76 à 2,06 (P11, P12, P13). Concernant les sites irrigués par les eaux conventionnelles, IB varie entre 1,5 à 3,75 (Fig. 87). Parallèlement, l'IB estimé des sites non irrigués varie entre 2,39 et 2,5 (Fig. 87).

L'analyse des résultats consignés dans la figure n° 88 montre que ces eaux phréatiques sont riches en matière organique biodégradable. Nos résultats obtenus indiquent l'homogénéité de la biodégradabilité de l'amont à l'aval de la nappe phréatique dans la zone d'étude (Fig. 88). 72% des sites d'étude sont riches en matière organique facilement biodégradable, due à la nature des effluents d'origine domestique utilisés dans la zone. En revanche, aucune variation significative de l'IB n'est distinguée entre les différents piézomètres. Nos résultats se concordent à ceux déclarés par Djidel et al, (2008).

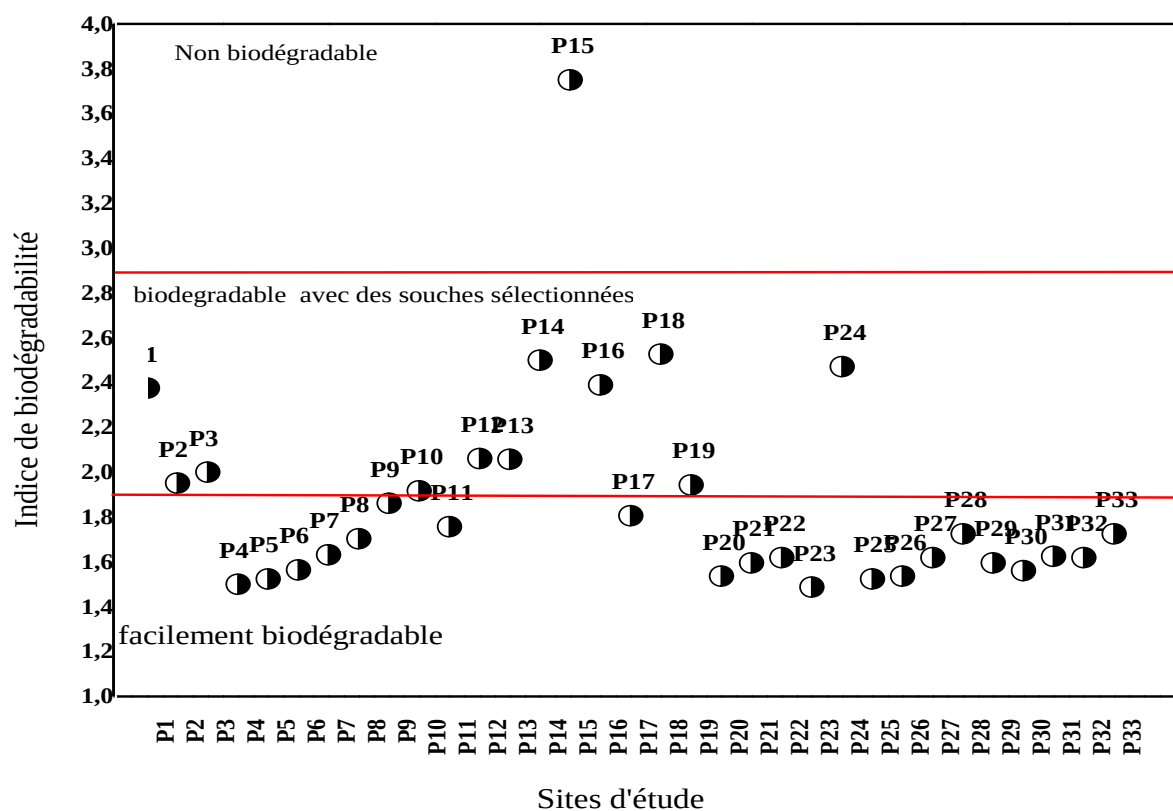


Figure 87. Variation d'indice de biodégradabilité des eaux phréatiques

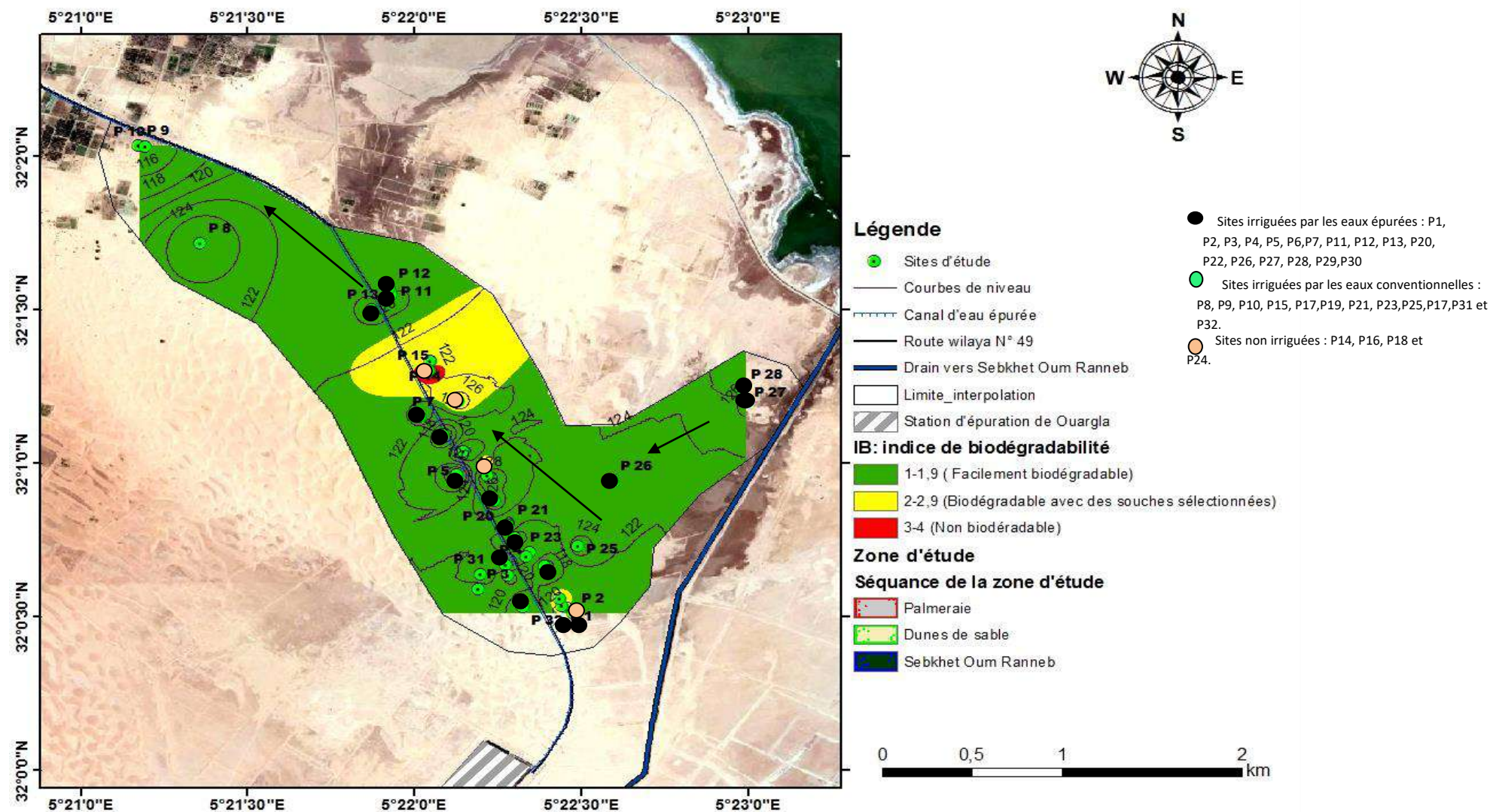


Figure 88. Variation spatiale de l'indice de biodégradabilité des eaux phréatique

2.12. Pollution en métaux lourds

Durant cette étude, quelques métaux lourds détectés au niveau des eaux d'irrigation ont été suivis (Fe, Cd, Co et Cr). Les teneurs en métaux lourds sont consignés dans le tableau XVI.

Tableau XII. Concentrations de quelques métaux lourds dans les eaux phréatiques

Sites d'étude	Mode de gestion	Fer (Fe)	Chrome (Cr)	Cobalt (Co)	Cadmium (Cd)
P3	EUE	0	0,02	0	0,127
P7	EUE	0,27	0	1,236	0,243
P11	EUE	0,132	0	1,458	0,185
P12	EUE	0,163	0	1,254	0,239
P8	EC	0	0,692	0,111	0,123
P9	EC	0,009	0	0,875	0,273
P10	EC	0,0014	0	0,662	0,169
P14	NC	0,25	0	1,75	0,299
P16	NC	0,348	0	1,846	0,296
P18	NC	0,157	0	1,325	0,354

EC : site non cultivé ; EC : site irriguée par les eaux conventionnelles ; EUE : Site irriguée par les eaux épurées

2.12.1. Fer

Dans le périmètre d'étude, les concentrations des eaux phréatiques en fer enregistrés fluctuent entre 0,0014 à 0,348 mg/l (Tabl. XII). Les valeurs de fer des sites irriguées par les eaux épurées varient entre absent 0 (P3) à 0,270mg/l (P7). Celles des sites irrigués par les eaux conventionnelles varient entre 0 (P8) à 0,009mg/l (P9). Concernant les sites non irrigués, les teneurs de fer varient entre 0,157 (P14) à 0,348mg/l (P16) (Tabl XVI). Nos résultats obtenus indiquent que dans la zone d'étude, les eaux phréatiques des sites non irriguées présentent les teneurs les plus élevés de fer, cela renseigne sur la charge initiative des eaux de la nappe superficielle. D'après Slimani (2006), les teneurs de fer des eaux phréatique à Ouargla fluctuent entre 0,120 à 0,767 mg/l.

2.12.2. Chrome

Les valeurs relatives à la teneur du chrome oscillent entre 0 à 0,692mg/l dans le périmètre d'étude. L'analyse des résultats consignés dans le tableau n° montre que l'élément chrome est presque absent dans les eaux phréatiques. Les concentrations détectées varient entre 0mg/l pour les sites P7, P11, P12, P9, P10, P14, P16, et P18. Parallèlement, des traces de chrome sont détectées au niveau P3 (0,02mg/l). En revanche, pour le site P8, des teneurs assez élevées en chrome sont détectées, estimées à 0,692mg/l (Tabl. XIII).

2.12.3. Cobalt

Les valeurs relatives à la teneur du cobalt évoluent entre 0 à 1,846mg/l dans le périmètre ciblé. L'analyse des résultats consignés dans le tableau n° montre que les teneurs de cobalt des sites irriguées par les eaux épurées varient entre 0 (P3) à 1,458mg/l (P11). Celles des sites irrigués par les eaux conventionnelles fluctuent entre 0,111 (P8) à 0,875mg/l (P9). Parallèlement, les concentrations les plus élevées sont détectées au niveau des sites non irrigués avec des teneurs de cobalt varient entre 1,325 (18) à 1,846mg/l (P16). Cela ne renseigne que le périmètre a été déjà polluée par le cobalt avant la pratique de réutilisation des eaux épurées.

2.12.4. Cadmium

Au niveau de la zone d'étude, les teneurs les plus élevées sont celle du cadmium. Ils varient de 0,123 mg/l à 0,354mg/l. Les résultats consignés dans le tableau n° XIV reflètent que les teneurs de cadmium des sites irriguées par les eaux épurées varient entre 0,127mg/l (P3) à 0,239mg/l (P12). Celles des sites irrigués par les eaux conventionnelles varient entre 0,123mg/l (P8) à 0,273mg/l (P9). Parallèlement, les concentrations les plus élevées de cadmium sont détectées au niveau des sites non irrigués, qui varient entre 0,296mg/l (16) à 0,354mg/l (P18) (tableau. XV). Ces teneurs plus au moins élevées de cadmium des eaux phréatique dans la zone d'étude est probablement liée à l'irrigation avec des eaux riches de cet élément (voir chapitre VII ; table. XIV). Dans le même axe d'étude, Slimani (2006), a déclaré que les teneurs des eaux phréatiques de Ouargla en cadmium varient entre 0,004mg/l à 0,023mg/l.

2.13. Microbiologie des eaux phréatiques

L'étude de degré de pollution microbiologique des eaux phréatique est évaluée par la recherche et le dénombrement des indicateurs de contamination fécale, notamment les coliformes et streptocoques fécaux. Deux campagnes d'analyse des paramètres bactériologiques sont réalisées durant cette étude, dont les résultats de concentrations moyennes des germes tests de contamination dans nappe phréatique des sont consignés dans les tableaux XVII et XVIII.

Tableau XVI. Densité bactérienne des eaux phréatique de la zone d'étude en Décembre 2018

Types de stations	Stations	Colif. T (germes/100ml)	Colif. F (germes/100ml)	Strept. T (germes/100ml)	Strept. F (germes/100ml)
Non irriguées	P14	11*10 ²	2,7*10 ²	7,5*10 ²	1,1*10 ²
	P16	9,3 *10 ²	2,5*10 ²	6,4*10 ²	0,92*10 ²
	P18	7,5 *10 ²	1,5*10 ²	3,8*10 ²	0,74*10 ²
Stations Irriguées par les eaux conventionnelles	P1	11*10 ²	6,4*10 ²	7,5*10 ²	2*10 ²
	P2	12*10 ²	7,5*10 ²	9,3*10 ²	3,4*10 ²
	P8	14*10 ²	11*10 ²	12*10 ²	4,3*10 ²
Irriguées par eaux usées épurées	P3	23*10 ²	11*10 ²	11*10 ²	3,8*10 ²
	P4	21*10 ²	9,3*10 ²	9,4*10 ²	3,6*10 ²
	P5	29*10 ²	16*10 ²	14*10 ²	6,4*10 ²

Tableau XVII. Densité bactérienne des eaux phréatique de la zone d'étude en Avril 2019

Types de stations	Station	Colif. T (germes/100ml)	Colif. F (germes/100ml)	Clostridium (germes/100ml)
Stations	P14	1,5*10 ²	0	0
Non irrigués	P16	1,4*10 ²	0	0
	P18	2,3*10 ²	0	0
Sites irrigués par les eaux conventionnelles	P1	2,8*10 ²	0	0
	P2	0,3 *10 ²	0	0
	P3	0,3*10 ²	0	0
	P4	2,4*10 ²	0	0
	P5	2,8*10 ²	0	0
	P6	2,4*10 ²	0	0
	P 7	2,3*10 ²	0	0
Sites irrigués par eaux usées épurées	P 11	2,3*10 ²	0	0
	P 12	29*10 ²	0	0
	P 13	4,3*10 ²	0	0

2.13.1. Coliformes totaux

La recherche et le dénombrement des germes des eaux phréatiques au niveau de notre zone d'étude montrent que la densité bactérienne des coliformes fécaux au niveau des sites non irrigués pour la première campagne d'analyse varient entre 11.10²

germes/100 ml (P14) à $7,5 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P18) (table. XVII), vers $1,4 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P16) à $2,3 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P18) pour la deuxième campagne d'analyse (table XVII). Celles des sites irrigués par les eaux conventionnelles, la concentration du même germe varient entre $11 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P1) à $14 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P8) pour la première campagne (table. XVII). On outre pour la deuxième campagne d'analyse, la concentration varie entre $0,3 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P2) à $2,8 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P5) (table. XVIII).

La numération des coliformes totaux (CT) pendant la première campagne d'analyse montre que les eaux des piézomètres situés au niveau des sites de réutilisation des eaux épurées renferment une concentration moyenne allée de $21 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P4) à $29 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P5) (table. XX). Celles de la deuxième campagne varient entre $2,3 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P11) à $29 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P12) (table. XVII).

2.13.2. Coliformes fécaux

Les résultats de dénombrement des coliformes thermo-tolérant sont consignés dans les tableaux XVII et XVIII. L'analyse des résultats la première campagne d'analyse (table XVII) découvre que la densité des coliformes fécaux au niveau des sites non irrigués oscille entre $1,5 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P18) à $2,7 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P14). Celles des sites irrigués par les eaux conventionnelles varie entre $6,4 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P1) à $11 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P8). Entre autres, les sites irrigués par les eaux usées épurées estiment des concentrations de même germe allant de $9,3 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P4) à $16 \cdot 10^2$ germes/100 ml (P5) (table. XVII).

Par ailleurs, les résultats d'analyse de même germe pendant la deuxième campagne d'analyse signalent l'absence totale des coliformes fécaux dans les eaux phréatiques dans le périmètre ciblé.

2.13.3. Streptocoques totaux

Une seule caractérisation des streptocoques totaux a été fait pendant cette étude, dont les résultats sont consignés dans le tableau n° XVII. La densité bactérienne de ce germe au niveau des eaux de la nappe des sites non irriguées varie entre $3,8 \cdot 10^2$ germes/100ml (P18) à $7,5 \cdot 10^2$ germes/100ml (P14). Parallèlement, celles des sites irrigués par les eaux conventionnelles fluctuent entre $7,5 \cdot 10^2$ germes/100ml (P1) à $12 \cdot 10^2$ germes/100ml (P8). Concernant les sites irrigués par les eaux usées épurées, la densité des

streptocoques totaux estimée varier entre $9,4 \cdot 10^2$ germes/100ml (P4) à $16 \cdot 10^2$ germes/100ml (P5).

2.13.4. Streptocoques fécaux

À l'égard des streptocoques totaux, les streptocoques fécaux sont caractérisés une seule fois pendant cette étude (Table. XVII). La densité bactérienne de ce germe au niveau des eaux de la nappe des sites non irrigués varie entre $0,74 \cdot 10^2$ germes/100ml (P18) à $1,1 \cdot 10^2$ germes/100ml (P14). Parallèlement, celles des sites irrigués par les eaux conventionnelles fluctuent entre $2 \cdot 10^2$ germes/100ml (P1) à $4,3 \cdot 10^2$ germes/100ml (P8). Concernant les sites irrigués par les eaux usées épurées, la densité des streptocoques fécaux estimée varier entre $3,6 \cdot 10^2$ germes/100ml (P4) à $6,4 \cdot 10^2$ germes/100ml (P5).

2.13.5. Clostridium sulfito-réducteurs

Concernant les Clostridium, nos résultats obtenus durant les deux campagnes d'analyse reflètent l'absence totale de ce germe dans les eaux phréatiques (table. XVII).

Les résultats des analyses microbiologiques mentionnées ci-dessus ont montré que les eaux phréatiques étudiées étaient toutes contaminées par la plupart des germes recherchés avec des différences de concentrations entre site témoins et les sites de réutilisation agricoles des eaux épurées. En revanche, la densité spécifique par site a montré que les stations non irriguées sont classifiées comme des eaux non polluées, par rapport aux normes, sauf pour la P1, pour la première campagne (table. XX), ceci peut être dû à sa situation proche d'une zone d'activité de réutilisation des eaux épurées, durant la période considérée. Concernant, le reste du périmètre, les sites irrigués par les eaux conventionnelles, ainsi que les sites irrigués par les eaux épurées, les résultats obtenus illustrent la variation spatiale de pollution microbiologique.

Nos résultats obtenus montrent que la concentration élevée des germes microbiens étudiés dans les différents piézomètres situés dans les sites de réutilisation agricole des eaux épurées pourrait s'expliquer par la qualité de ces dernières chargées en germes (Voir chapitre VII ; table. XIV), ainsi que la nature de sous-sols sablonneux qui facilite l'infiltration des eaux vers la nappe phréatique peu profonde (profondeurs dans la zone d'étude varie entre 0.5 m à 2 m). On y a signalé ci-dessus que la nappe phréatique de Ouargla est contenue dans les formations perméables sablo-gypseuses du Quaternaire. Hassane

(2010) ; Yapo et *al.*, (2010), ont indiqué que la contamination de la nappe phréatique dépend de la perméabilité du sol et de la profondeur de la nappe.

En revanche, cette aquifère superficielle héberge de fortes densités des germes considérés comme des indicateurs d'une contamination. D'après Bourgeois (1980), in Slimani (2006), le rapport Coliformes fécaux/Streptocoques fécaux peut nous donner une idée sur l'origine de la contamination (d'origine humaine ou animale), dont la prédominance des Coliformes fécaux par rapport aux Streptocoques fécaux c'est-à-dire que le rapport est supérieur à 1 peut traduire une contamination fécale d'origine humaine. Ce qui explique la contamination de ces eaux dû aux accumulations des eaux usées épurées.

Nos résultats obtenus sont concordés avec celles présentés par Slimani (2006), et Djidel (2008), les auteurs ont signalé que les eaux de la nappe phréatique de Ouargla présentent une forte contamination microbiologique dû aux rejets des eaux usées.

D'un autre côté, les résultats obtenus illustrent la variation temporelle de pollution microbiologique des sites étudiées, où on y noté la diminution de la charge microbienne des eaux phréatique suite au changement des eaux d'irrigation. Ceci est bien illustré pour les sites P3, P4, P5 (tables XVII et XVIII). Notamment pour le reste des sites d'étude.

Selon F.E.P.S. (2012), les sols ne sont pas efficaces à éliminer les contaminants, et les déchets domestiques et industriels peuvent dépasser la capacité du sol d'éliminer les produits chimiques et les contaminants. Quelques sols permettent l'eau de percoler rapidement jusqu'à l'aquifère. En générale, dans ce cas, moins des contaminants seront éliminé. Ce qui consolide nos résultats.

2.13.6. Indice de qualité microbiologique

Les coliformes et streptocoques fécaux sont des indicateurs de contamination fécale. Cela est évalué par l'indice de qualité microbiologique (MQI). L'analyse des résultats mentionnés par la figure n° 89 indique que l'MQI des sites non irriguées (P14, P16, P18), évalué à 3.66, ce qui reflète une faible pollution microbiologique selon l'échelle de classification de Bovesse et Depelchin, 1980 (Table. IX), alors que pour les sites irrigués par les eaux conventionnelles et les eaux non conventionnelles (P1, P2, P3, P4, P8), l'MQI varie entre 3 et 3,33, cela indique que les eaux phréatiques au niveau de ces sites présentent une pollution microbiologique modéré. Parallèlement, pour le site P5,

l'MQI évalué à 2,66, ce qui traduit une forte pollution microbiologique au niveau de ce site.

Dans le même sens d'étude, Djidel (2008), a signalé que les eaux phréatiques de la cuvette de Ouargla renferment une faible pollution microbiologique, ce qui confirme par nos résultats. En revanche, la réutilisation des eaux épurées en agriculture à favoriser l'augmentation de ce genre de pollution dans la zone d'étude.

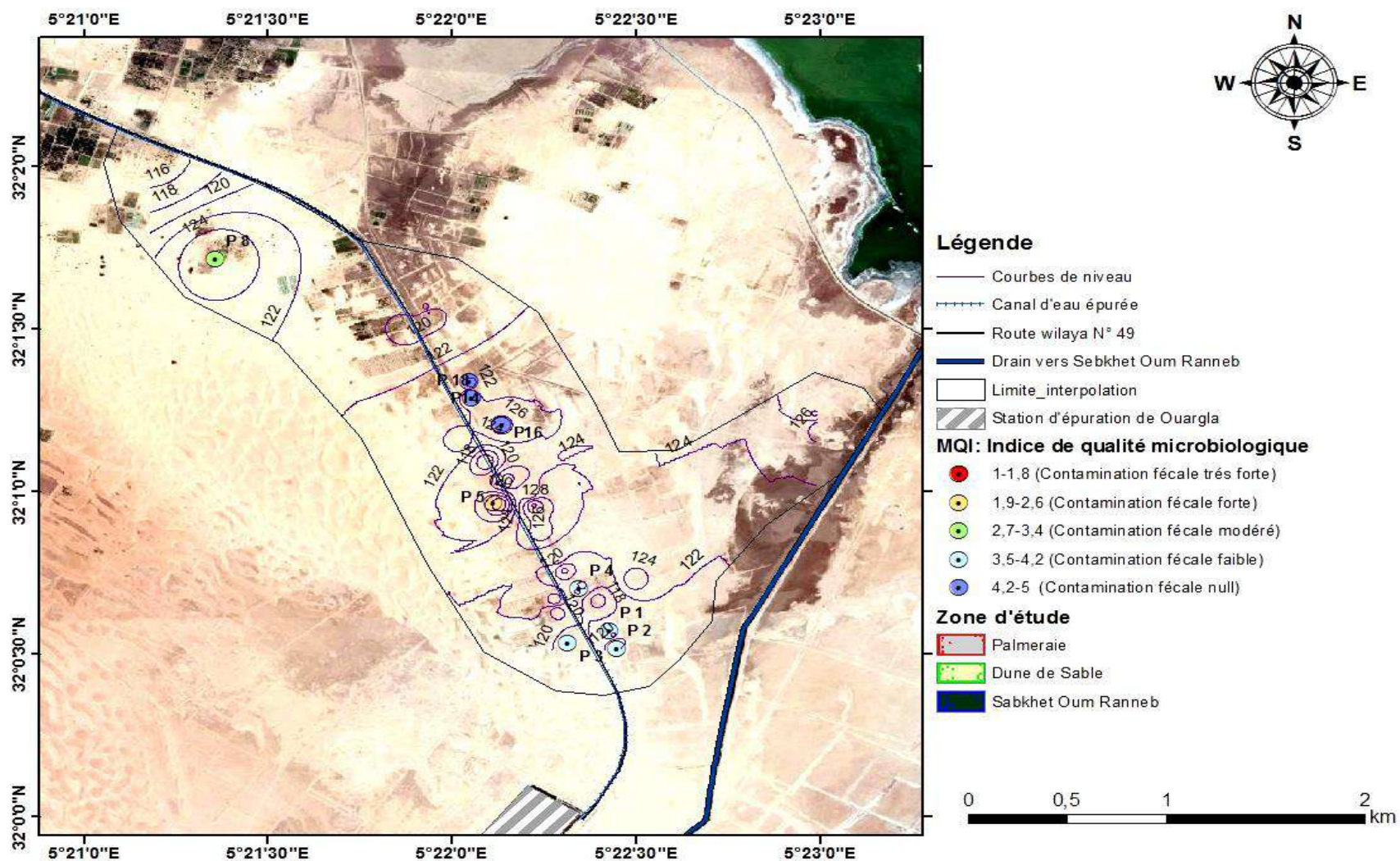


Figure 89. Variation spatiale d'indice de qualité microbiologique des eaux phréatiques

Conclusion

L'étude de l'impact des eaux usées épurées sur la nappe phréatique montre une remontée statique de niveau des eaux, cet effet physique est le résultat de l'irrigation qui apparaît clairement vers la fin de l'essai. Cette situation nous conduit à recommander une gestion de l'irrigation et un bio-drainage car la topographie de la zone ne permet pas l'installation d'un réseau de drainage efficace. Le niveau actuel des eaux risque de limiter l'enracinement par asphyxie.

L'effet physico-chimique de salinité et d'alcalinité des eaux épurées apparaît non significatif, toute fois l'excès de sels est l'alcalinité des eaux phréatiques peut être une source de stress pour les palmiers dattier qui va gêner probablement la nutrition minérale et produire des chutes de rendements.

La composition chimique des eaux phréatiques n'a guère changé significativement au cours de l'essai à l'exception pour quelques sites d'étude irriguées par les eaux épurées connue un recours vers l'irrigation conventionnelle. Toutefois, la variation des concentrations des phosphates au niveau des sites irrigués apparaît significative. Cela indique qu'il peut y avoir un risque de pollution phosphatée. De même, les concentrations ioniques des eaux phréatiques enregistrées peuvent produire une toxicité spécifique au contact racinaire notamment pour le sodium et le chlore, de la nécessité d'un bio-drainage en phœniciculture ou la plantation d'arbustes d'enracinement moins profond.

En revanche, nos résultats obtenus ont montré que l'irrigation par les eaux épurées favorise la pollution organique de la nappe phréatique et l'accumulation des germes microbiologiques fécales. Ce constat d'étude montre que l'utilisation des eaux épurées présente des risques de dégradation de nappe phréatique de type physique, chimique et biologique. Cela nous ramène à recommander une réglementation d'utilisation et un suivi rigoureux de la dégradation des eaux phréatiques afin de limiter les risques des volumes des eaux utilisées sur les superficies irriguées.

En fin, cette démarche proposée de gestion va permettre d'éviter la dégradation des eaux souterraines et la préservation de l'environnement des sites d'épandages.

Chapitre IX. Recommandations d'aménagements

Actuellement, il est répondu que l'agriculture est basée sur les ressources non renouvelables notamment les ressources en eaux non renouvelables. En fait, la création et le développement des projets agricoles durable nécessite la valorisation réfléchie de ces ressources.

La réutilisation des eaux usées épurées à des fins agricoles est une pratique très répandue à travers le monde. Nombreux pays considère ces eaux comme une source très intéressante spécifiquement en agriculture. En effet, ces eaux non conventionnelles restent peu utilisées à Ouargla.

Le développement de la pratique de réutilisation agricole des eaux usées épurées nécessite des études d'évaluation ainsi que l'intégration des différentes composantes multiples et complexes afin d'assurer leur durabilité. Des approches multisectorielles doivent être adaptées à fin d'aider les décideurs, les gestionnaires et les pouvoirs publique dans l'évaluation de la durabilité de ce type de projets, l'identification et la sélection des meilleures options à mettre en œuvre de réutilisation agricole des eaux usées épurées.

La réutilisation des eaux usées traités en agriculture soulève différents problèmes d'ordre agronomique et sanitaire. En effet, si cette ressource constitue un potentiel de matières fertilisantes azotées, phosphatées et potassiques, sa teneur en métaux lourds (ML) et certains agents pathogènes représente, néanmoins, des risques de contamination des sols et des nappes et des risques sanitaires pour l'homme et les animaux. Ces risques sont liés aux qualités physico-chimiques et microbiologiques des eaux usées épurées qui sont variables à cause de leur origine et mode d'épuration. Le développement et la durabilité de ce genre de projets requièrent des actions à échelle nationale et d'autre à échelle régional.

1. Actions à échelle national

Ce type des actions sera toucher le secteur organisationnel. En effet, la stratégie nationale algérienne de la gestion des ressources en eau en 2012, considère les eaux usées épurées comme source des eaux importante et réutilisables. En revanche, on y constater que ces instructions ne dépassent pas le papier. Il faut intégrer cette ressource des eaux non conventionnelle comme une source des eaux utilisable obligatoirement dans les plans nationaux de développement.

D'un autre côté, les études nationales et internationales ont toujours montré que la réutilisation des eaux épurées traités en irrigation ne peut se développer sans une forte subvention de la part de l'État. En effet, la création des comités interministériels où il faut

intégrer tous les acteurs de réutilisations agricoles des eaux épurées. Ces comités peuvent assurer les tâches suivantes :

- Promouvoir les projets de valorisation directe des EUT, après leurs évacuations par les stations d'épurations et renforcer les mécanismes de cette pratique, tout en intégrant les ministères concernés, notamment le ministère d'agriculture et le ministère des ressources en eau ;
- Renforcer le cadre réglementaire algérienne, tout en respectant les spécificités environnementales, sociales et régionales de chaque projet ;
- Créer un réseau numérique national de suivis des projets de réutilisation des eaux usées épurées. Leurs états, pratiques envisagés et rendements ;
- Créer des associations de sensibilisation des agriculteurs et de recommandations techniques à échelle rurale, régionale et nationale pour confirmer les avantages agricoles de la réutilisation ainsi que les précautions à mettre en œuvre, de ce fait l'élaboration des guides d'utilisation et de sensibilisation doit être vulgarisé ;
- Assurer la traçabilité des produits agricoles pour empêcher toute sorte de contamination possible et suivre régulièrement la qualité agro-alimentaire et bactériologique des produits agricoles commercialisés.
- En fin le principal rôle de ce comité est la transformation des idées et des grands principes de la réutilisation durable des eaux épurées en agriculture en solutions faisable techniquement, rentable économiquement, et acceptable socialement.

2. Actions à échelle régionale

La réutilisation des eaux usées épurées dans la cuvette de Ouargla est peu discutée, quoique nos résultats présentés à travers nos travaux même et d'autres travaux similaires restent initiaux. Il est souhaitable de poursuivre des études d'impacts temporelles des sols et les cultures sur des projets de REUE agricoles créés et suivis techniquement.

Les travaux de recherche scientifiques ont montré que l'irrigation pendant des longues périodes avec les eaux usées épurées peut provoquer des déséquilibres des agrosystèmes. Pour cela, il est souhaitable de réutiliser ces eaux avec précaution vu leur qualité physico-chimique chargée toute l'année. Il est souhaitable d'établir des calendriers de suivis des accumulations par site de salinisation des sols et ainsi que la qualité des eaux de nappes superficielles et souterraines.

Nos suivis de la qualité physico-chimique des eaux épurées évacuées par la station d'épuration de Ouargla ont montré que ces derniers restent de qualité médiocre. Pour cela, il faut compléter leurs traitements par des voies biologiques notamment la phyto-épuration.

Cette pratique a montré leurs effets positifs et leur pouvoir épuratrice importante. Cette action peut contribuer au renforcement des performances de traitement des eaux usées dans la Station d'épuration de Ouargla, ainsi que la diminution des risques de contamination des sols, des cultures et des eaux souterraines. Parallèlement, l'installation des projets de réutilisation agricoles des eaux épurées à Ouargla nécessite la mise en œuvre d'une stratégie multisectorielle, où les enjeux ci-dessous peuvent être appliqués.

La région d'étude nécessite l'identification des problèmes particuliers qui peuvent empêcher l'extension de cette pratique à savoir les conditions climatiques, les conditions topographiques et édaphiques. Le diagnostic et la résolution des problèmes liés à chaque catégorie peuvent faciliter la création des périmètres irrigués par les eaux non conventionnelles. D'un autre côté, l'installation des systèmes de réutilisation agricole à petite échelle pour les eaux épurées où en satisfaisant les besoins de quelques cultures adaptés en eau, ainsi que les besoins organiques et minéraux, tout en publiant les résultats de ces expériences. Cela peut encourager les agriculteurs à utiliser ces eaux.

La création des périmètres type de la réutilisation des eaux épurées à Ouargla permis à long terme de l'identification des conséquences de cette pratique sur l'environnement de la région ainsi que tracer les scénarios possibles de la REUE agricole sur le territoire de la cuvette, où en adhérant toutes les caractéristiques environnementales disponibles.

Toutefois, l'analyse économique de ce genre des projets est un pas important. Cette analyse économique est utilisée pour décider si un projet doit être mis en œuvre et pour déterminer s'il est économiquement justifié, c'est-à-dire, si les bénéfices dépassent les coûts. Les Analyses économique et financière sont deux étapes d'analyse d'un projet de réutilisation des eaux usées traitées. Elle cherche à identifier des mécanismes de financements adéquats tels-que les tarifs de l'eau adaptés et la mise en place de subventions par l'Etat aux agriculteurs utilisant ces eaux. Les projets agricoles bénéficiaires encouragent les agriculteurs.

Dans le même axe, pour assurer la durabilité des projets de réutilisation des eaux épurées à Ouargla, il est nécessaire d'appliquer rigoureusement quelques enjeux à savoir :

- Atténuer l'excès de fertilisants et l'excès de salinité des eaux épurées par le mélange de ces eaux avec les eaux conventionnelles, cela pouvant empêcher la dégradation du sol ou le dessèchement des cultures.
- Choix des espèces cultivées tolérantes et peu sensibles à la charge des eaux usées épurées (salinité, éléments fertilisants). Pour cela, on peut s'inspirer aux directives

de la F.A.O., de l'organisation mondiale de la santé et les directives de la république algérienne dans ces journaux officiels.

- Utilisation des méthodes et des systèmes d'irrigation les plus économes et adaptés, notamment les techniques d'irrigation souterraines et localisé.
- Ajustement des doses d'irrigation et des amendements aux besoins des cultures, en prenant en considération la valeur fertilisante des effluents. Il faut établir des calendriers d'irrigation pour suivre les quantités d'eau d'irrigation et les nutriments apportés par les eaux usées traitées. Il est indispensable de connaître que tout apport dépasse les besoins des cultures peut créer des problèmes environnementaux et/ou agronomiques ;
- Pratiquer le lessivage en irrigation pour réduire les accumulations des sels sur les sols cultivés. Toutefois, il faut contrôler les impacts de cette pratique sur les eaux de nappe pour enrayer les risques de pollution ;
- Suivre les dégâts au niveau des feuilles, des brûlures ou absorptions foliaires de sel peuvent se produire, surtout si le temps est chaud et sec.

En fin, Pour une valorisation raisonnée des eaux usées épurées, aucune solution unique d'outil n'existe, mais un ensemble d'outils complémentaires choisis et combinés en fonction du contexte et des objectifs, ça va permettre une évaluation sur le plan économique, environnementale et sociale. Ce toute à fais correcte dans la région de Ouargla, dont notre pays, la création de vrais projets de valorisation des eaux usées épurées et pour face aux contraintes de la réutilisation de ces eaux, l'intervention de tous les acteurs concernés à plusieurs niveaux est nécessaire.

3. Perspectives de recherches

Le rôle des chercheurs pour améliorer les pratiques de l'agriculture par irrigation avec les eaux usées épurées est accru. Les scientifiques et les chercheurs doivent étudier les meilleures pratiques agricoles et diffuser cette information sous une forme compréhensible à tous les différents groupes de la société (décideurs, agriculteurs et consommateurs). La recherche scientifique intervient à tous les niveaux dans les projets de valorisation des eaux usées épurées de la réglementation jusqu'à la commercialisation des produits.

La réglementation algérienne est incomplète, car toutes les normes sont inadaptées aux contextes des régions sahariennes. Les réglementations et les nomes sont peu flexibles et toujours calquées sur les normes internationales qui sont réalisées dans des contextes

environnementaux différents. Il faut améliorer les normes algériennes à travers des études poussées. Simultanément, il faut poursuivre par des études d'amélioration de la qualité physicochimique, identification et classification parasitologique des eaux épurées évacuées vers les exutoires, notamment les effluents évacués par la station d'épuration de Ouargla.

Néanmoins, il faut développer des recherches sur la biologie du sol irriguées par les eaux traitées ainsi que la variation spatio-temporelle des accumulations de sels, des éléments fertilisants et des métaux lourds dans les sols et les cultures. Toutefois, des études d'évaluation de l'impact de l'irrigation par les eaux épurées sur les cultures et les rendements, notamment leurs comportements vis à vis de la salinité et de la fertilité des eaux épurées, ainsi que les risques de contamination microbienne.

Faires des études épidémiologiques soigneusement conçues concernant l'exposition et les impacts sur la santé de la population exposée, les usagers de l'eau épurée, exploitants agricoles, collectivités locales à proximité des sites d'épandage.



Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de ce travail de recherche, il ressort que les eaux usées épurées sont utilisées dans un seul périmètre agricole de façon illégale mais tolérée au niveau de la région de Ouargla. Néanmoins, cette tentative de réutilisation de ces eaux non conventionnelles en agriculture est encourageante mais nécessite des suivis et des études plus approfondies.

D'après nos enquêtes réalisées au niveau de la zone d'étude, les eaux usées traitées sont utilisées anarchiquement, sans précaution et sans règles de réutilisation préconisée par l'O.M.S., la F.A.O et la réglementation algérienne. Il apparaît de notre approche d'investigation que les eaux traitées de la station d'épuration (STEP) de Ouargla sont rejetés vers Sebkhet Sefioune sans aucune planification de réutilisation agricole organisés par les structures hydro-agricoles concernées. Les agriculteurs ont utilisé les eaux épurées suite au déficit hydrique et par manque de moyens de réalisation des forages individuels. De plus, l'administration n'intervient jamais dans aucun processus d'orientation des agriculteurs pour une réutilisation agricole des eaux épurées structurés en phœniciculture et en cultures fourragères.

D'autre part, l'irrigation par submersion pratiquée au niveau des exploitations phœnicicoles dans la zone d'étude peut contribuer à l'entraînement des polluants vers le sous-sol déjà sablonneux et perméable et par conséquent atteindre la nappe phréatique notamment au niveau des sites irrigués par les eaux épurées. Pour cela, l'utilisation des systèmes d'irrigation localisée à économie d'eau est bien conseillée. Nos investigations de terrain ont montré que les eaux conventionnelles permettent l'installation des palmeraies phœnicicoles variées, bien entretenues et organisées par rapport à celles irriguées avec les eaux non conventionnelles.

La station d'épuration de Ouargla effectue des contrôles analytiques sur les eaux épurées de nature physico-chimique et chimique, sans analyse microbiologique. Nos résultats obtenus indiquent que dans la zone d'étude les eaux d'irrigation épurées et conventionnelles sont de mauvaise qualité par rapport aux normes d'irrigation. Elles présentent une salinité et sodicité excessive, pH légèrement alcalins à alcalins. Aussi, les eaux présentent des teneurs élevées en ions toxiques de sodium et de chlorure. Ses caractéristiques hydriques peuvent causer des problèmes assez sévères au niveau des sols et des plantes, autrement dit des risques de salinisation, sodisation et d'alcalinisation des sols. Pour cela l'irrigation par ces eaux doit être pratiquée avec prudence.

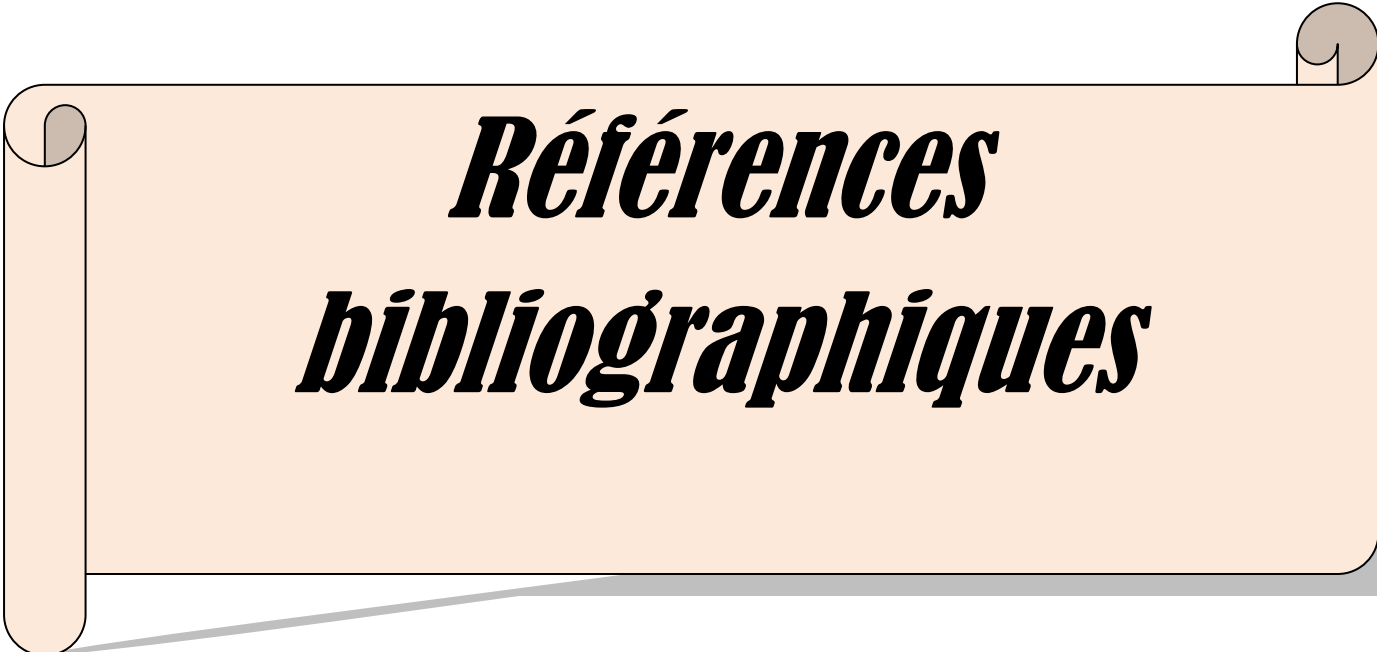
Le faciès chimique des eaux conventionnelles est équilibré. Toutefois, celle des eaux usées épurées est chlorurée sodique. Parallèlement, les eaux épurées présentent des teneurs élevées en nitrates, phosphore et en cadmium. Aussi, l'analyse de ses eaux a montré une pollution bactériologique qui nécessite l'amélioration du procédé de traitement par des voies biologiques complémentaires. Il ressort que la réutilisation de ces eaux, après amélioration microbiologique et chimique, doit être conforme aux normes de qualité, notamment celles de l'OMS et la réglementation algérienne. Toutefois, nous avons constaté que la réglementation algérienne reste à amender, étant donné que toutes les normes sont inadaptées aux contextes environnementaux fragiles des régions sahariennes. Pour cela, l'amélioration des normes algériennes de la réutilisation agricole des eaux épurées à travers des études poussées est nécessaire.

Cependant d'après nos résultats, il apparaît que les eaux usées épurées présentent des effets physiques, physico-chimiques, chimiques, et biologiques sur la nappe phréatique. La réutilisation des eaux a produit une remontée statique dans les niveaux des eaux d'un moyen de 10cm, cet effet physique dans la zone d'étude est le résultat de l'irrigation. Aussi, à cause de l'absence de drainage agricole. Cela va avoir fort probablement des conséquences graves sur l'hydro-halomorphie des sols et constituer un stress hydrosalin aux cultures et gêner l'enracinement du palmier dattier. A ce niveau, il est recommandé d'améliorer la gestion de l'irrigation au niveau des exploitations agricoles et de promouvoir bio-drainage vu que la topographie de la zone d'étude est défavorable au drainage des eaux. Il est nécessaire d'adapter les cultures aux conditions actuelles par la plantation d'arbustes d'enracinement moins profond.

Parallèlement, l'effet physico-chimique de salinité, de sodicité et d'alcalinité des eaux épurées apparaît non significatif sur la nappe phréatique. Toutefois, l'excès des ions toxiques de ces derniers va fort probablement constituer un risque de stress pour les cultures, notamment le palmier dattier. Également, les eaux épurées ont contaminé chimiquement les eaux phréatiques à travers l'augmentation significativement des concentrations de phosphates (0,28mg/l) et de cadmium (0,27mg/l) au niveau des sites irrigués. Cela indique qu'il peut y avoir un risque de pollution minérale au niveau de ces sites. D'autre part, nos résultats ont montré que l'utilisation des eaux épurées présente des risques de dégradation de nappe phréatique par la favorisation de la pollution organique et l'accumulation des germes microbiologiques fécaux (29.10^2 germes/100ml).

D'ailleurs, il est très important de signaler qu'un projet de valorisation agricole des eaux usées traitées à Ouargla doit prendre en considération, en plus de toutes les contraintes amarrées à l'eau non conventionnelle en milieu aride défavorable, le contexte social, culturel et économique de la société locale. Cela nécessite l'intégration de tous les acteurs hydro-agricoles notamment l'université pour la mise en évidence des stratégies de gestion de cette pratique difficilement soutenue dans la région. Il est essentiel de faire des études poussées concernant les impacts agro-environnementaux et socio-économiques, où les plus courants sont l'étude de comportement et la contamination des cultures, des sols et des nappes sous un système d'irrigation par les eaux épurées. Pour cela, il faut se stimuler par les expériences des autres pays notamment les pays voisins qui sont très avancés dans cette thématique.

Enfin, à l'issue de ce constat de recherche, la gestion sûre, rationnelle et légale des eaux non conventionnelles s'avère nécessaire à Ouargla et dans tous projets de développement durable de l'agriculture saharienne. La réutilisation de ces eaux en irrigation est à promouvoir. Elle va permettre la valorisation des ressources hydriques et limiter le gaspillage des eaux conventionnelles, notamment souterrains fossiles, et de maintenir ainsi l'équilibre hydrique dans les écosystèmes sahariens assez fragiles.



Références bibliographiques

Références bibliographiques

A.N.R.H., 1994. Ressources et qualité chimique des eaux dans la cuvette de Ouargla. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Direction régionale Sud, Ouargla. 50p.

A.N.R.H., 2000. Note relative à la remontée des eaux dans la cuvette de Ouargla. Rapport Abdellah. Alger. 102p.

A.N.R.H., 2010-2014. Bulletin de la qualité chimique des eaux souterraines dans la cuvette de Ouargla. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Direction régionale Sud, Ouargla. 10p.

Abbou S., 2010. La réutilisation des eaux usées épurées. Centre de formation aux métiers d'assainissement. Ed. Office National d'Assainissement de Saida. 52p.

Ahoussi Kouassi E ; Koffi YB ; Kouassi AM ; Soro G et Biemi J. 2013. Etude hydrochimique et microbiologique de eaux de source de l'ouest motagneux de la cote d'Ivoire : cas du village de Mongouin-Yrongouin (sous- préfecture de Biankouman). Appel Biosci. Pp 4703-4717. Disponible on www.m.elewa.org.

Aissani B, Boutrika R, Nezli I E, Oubira S, Aboub K. 2013. Contribution à l'étude hydrogéochimique des eaux et des formations de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla – Algérie. Le Séminaire International sur L'Hydrogéologie et l'Environnement 5 - 7 Novembre 2013, Ouargla (Algérie). 4p.

Aissata B H.2010. Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : Cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER). Hydrologie. Université Abdou Moumouni thèse de doctorat. 250p.

Aït Boughrous A., 2007. Biodiversité, écologie et qualité des eaux souterraines de deux régions arides du Maroc : le Tafilalet et la région de Marrakech. Thèse de doct. Sciences et Techniques des eaux. Hydrobiologie souterraine. Université Cadi Ayyad Marrakech. 207p.

Albinet M., Margat J., 1975. Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. Proceedings of the Moscow Symposium, August 1971 ; Actes du Colloque de Moscou, Groundwater Pollution - Symposium - Pollution des Eaux Souterraines. IAHS-AISH No. 103. pp 59-70.

A.D.E (Algérienne Des Eaux). 2012. Guide des analyses physico-chimiques des eaux. ADE. 30p.

Aliev M., (1972). Structures géologiques et perspectives en pétrole et en gaz au Sahara algérien. (Tome 1) SONATRACH -Alger, 275p.

Amir S., 2005. Contribution à la valorisation de boues de stations d'épuration par compostage : devenir des micropolluants métalliques et organiques et bilan humique du compost. Th. Doc., Ins. Nati. poly de Toulouse. 341p.

Bahroun S., Kherici B H. 2011. Évaluation de l'indice de pollution organique dans les eaux naturelles cas de la région d'el Tarf (Nord-est Algérien). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, N° 09. pp 171-178.

Banque mondiale. 2012. Rapport sur le développement de l'Afrique 2012 ; vue une croissance verte en Afrique. Ed BAFD (la banque africaine de développement). 190p.

Barbier J M., 2000. Evolution des consommations d'eau in T.S.M. Revue de l'AGHTM. n°2 . 6pp.

Baumont S., Camard J.P., Lefranc A et Franconi A., 2004. Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France. Rapport ORS (Observatoire régional de santé d'Île-de-France), France. 150p.

Beauchamp J. 2006. Les Systèmes aquifères. Document de synthèse de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie. France. 52p.

Beupoil A., Le borgne C., Moussa Atto A., Mucig C Roux A., 2010. Risque sanitaires de réutilisation des usées traitées pour l'aéro-aspiration des espaces verts. IGS. PERSAN. Ecole des Hautes Etudes en Santé Publique (EHESP). 63p.

Bel et Demargne. 1961. Etude géologique du continental terminal. Dossier de la Direction de l'énergie et des Carburants (Ministère de l'Industrie et de l'Energie). Alger, 22p, 24 pi.

Belaid N., 2010. Evaluation des impacts de l'irrigation par les eaux usées traitées sur les plantes et les sols du périmètre irrigué d'El Hajeb Sfax : salinisation accumulation et phytoabsorption des éléments métalliques. Th. Doc. Éco. Nation. Ingé. Sfax. Tunis. 236p.

Belghiti et al, 2013 Belghiti M L., Chahlaoui A., Bengoumi D., EL Moustaine R. 2013. Etude de la qualite physico-chimique et Bacteriologique des eaux souterraines de la Nappe plio-quatenaire dans la région de meknès (MAROC). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, N°14. pp. 21-36.

Benabdallah S., Neubert S., 2003. La réutilisation des eaux usées traitées en Tunisie. German Development Institute (DIE). Bonn. Germany. 96p.

Benajiba M H, Saoud Y, Lamribah A, Ahrikat M, Amajoud N, Ouled-Zian O. 2013. Evaluation de la qualite microbienne des eaux de la nappe phréatique de Martil au Maroc. Revue des sciences de l'eau. Vol 26 n° 3. pp 223-233.

Berdai H., Benchokroun T., El hamouri B., 2004. Epuration et réutilisation des eaux usées à des fins agricoles (Expérience Ouarzazate). Revue H.T.E. N° 129 - Juin 2004. pp 30-41.

Berkal I., 2006. Contribution à la connaissance des sols du Sahara d'Algérie. Mémoire Magistère. INA Alger. 112p.

Berkal I., 2016. Dynamique spatiotemporelle de la salinité de sols sableux irrigués en milieu aride, application a une palmeraie de la cuvette de Ouargla en Algérie. Thèse Doctorat. ENSA Alger. 180p.

Beuf S., Biju-Duval B., De Charpal D., Rognon R. et Bennacef A., 1971. Les grès du Paléozoïque inférieur au Sahara. Sédimentation et discontinuité : évolution structurale d'un craton. Institut Français du Pétrole. Collection Sciences et Techniques du Pétrole, 18, Eds Technip. Paris, 464p.

Bonnard et Gardel (2001). Vallée d'Ouargla. Etudes d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation. Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Mission IA Reconnaissances et diagnostic de l'assainissement, 156p.

Bonard et Gardel. 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 volet étude d'impact sur l'environnement mission IIB : collecte et analyse des données. Ed. Lausanne. 42p.

Bonard et Gardel. 2004. La Vallée de Ouargla. Etudes d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. « Investigations, essais de pompage et bilans d'eau, établissement des cartes piézométriques, diagnostic des captages d'eau et mesures de réhabilitation, de protection des ressources en eau ». Mission II, Rapport final, 110 p.

Bouhanna, 2014. Gestion des produits d'épuration des eaux usées de la cuvette de Ouargla et perspectives de leurs valorisations en agronomie saharienne. Mémoire de Magister. Université Kasdi Merbah de Ouargla. 177 pp.

Bouhanna A., Daddi Bouhoun M., Saker ML., 2015. Situation de la réutilisation des eaux usées épurées en agriculture saharienne : cas de la cuvette de Ouargla Algerian journal of arid environment 46 vol. 5, n° 2, Décembre 2015. pp 38-49.

Bouhanna A., Daddi Bouhoun M., Idder T. 2019. Impacts of treated wastewater on the halomorphic phoenicultural environment in ouargla basin (Northern algerian sahara). International Journal of Sciences and Research, Ponte.2019. Vol. 75 | No. 7/1. Pp 13-23.

Boutelli MH., 2011. Salinité des eaux et des sols au niveau de la Sebkha de Bamendil, caractérisation et conséquences sur l'environnement. Mémoire Magister. Univ. Kasdi Merbah- Ouargla. 113p.

Boutin C., Heduit A., Michel H., 2009. Technologies d'épuration en vue d'une réutilisation des eaux usées traitées (REUE) rapport finale. Ed. ONEMA-CEMAGREF. 100p.

Boutmedjet A., 2004. La valorisation des boues résiduaires urbaines en plantation forestière dans les zones arides. Mém. Magister. Univ. Kasdi Merbah- Ouargla. 117 p.

Bouziani M., 2000. L'eau de la pénurie aux maladies. Ed. Ibn Khaldoun Oran. 117p.

Bradford M A., Davies Frey S., Maddox T., Melillo J., Mohan J., Reynolds JE., Treseder KK., Wallenstein MD., 2008. Thermal adaptation of soil microbial

respiration to elevated temperature. *Ecology Letters*. Vol 11, Issue12. pp 1316-1327.

BRL-BNEDER (1999). Etude du plan directeur générale de développement des régions sahariennes. Lot 1. Etude de base. Phase II A3. Monographies spécialisées des ressources naturelles. Ressources en eau, Vol. 3. Modélisation du Complexe Terminal. 63p.

Bureau de recherches géologiques et minières (B.R.G.M). 2011. Les eaux souterraines. Le projet européenne Water et territoire (WAT). France. 8p.

Busson G., 1970. Le Mésozoïque saharien. Essai de synthèse des données des sondages Algéro-Tunisiens. C.N.R.S-CRZAS. Géol., 11, 788p.

Candela L., Fabregat S., Josa A. 2004. Treated urban wastewater reuse for irrigation of a golf course and impacts on soil and groundwater. *Wastewater-Re-use and groundwater quality IUGC*. pp 40-46.

Castany G. 1978. Protection des eaux souterraines contre les pollutions. S.H.F, XVème journée de l'hydraulique, rapport générale, question III. Toulouse. 10p.

Castany G., 1982. Principes et méthodes de l'Hydrogéologie. Ed. Dunod. Paris, 236p.

CEAEQ (Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec)., 2014. Méthodes d'analyse Détermination de la demande biochimique en oxygène - méthode électro métrique. Révision 3. 11pp.

Chachoua B., 2008. Contribution à l'étude de la remontée des eaux de la nappe phréatique dans la région de Ouargla « modélisation hydrodynamique de la remontée. Mém. Magister. Univ. KASDI Merbah Ouargla. 78p.

Chalbaoui M., 2000. Vulnérabilité des nappes superficielles et subaffleurantes de Sud-Ouest tunisien. *Sécheresse*. 11(2). pp85-91.

Chartzoulakisa K., Bertaki M., 2015. The Effects of Irrigation and Drainage on Rural and Urban Landscapes, Patras, Greece. sustainable water management in agriculture under climate change. Elsevier agriculture and Agricultural Science Procedia 4. pp 88 – 98

Cheverry C., 1972. Exemple d'application des travaux de l'U.S. Salinity laboratory (1963-1968) sur l'alcalinisation des sols soumis à l'action d'eaux bicarbonatées. *Cah. O.R.S.T.O.M. Séri. Pédol*, 10 (2). pp 193-203.

Chippaux J-P., Houssier S., Gross P., Bouvier C., Brissaud F., 2002. Étude de la pollution de l'eau souterraine de la ville de Niamey, Niger. *Bull Soc Pathol Exot* N° (94) 2. pp119- 123.

Choisenel E., 1998. Traité d'irrigation. Les besoins en eaux des cultures : analyse et application. Approche agrométéorologique du conseil à l'irrigation. Coordonnateur Triecelin JR. Ed. LNDRES NEW YORK. PARIS. pp 158- 172.

Choukr-Allah R., Aghai O., 2005. Impact de l'irrigation par les eaux usées épurées sur la productivité d'une culture de tomate de plein champ, la salinité du sol et le

bilan d'azote The use of non-conventional water resources. Options Méditerranéennes. Séri A. Séminaires Méditerranéens n°66. Ed. CIHEAM / EU DG Research. pp 165-171.

Condom N., Lefebvre M., Vandome L., 2012. La réutilisation des eaux usées traitées en Méditerranée : retour d'expériences et aide à l'élaboration de projets. Plan Bleu, Valbonne. Les Cahiers du Plan Bleu 11). Ed. Centre d'activités régionales du PNUE/PAM avec la Banque européenne d'investissement et l'Agence Française de développement. 67p.

Cornet A., Gouskov N., 1952. Les eaux du crétacé inférieur continentale dans le Sahara algérien (nappe dite albiennaise). In la géologie et les problèmes de l'eau en Algérie, T.II : données sur l'hydrogéologie algérienne, XIXème congrès géologique international. Alger. 30p.

Cornet A., (1964). Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Géographie Physique et Géologie Dynamique Vol.VI. fasc.5-72 pp.

Cosandey C., Bigot S., Laganier R et Salvador P., 2003 - Les eaux courantes, géographie et environnement, Ed, BELIN, Paris, 233p.

Cote M., 1998. Des oasis malades de trop d'eau. Sécheresse vol. 9, n° 2. pp 123-130.

Daddi Bouhoun M., 1997. Contribution à l'étude de l'évolution de la salinité des sols et des eaux d'une région saharienne : cas du M'Zab. Mém. Magister. I.N.A. El-Harrach. 180p.

Daddi Bouhoun M., 2010. Contribution à l'étude de l'impact de la nappe phréatique et des accumulations gypso-salines sur l'enracinement et la nutrition du palmier dattier dans la cuvette de Ouargla (sud est algérien). Thèse de doctorat. Université de Badji Mokhtar. Annaba. 393p.

Daoud Y., et Halitim A., 1994. Irrigation et salinisation au Sahara algérien, sécheresse N°3.Vol 5. pp151-160.

Degbey C., Makoutode M., Ouendo E M., DE Brouwer C., 2010. Pollution physico-chimique et microbiologique de l'eau des puits dans la Commune d'Abomey-Calavi au Bénin en 2009. Int. J. Biol. Chem. Sci. 4(6) : pp 2257-2271.

Degrement M., 2005. Mémento technique de l'eau. Tome 1. Ed10^{ème}.466p.

Der Hok W V., 2007. A Framework for a Global Assessment of the Extent of Wastewater Irrigation: The Need for a Common Wastewater Typology. Wastewater Use in Irrigated Agriculture coordinating the Livelihood and Environmental Realities. Eds. CAB Inter. Inter Water Management Institute, and Inter. Devel. Research Centre. pp 16-29.

Derradji F., Bousnoubra H., Kherici N., Romeo M., Caruba R., 2007. Impact de la pollution organique sur la qualité des eaux superficielles dans le Nord-Est algérien. Sécheresse N° 18 (1). pp 7-23.

Dib I, 2009. L'impact de l'activité agricole et urbaine sur la qualité des eaux souterraines de la plaine de Gadaïne- Ain Yaghout (Est Algérien). Mém magister. Université Hadj Lakhdar Batna. 127 p.

Direction de la Mobilisation des Ressources en Eau (M.R.E.). 2018. Rapport de Bilan Semestriel 2018. Alger. 66p.

D.P.A.T (Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire). 2012. Annuaire statistique de la wilaya de Ouargla. 197p.

D.P.A.T (Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire). 2018. Annuaire statistique de la wilaya de Ouargla. 200p.

D.P.A.T (Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire). 2019. Annuaire statistique de la wilaya de Ouargla. 193p

Djidel M., 2008. Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla (Sahara septentrional, Algérie). Thèse doct. Université de BadjiMoukhtar Annaba. 164p.

Djidel M., Bousnoubra-Kherici H., Kherici and N Nezli I. 2008; Alteration of the Aquifer Water in Hyperarid Climate, by Wastewater: Cases of Groundwater from Ouargla (Northern Sahara, Algeria). American Journal of Environmental Sciences 4 (6).pp 569-575.

Doorenbos J., Pruitt WO., 1975. Bulletin d'irrigation et drainage N° 24 : les besoins en eaux des cultures. Edition Organisation des Nations pour l'Alimentation et l'Agriculture. ROME. 198p.

Dubief J., 1963. Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. S.E.S., Alger, 457p. Dubief J., 1963. - Le climat du Sahara (the Sahara climate). Mém. Hors-série, Inst. Rech. Sah. Algérie, Tome 2, Algeries, 275 p.

Dubost D., 2002. Écologie, Aménagement et Développement Agricole des Oasis Algériennes. Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides Biskra, 207-215 pp.

Dufour PH., 1982. Influence des conditions de milieu sur la biodégradation des matières organiques dans une lagune tropicale. Article Scientifique, vol.5.9pp.

Durand JH., 1983. Les sols irrigables : Étude pédologique. Presse Universitaire de France. Collection. Ed, ACCT et CILF. Paris. 339p.

Dutil P., 1971. Contribution à l'étude des sols et des paléosols sahariens. Thèse d'état de l'Université de Starsbourg, 345 p.

Edmonds W.J., Thomas P.J., Simpson T.W., Baker J.C., 1998 - Land judging and soil evaluation. Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 26 p.

EL Asslouj J., Kholtei S., EL Amrani-Paaza N., Hilali A. 2007. Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc). Revue des sciences de l'eau. Vol. 20, n° 3. pp 309-321.

EL Bouqdaoui K., Aachib M., Blaghen M., Kholtei M., 2009. Modélisation de la pollution par les nitrates de la nappe de Berrechid, au Maroc Afrique SCIENCE 05(1). pp 99 – 113.

F.A.O., 1976. Directives de la qualité d'une eau d'irrigation, bulletin N° 29, Rome, 81p.

F.A.O., 1997. Irrigation Potential in Africa: A Basin Approach. Dans: FAO Land and Water Bulletin, Vol. 4. Rome. 60p.

F.A.O., 2003. Irrigation avec les eaux usées traitées. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. Bureau Régional pour le Proche Orient et Bureau sous régional pour l'Afrique du Nord. 73 p.

F.A.O., 2012. Gestion des ressources naturelles. Traitement des eaux usées et l'utilisation dans l'agriculture. corporate document repository 153p. In : <http://www.fao.org/docrep/t0551e/t0551e01.htm> 15.07.2012.

Fabre J., 1976. Introduction à la géologie du Sahara algérien et les régions arides. Ed SNED. Alger. 450p.

Fondation de l'Eau Potable Sûre (F.E.P.S. 2012). Les eaux Souterraines. Document de synthèse Ed F.E.P.S. 8p in www.safewater.org.

Frank F., 2002. Analyse des eaux, Aspects réglementaires et techniques. Edition Scérén CRDP Aquitaine. Bordeaux, pp165-239.

Gaucher G., Burdin S., 1974. Géologie, géomorphologie et hydrologie des terrains salés. Press universitaires de France. 230p.

Gouaidia L., 2008. Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana Nord-Est Algerien. Thèse doct. Université de Badji Moukhtar Annaba. 130p.

Gousskov N., 1952. Le problème hydrogéologique du bassin artésien de l'Oued Righ. In la géologie et les problèmes de l'eau en algérie, TII. Données sur l'hydrogéologie algérienne, XIXème congrès international. Alger. 16p.

Guendouz A., Reghis Z., et Moulla A.S., 1992. Etude hydro chimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla. Rapport N° 1,65p.

Halillet MT., 1993. Étude de la fertilisation azotée et potassique sur le blé dur (variété al dura) en zones sahariennes (région de Ouargla). Thèse magistère. Université Batna.

Hamar Y., 2018. Recherches sur les possibilités de mobilisation et de réutilisation des ressources en eau non conventionnelles : cas station d'épuration (STEP) Annaba projet Quantification et mobilisation des ressources en eau non conventionnelles. Document de synthèse Ressources en eau. Université Annaba. p29.

Hamdi-Aïssa B., Fedoroff N., 1997. Salt affected soil functioning at the Ouargla oasis (Northern Sahara, Algeria). In: International Symposium on

Sustainable Management of salt affected Soils ISSS-FAO, Cairo. (ed. El-Gala, A., & Blum, W.E.H.), pp. 153-154.

Hamdi-Aïssa B. 2000. Evaluation de l'état de surface de la cuvette d'Ouargla par les images satellites. *Revue SECHERESSE*, 12 p.

Hamdi-Aïssa B et Girard MC., 2000. Utilisation de la télédétection en régions sahariennes, pour l'analyse et l'extrapolation spatiale des pédo-paysages. *Science ET changements planétaires. Sécheresse*. Volume 11. Numéro 03. Pp179-188.

Hamdi-Aïssa B. 2001. Le fonctionnement actuel et passé de sols du Nord-Sahara (Cuvette de Ouargla). Approches micro-morphologique, géochimique, minéralogique et organisation spatiale. Thèse de Doctorat, Institut National Agronomique, Paris-Grignon, 283p.

Hamdi-Aïssa, B., Valles V., Aventurier A., Ribolzi O., 2004.- Soils and brines geochemistry and mineralogy of hyper arid desert playa, Ouargla basin, Algerian Sahara. *Arid Land Research and Management*, (18). pp 103-126.

Hami M; Gueraoui K; Hammoumi A; EL Hatri M; Kerroum M; Zeggwagh G. 1996. Modélisation et étude numérique de la pollution de la nappe phréatique. *Actes Inst Agron. Veto*. Vol. 16 (4). pp55-60.

Hannachi A., Gharzouli R., Djellouli Tabet Y., 2013 : Gestion et valorisation des eaux usées en Algérie. *Larhyss Journal*, vol..19 .14pp.

Hazan R., 1996. Relation entre l'action thermique influant sur les eaux des nappes et leur salinité. *Service des Ressources en Eau. MAROC*. pp 118-124 disponible in: ks360352.kimsufi.com/redbooks/a064/064012.pdf .2014/01/24

Hubiche J., 2002. L'enivrement humain-des usages traditionnels aux nouvelles pratiques les prélèvements et rejets d'eau. Document de synthèse. 8pp.

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 technique de remédiation proposées. L'exemple de Ouargla. Thèse Doct., Université d'Angers, 284p.

Idder T., 2007. Le problème des excédents hydriques à Ouargla : situation actuelle et perspectives d'amélioration. *Sécheresse* vol. 18, n° 3. pp161-167.

Idder T., Idder A., Mensous M., 2011. Les conséquences écologiques d'une gestion non raisonnée des eaux agricoles dans les oasis du Sahara algérien (Cas de l'oasis de Ouargla). Atelier n° 3. Colloque international usages écologiques, économiques et sociaux de l'eau agricole en méditerranée : Quels enjeux pour quels services. Univ. Provence, Marseille. 20-21 janvier 2011. 12p.

Jaramillo M F ; ID Restrepo I. 2017. Wastewater Reuse in Agriculture: A Review about Its Limitations and Benefits. *Sustainability* 2017, 9, 1734. 19p.

Jarde E., 2002. Composition organique de boues résiduaires de station d'épuration lorraines : caractérisation moléculaires et effets de la biodégradation. Th. Doc. Univ. Henri Poincaré. Nancy I en sciences de l'Univers. 286p.

J.O.R.A.D.P. (Journal Officiel Algérien). 2012. Journal officiel N° 41 de la république algérienne démocratique et populaire conventions et accords internationaux - lois et décrets arrêtes, décisions, avis, communications et annonces (traduction française). Dimanche 25 Chaàbane 1433 Correspondant au 15 juillet 2012. 27p.

Karoune S., 2008. Effets des boues résiduelles sur le Développement des semis du chêne liège (*Quercus suber* L.). Mémoire Magister. Univ. Mentouri Constantine. 217p.

Khadraoui A. 1995. Les sols agricoles du Sahara, Diagnostic et perspectives de développement hydro-agricole. Session technique spéciale en marge du 46^{ème} CEI de la CIID. Rome. Italie. In Eaux et sols en Algérie. pp 163-178.

Khadraoui A. 2006. Eaux et sols en Algérie, gestion et impact sur l'environnement. 236p.

Lahache Gafrej R., 2005. La réutilisation des eaux usées traitées comme ressources alternatives pour la préservation des eaux souterraines – Cas de la Tunisie. CIRESS –11-12 Décembre 2005–Ouargla- Algérie, Faculté des Sciences de Bizerte – TUNISIE. 27p.

Leclercq L., Maquet B., 1987. Deux nouveaux indices chimique et diatomique de qualité d'eau courante. Application au Samson et à ses affluents (Bassin de la Meuse Belge). Comparaison avec d'autres indices chimiques, biocénétiques et diatomiques. Vol. 38 : 3-112

Leger C., 2003. Etudes d'assainissement des eaux résiduelles pluviales et d'irrigation. Mesure de la lutte contre la remontée de la nappe phréatique de la vallée de Ouargla : Mission III A - collecte et analyse des données, A.N.E.P.I.A (BG), 32 p.

Legrand Ph. (1999). – Approche stratigraphique de l'Ordovicien terminal et du Silurien inférieur du Sahara algérien par l'étude des Diplo-graptides (Graptolites). Thèse Doctorat Etat, Univ. Michel de Montaigne-Bordeaux III. France. 892 p.

Legrand Ph. 2003. Paléogéographie du Sahara algérien à l'Ordovicien terminal et au Silurien inférieur Bull. Soc. géol. Fr., 2003, no 1. 7 p.

Mamadou LN., 2005. Impacts des eaux usées sur l'évolution chimique et microbiologique des sols : étude de cas à Pikine (Dakar-Sénégal). Diplôme d'études supérieures en sciences naturelles de l'environnement. Univ. Lausanne. 102p.

Margat J. 1990. Les gisements d'eau souterraine. La Recherche, 221. pp 590-596.

Mateo-Sagasta J., Rachid-SallyL., Thebo A., 2015.Global wastewater and sludge production, treatment and use. Book wastewater. Springer Netherlands. pp 15-38.

Mecheri B., 2009. Influence de la nappe phréatique sur les ouvrages hydrauliques et Génie civil. Mémoire Magister. Univ. KASDI Merbah Ouargla. 110p.

Mekonnen MM., Hoekstra A., 2016. Four billion people facing severe water scarcity. Journal sciences advances. Vol 2, issue 2. 15p.

Mensous M., 2011. Etude du système de gestion des eaux usées dans la cuvette de Ouargla. Mém. Magister. Univ. KASDI MERBAH Ouargla. 149p.

Merabet S., 2010. Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux brutes et distribuées du barrage réservoir de Beni Haroun. Mémoire Magister. Univ. Mentouri de Constantine. 92p.

Merabet S., 2011. Etude comparative de deux systèmes aquatiques dans le Sahara septentrional (Chott Merouane et Ain El Beida), environnement et signes de dégradation. Mémoire Magister. Univ. Kasdi Merbah Ouargla. 171p.

Mermoud A., 2006. Cours physique du sol, Maitrise de la salinité des sols, pp1-14.

Messaitfa A ; Chaich kh.2004. Bilan hydrologique de la cuvette de Ouargla (Sud – Est Algérien). Application à la remontée des eaux et la salinisation des sols. Journées internationales sur la désertification et le développement durable. pp 321-333.

Messrouk H., 2011. Contribution à l'évaluation et au traitement des eaux usées dans la région de Ouargla : Cas des composés phénoliques. Mémoire Magister. Univ. KASDI MERBAH Ouargla. 127p.

Milin P S., 2012. Comparaison de deux méthodes spectrophotométriques de dosage de l'acide phosphorique. Application à des sols et des végétaux. ED, INRA. n° 3. 14 p.

Ministère des ressources en eau (MRE). 2012. Recueil du ministère des ressources en eau. Algérie. 2pp.

Moulla AS ; Guendouz A.2003. Etude des ressources en eau souterraines en zones arides (Sahara algérien) par les méthodes isotopiques. Hydrology of the Mediterranean and Semiarid Regions (Proceedings of an international symposium held at Montpellier April 2003). IAHS Publ n° 278. pp 35-42.

Mozas M ; Ghosn A. 2013. État des lieux du secteur de l'eau en Algérie : Etude et analyse. Ed Institut de Prospective Economique Du Monde Méditerranéen. 27p.

Nader A. 2014. Eaux usées épurées de la cuvette de Ouargla Gestion et risques environnementaux. Mémoire Magister. Université de Kasdi Merbah Ouargla. 169p.

Nezli I., 2009. Approche hydrogéochimique à l'étude des aquifères de la basse vallée de l'oued M'ya (Ouargla), pp : 4-10.

Ngais H. 2015. La réutilisation des effluents urbains traités par lagunage dans la cuvette de Ouargla. Etats des lieux, enjeux et perspectives. Mémoire Magister. Univ KAsdi Merbah. Ouargla. 171 p.

O.N.M. (Office National de Météorologie), 2019. Bulletins de relevé climatologiques entre 2002-2019. Centre climatologique de Ouargla, Algérie. 6 p.

O.N.A. (Office national d'assainissement).2019. Document technique. Direction ONA Ouargla. 8p.

Office national d'assainissement O.N.A. 2020. Irrigation de plus de 11.000 hectares par les eaux épurées en 2019. PISTES. Université Laval. 2p.

Ollier CH., Poirée M., 1983. Irrigation théorie, technique et économie des arrosages. 6^{ème} Edition. Bibliothèque de l'institut de topométrie du conservatoire national des arts et métiers. Ed, JOUVE PARIS. 503p.

Organisation Mondiale de la Santé (OMS)., 1989. L'utilisation des eaux usées en agriculture et en aquaculture : recommandations à avisées sanitaires. Organisation Mondiale de la Santé. Séri. Rapports techniques n° 778. OMS. Genève. 84p.

Organization Mondiale de la Santé (OMS)., 2006. WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater. vol II. 222 p.

Organisation Mondiale de la Santé (OMS). 2012. Utilisation des eaux usées en agriculture. Directives OMS pour l'utilisation sans risque des eaux usées, des excreta et des eaux ménagères. OMS. Genève. 26p.

Ouali M., 1999. Précis d'assainissement urbain. Offic. Pub. Univ. Blida. 79p.

Oueld Belkhir, C., 2002. Contribution à l'étude et l'établissement du bilan hydrologique de la cuvette de Ouargla (Sahara Nord-est septentrional). Mém. Magister. Université de Blida. 107p.

Ounoki S., Achour S., 2014 : Evaluation de la qualité physicochimique et bactériologique des eaux usees brutes et épurées de la ville d'Ouargla-possibilité de leur valorisation en irrigation. Larhyss Journal, n°20. 10pp.

Ozenda P, 1991. Flore du Sahara, Ed C.N.R.S. Paris. 600p.

Raj A., Sara Vanan S., Manjula R, 2016. Effet of treated wastewater irrigation on soil proprieties: case stady at NIT Trichy. International journal of earth sciences and engineering. Vol 09. n°06. pp 2042-2046.

Ramade F., 2003. Elément d'écologie, écologie fondamentale. Ed, MC- Grano Hill, Paris, 379p.

Recommandations canadiennes pour la qualité de l'environnement conseil canadien des ministres de l'environnement (1999), Oxygène dissous recommandations Canadiennes pour la qualité des eaux -protection de la vie aquatique. Conseil Canadian des ministères de l'environnement. 6pp.

Refea A., 2003. Les indicateurs de la qualité, analyses physico-chimiques des eaux. pp 1-4.

Renard F., 2002. Master professionnel en hydrogéologie. DESS. 54p.

Ringot B., 2010. Conseil général de l'alimentation, de l'agriculture et des espaces ruraux ; les moyens techniques de protection des usagers ou des usages groupe de

travail ; Réutilisation des eaux usées traitées. Rapport d'activités. Initiative Co-associative AXE n°1. 42p.

Rodier J., Bazin O., Broutin JP., Champon P., 1996 : L'analyse de l'eau. Eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8^{ème} ED. 1383pp.

Rodier J., Bazin C., Chambon P., Broutin JP., Champsaud H., Rodi L., 2005. Analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer, 8ème édition. Ed. DUNOD, Paris. 1114p.

Rodier J., Legube B., Merlet N. 2009. Analyse de l'eau. 9ème édition. Ed. DUNOD, Paris. 1579p.

Rotbardat A., 2011. Réutilisation des eaux usées traitées -perspectives opérationnelles et recommandations pour l'action. Rapport final. Agence Française de Développement. 218p.

Rouvillois-Brigol M. (1975). Le pays de Ouargla (Sahara Algérien) variation et organisation. Pub. Univ. Sorbonne, Paris, 361p.

S.A.S.S/O.S.S., 2002. Système Aquifère du Sahara Septentrional. Une conscience de bassin. Observatoire du Sahara et du Sahel. Volume 2 : Hydrogéologie. Projet SASS. 284p.

Saker M. L., Daddi Bouhoun M., Hacini M., Ould EL Hadj M. D. et Brinis L. 2011. Remontée des nappes phréatiques à Oued Righ : situation actuelle et perspectives d'aménagement (Sud Est Algérien). Annales des Sciences et Technologie Vol. 3, N° 1, pp 21-25.

Scott CA., Faruqi NI., Raschid-Sally L., 2007. Wastewater Use in irrigated agriculture: Management challenges in developing countries. Wastewater Use in Irrigated Agriculture Coordinating the livelihood and environmental realities. Ed. CAB International in association with the International Water Management Institute and International Development Research Centre. pp 6-16.

Sedratti N. 2011. Origine et caractéristiques physico-chimiques des eaux de la wilaya de Biskra- Sud Algérien. Thèse de Doctorat. Univ. Badji Mohktar. Annaba. 252p.

Servant JM., 1975. Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du Sud et Sud-Ouest de France. Thèse d'Etat. Univ. Montpellier. 200p.

Slimani R., 2006. Contribution à l'évaluation d'indicateurs de pollution environnementaux dans la région de Ouargla : Cas des eaux de rejets (agricoles et urbaines). Mémoire Magister. Univ Kasdi Merbah Ouargla. 106p.

Slimani R., Guendouz A., 2015. Etude du potentiel de contamination des eaux de la nappe phréatique de la région de Ouargla (Sahara septentrional Est Algérien). Algerian journal of arid environment. vol. 5, n° 1. pp 106-114.

Slimani R. 2016. Etude qualitative des ressources en eaux souterraines et cartographie de la vulnérabilité environnementale d'un aquifère au climat aride

méditerranéen : cas de la cuvette de Ouargla, Algérie. Thèse de Doctorat. Univ.Kasdi Marbah Ouarzougl. 155p.

Sterner T. 2003. Policy Instruments for Environmental and Natural Resource Management. Washington, DC, Resource for the Future. 200p.

Tamrabet L., 2011. Contribution à l'étude de la valorisation des eaux usées en maraîchage. Th. Doc. Sciences Hydrauliques. Inst. Génie Civil Hydr. Archi. Univ. Hadj Lakhdar. Batna. 147p.

Tang C; Chen J; Shen Y. 2004. Long-term effect of wastewater irrigation on nitrates in groundwater in the north of China Plain. Wastewater Re-use and groundwater quality. IUGC 2003,pp32-39.

Tixeront, 1960) J. 1960. Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie. In IAHS Publ., 53 : 26-42.

Touil Y. 2003. Etude des possibilités de la réutilisation des eaux de drainage dans la cuvette d'Ouargla. Mémoire Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique Arbaoui Abdellah, Alger, 102p.

Toutain G., 1977. Elément d'agronomie saharienne, de la recherche au développement. Ed Jouve. Paris. 276p.

Trompette R. 1995. Geology of western Gondwana (2000-500 Ma). Pan-African-Brasiliano aggregation of South America and Africa. Balkema, Rotterdam, 350p.

Turc L. 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation ; évapotranspiration potentielle. Ann. Agr. n°12. P 13 - 49.

U.N.E.P (United Nations Environment Programme),, 2015. Good Practices for Regulating Wastewater Treatment: Legislation, Policies and Standards. Ed UNEP Nairobi. 198p. [in unep.org/gpa/documents/publications/GoodPracticesforRegulatingWastewater.pdf](http://unep.org/gpa/documents/publications/GoodPracticesforRegulatingWastewater.pdf)

U.N.E.S.C.O (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization),, 1972. Projet ERESS. Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport sur les résultats du projet, UNESCO, Paris. 100 p.

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA),, 1992. Guidelines for Water Reuse. 478p.

Vittecoq B., Allier D., Mardhe l V. 2010. Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères de Martinique Géologues n°163. Pp 76-82.

W.W.A.P (United Nations World Water Assessment Programme). 2017. The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource. Paris, UNESCO. 204 p.

Wang H., Wang T., Zhang B., Li F., Toure B., Omosa I B., Chiramba T., Abdel-Monem M. et Pradhan M. 2014. Water and wastewater treatment in Africa–Current practices and challenges. Clean – Soil, Air, Water, Vol. 42, No. 8, pp. 1029–1035. onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/clen.201470073/pdf.

Yapo OB., Gouzile V., Houenou P., Mambo V., Ohou MJA., Kouame KV., Konan F., Seka A., Tidou AS., 2010. Évaluation de la qualité des eaux de puits à usage domestique dans les quartiers défavorisés de quatre communes d'Abidjan (Côte d'Ivoire) : Koumassi, Marcory, Port-Bouet et Treichville. *Int. Biol. Chem. Sci.* 4(2) : pp289-307.

Yeli M S., 2009. Recyclage des eaux usées en irrigation : potentiel fertilisant, risques sanitaires et impacts sur la qualité des sols. Th. Doc. Lausanne. EPFL. 178p.



Annexe

Annexe 1. Classes retenues pour la description des faciès géologiques (U.N.E.S.C.O., 1972).

Classes	Facies géologiques	Classes	Facies géologiques
Sables	Sables fins	Argiles	Argiles gréseuses
	Sables moyens	sableuses	Argiles et sables
	Sables grossiers		Argiles, sables et calcaires
	Grès et conglomérats	Alluvions	marnes gréseuses
	Sables et graviers		Limons, sables, galets
Argiles	Sables et conglomérats	Calcaires	Poudingues
	sables et galets		galets et argiles
	Schistes argilo-sableux		Dolomie
Marnes	Schistes		Croûte calcaire
	argiles marneuses		Calcaire compact
	Marne		Calcaire fissuré
	marno-calcaire		calcaire dolomitiques
	marne argileuse		
Sables	sable et argile	Anhydrites	gypses et anhydrites
	sable limoneux		sable gypseux
	sable marneux		argiles gypseuses
	grès argileux		calcaires gypseux
argileux	calcaires, sables et argiles		argile anhydritique et gypseuse
			marnes et gypses

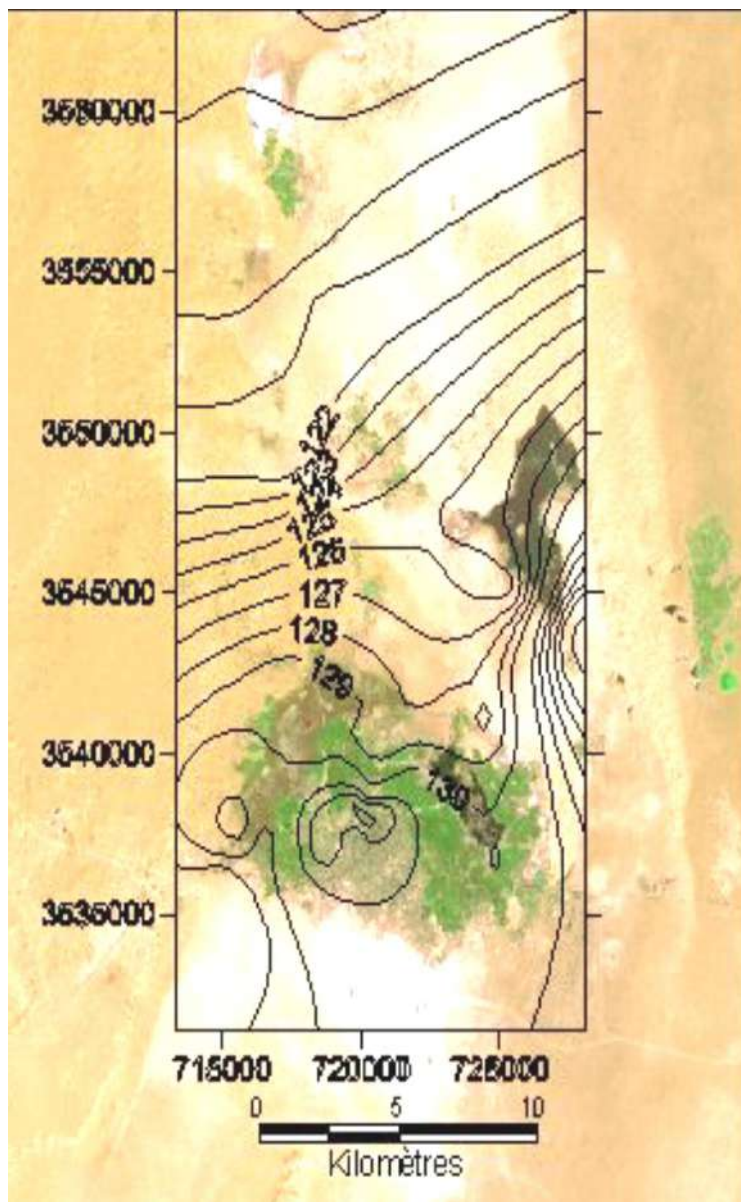
Annexe 2. Description géologiques et hydrogéologique de la région (Djidel, 2008)

Age	Lithologie		Epaisseur	Hydrogéologie
Aptien	constitue par la "barrémien-aptienne " dans la région d'Ouargla, qui est formée de marnes dolomitiques, gris verte, brunes ou blanches, et dolomies cristallines		Variables entre 20 et 26 m Se trouve à profondeur > 1400m	Imperméable dans son ensemble
Albien	Sur la région d'Ouargla, l'albien correspond à la série lithologique supérieure du Continental Intercalaire ; Ce sont des grès, argiles et sables. Les éléments détritiques (non argileux) sont largement prépondérants (70 à 90%) et sont représentés par des grès fins avec des passées de grès moyens et parfois d'intercalations de sables grossiers à limons argileux ou souvent carbonatés. On note des passées d'argiles brun -rougeâtre, elles sont même pélitiques et sableuses sur les puits les plus septentrionaux.		L'épaisseur de ces formations est variable (417-432 m). Se trouve à un profondeur de 1100 à 1400 m	L'Albien correspond à un horizon aquifère. D'après Rouvillois-Brigol, 1975), les géologues préfèrent employer le terme Continental Intercalaire.
Vraconien	L'intercalation Albo-varconienne caractérise un épisode dolomitique remarquable entre les grès Albien et les argiles Cénomaniennes, Il est formé de Dolomies et quelques fois de calcaires dolomitiques parfois argileux contenant de rares débris de mollusques.		les épaisseurs y sont situées entre 50 à 100 m	
Cénomaniens	Inférieure	constituée par des argiles dolomitiques et des marnes grises, avec parfois des argiles brune-rougeâtre ou gris-verdâtre avec l'existence de calcaires dolomitiques en particuliers à la partie médiane de la série.	65 et 80 m.	
	Supérieure	la série supérieure est formée d'une alternance d'argiles et de marnes dolomitiques grises, parfois d'argiles salifères, de bancs d'anhydrite, de quelques intercalations dolomitiques, et de passée de sel gemme	son épaisseur est de l'ordre de 70 m.	
Turonien	Formé d'une dalle ayant une épaisseur régulière "barre turonienne", il s'agit d'une série essentiellement calcaire : calcaire poreux blanc, parfois grisâtre, pulvérulent, quelquefois dolomitique, de calcaire beige dolomitique et de calcaire fin légèrement dolomitique.		l'ordre de 73 à 100 m	
Sénonien lagunaire	le Sénonien salifère	ayant une épaisseur moyenne de 200 m	épaisseur est supérieure à 400 m	
	Sénonien anhydritique.	épaisseur moyenne atteint 300 m		
	Sénonien carbonaté	Son épaisseur moyenne est de 150 m		
Sénonien et Eocène	formé essentiellement de carbonates. Il s'agit des calcaires dolomitiques cristallins ou microcristallins parfois vacuolaires ou crayeux ou plus carrément argileux.		150 à 200 m	

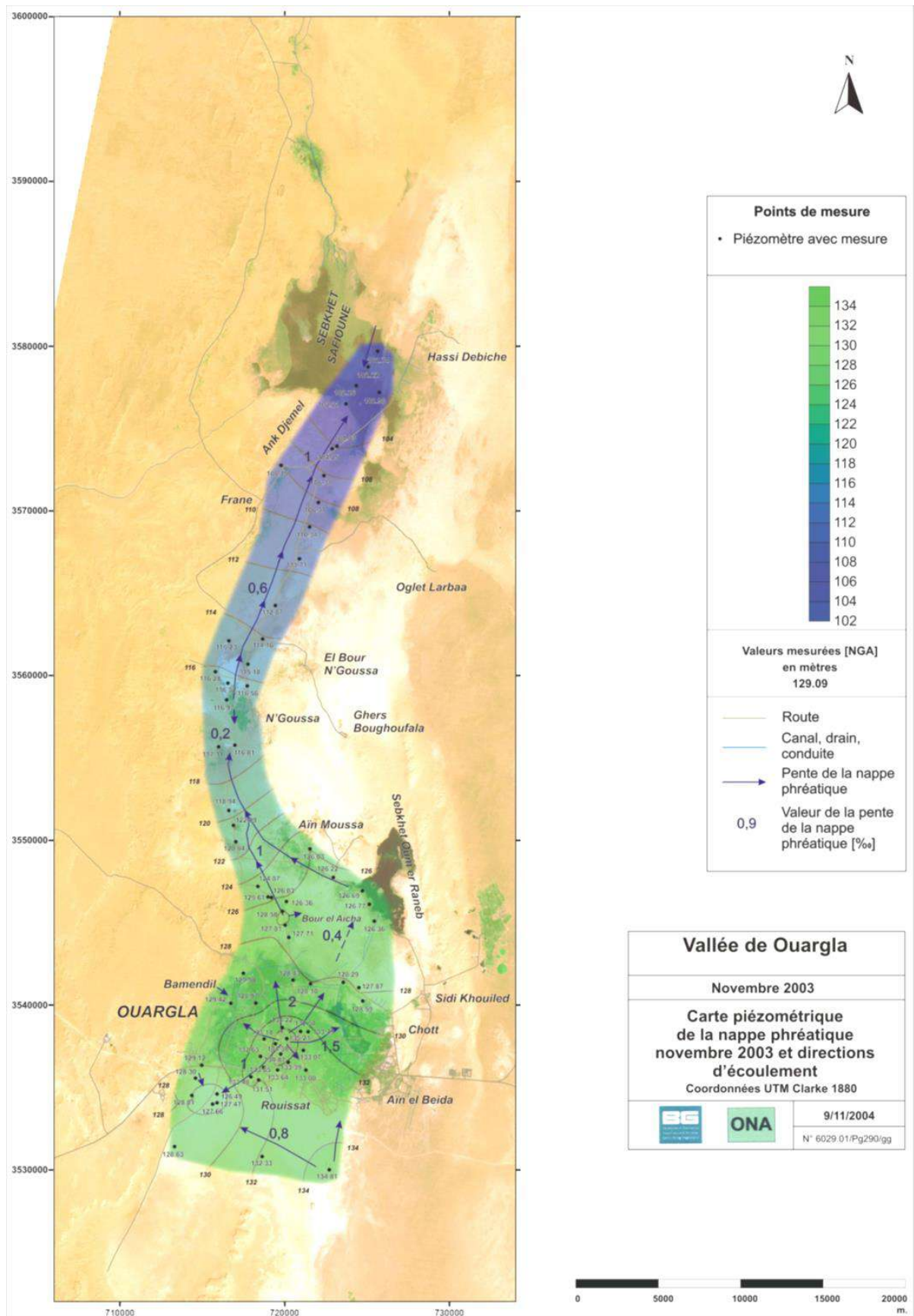
Suite de Annexe 2.

Mio-pliocène	Le Mio-Pliocène correspond au Continental Terminal C'est un puissant ensemble de sables et d'argiles qui s'étend sur tout le Sahara et qui repose en discordance sur le Sénonien et l'Eocène selon Cornet (1964) ; Abderrahmane (1998), à Ouargla le Mio-Pliocène constitué de quatre niveaux différents.	1 ^{er} niveau : A la base, un dépôt argileux peu épais recouvrant dans la partie centrale de la cuvette, et suivant une bande Nord-Sud.	100 à 200 m	le deuxième niveau est le principal horizon aquifère du Mio-Pliocène
		2 ^{ème} niveau : dépôt grés-sableux qui devient argileux vers le sommet, c'est le niveau le plus épais et le plus constant		
		3 ^{ème} niveau : C'est une formation argilo-sableuse dont les limites inférieures et supérieures sont assez mal définies		
		4 ^{ème} niveau : C'est le deuxième niveau sableux du Mio-Pliocène Il est très épais dans la zone des chotts, les sommets du niveau 4 affleurant sur de grandes surfaces constitué par une croûte de calcaire gréseux (croûte hamadienne)		
Quaternaire	À la base, il existe un niveau argilo-gréseux qui se présente comme une croûte ancienne. Ce niveau met en charge les aquifères du Mio-Pliocène à Ouargla	Le niveau le plus superficiel est constitué de sable éolien parfois gypseux et des produits de remaniement des terrains Mio-Pliocène	profondeur moins de 30 m	nappes phréatiques
		Sur le plateau, le sol est constitué d'un matériau meuble exclusivement détritique, hérité de l'altération du grès à sable rouge du Mio- Pliocène	Jusqu'à 8 m de profondeur sans encroûtement. 25 et 75 cm de profondeur, il s'agit d'un sol sableux à graviers.	
		Sur les chotts et les terrains intermédiaires l'horizon de surface est une croûte gypseuse épaisse ou polygonale, blanchâtre partiellement couverte de voiles de sable éolien gypso-siliceux.	15 à 20 cm d'épaisseur De on trouve un encroûtement gypseux pulvérulent, homogène de couleur jaune rougeâtre très claire. En dessous, on trouve un encroûtement gypseux induré de 40 cm d'épaisseur. En dessous un tuf présente un teneur de gypse décroissante.	
		Les Sebkhas	caractérisées par une salure extrêmement élevée, ces croûtes salines reposent sur des matériaux limono-sableux.	
		Les dunes	sable éolien d'origine gréseux provenant de Hamada Mio-Pliocène.	

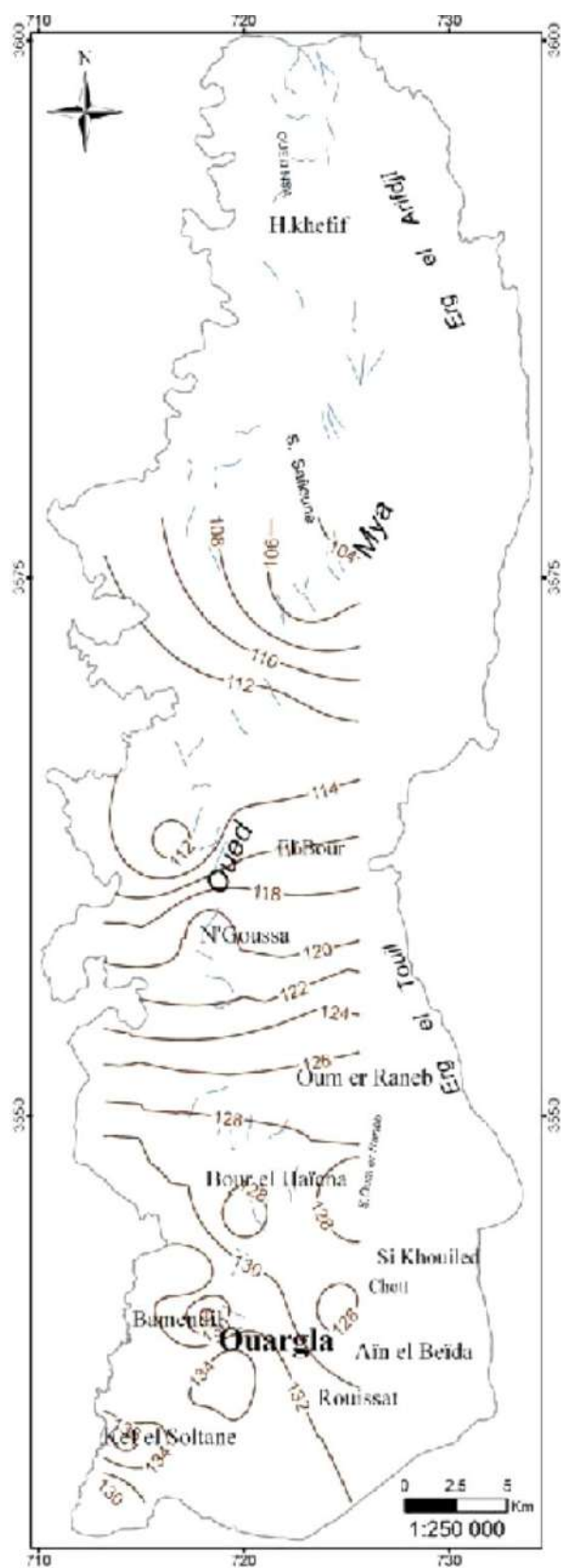
Annexe 3. Carte piézométrique de la nappe phréatique Novembre 1998 (Chachoua, 2008)



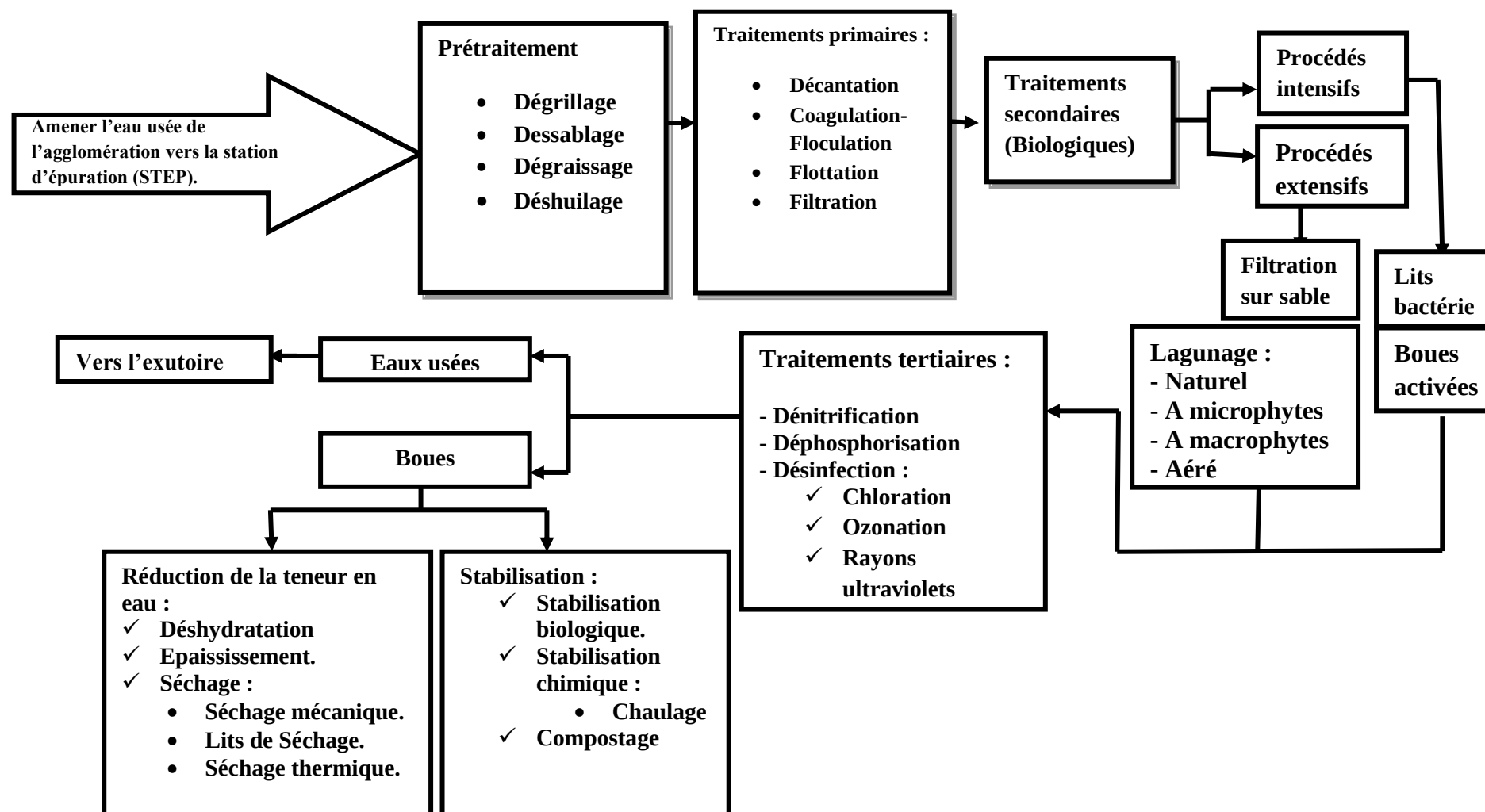
Annexe 5. Carte piézométrique de la nappe phréatique Novembre 2003 (Bonnard et Gardel, 2004)



Annexe 6. Carte piézométrique de la nappe phréatique Novembre 2007 (Slimani, 2016).



Annexe 7. Récapulatif de principales voix de traitements des eaux usées et des boues



Annexe 8. Recommandations microbiologiques de l'OMS 1989 pour les eaux usées destinées à l'irrigation (O.M.S., 1989).

Catégorie	Condition de réalisation	Groupe exposé	Nématodes intestinaux ^a (nbre, d'œuf/litre) moyenne arithmétique	Coliformes intestinaux (nbre/100 ml) moyenne ^b géométrique	Procédé de traitement susceptible d'assurer la qualité microbiologique voulue
A	Irrigation de cultures destinées à être consommées crues, des terrains de sport, des jardins publics	Ouvriers agricoles consommateurs, public	< =1	< = 1000 ^d	Une série de bassins de stabilisation conçus de manière à obtenir la qualité microbiologique voulue ou tout autre procédé de traitement équivalent
B	Irrigation des cultures céréalières, industrielles et fourragères, des pâturages et des plantations d'arbre ^e	Ouvriers agricoles	< =1	Aucune norme n'est recommandée	Rétention en bassins de stabilisation pendant 8-10 jours ou tout autre procédé d'élimination des Helminthes et des coliformes intestinaux
C	Irrigation localisée des cultures de la catégorie B si les ouvriers agricoles et le public ne sont pas exposé	Néant	Sans objet	Sans objet	Traitement préalable en fonction de la technique d'irrigation, mais au moins sédimentation primaire.

a, Espèce *Ascaris* et *Trichuris* et ankylostomes.

b, Pendant la périodes d'irrigation.

c, une directive plus stricte (<200 coliformes intestinaux par 100ml) est justifiée pour les pelouses avec lesquelles le public peut avoir un contact direct, comme les pelouses d'hôtels.

d, Cette recommandation peut être assouplie quand les plantes comestibles sont systématiquement consommées après une longue cuisson.

e, dans le cas d'arbres fruitiers, l'irrigation doit cesser deux semaines avant la cueillette et les fruits tombés ne doivent jamais être ramassés. Il faut éviter l'irrigation par aspersion.

Annexe 9. Recommandations microbiologique pour la REUE en agriculture (Journal Officiel de la République Algérienne, 2012).

Groupe des Cultures à irriguer	Critères de qualité microbiologiques	
	Nématodes (œufs / L) (moyenne arithmétique)	Coliformes Fécaux (CFU / 100 ml) (moyenne géométrique)
Irrigation non restrictive. Culture de produits pouvant être consommés crus.	Absence	< 100
Légumes qui ne sont consommés que cuits. Légumes destinés à la conserverie ou à la transformation non alimentaire.	< 0.1	< 250
Arbres fruitiers (1). Cultures et arbustes fourragers (2). Cultures céréalières. Cultures industrielles (3). Arbres forestiers. Plantes florales et ornementales (4).	<1	Seuil recommandé <1000
Cultures du groupe précédent (CFU/100ml) utilisant l'irrigation localisée (5) (6).	Pas de norme recommandée	Pas de norme recommandée

(1) L'irrigation doit s'arrêter deux semaines avant la cueillette. Aucun fruit tombe ne doit être ramassé sur le sol. L'irrigation par aspersion est à éviter.

(2) Le pâturage direct est interdit et il est recommandé de cesser l'irrigation au moins une semaine avant la coupe.

(3) Pour les cultures industrielles et arbres forestiers, des paramètres plus permissifs peuvent être adoptés.

(4) Une directive plus stricte (<200 coliformes fécaux par 100 ml) est justifiée pour l'irrigation des parcs et des espaces verts avec lesquels le public peut avoir un contact direct, comme les pelouses d'hôtels.

(5) Exige une technique d'irrigation limitant le mouillage des fruits et légumes.

(6) A condition que les ouvriers agricoles et la population alentour maîtrisent la gestion de l'irrigation localisée et respectent les règles d'hygiène exigées. Aucune population alentour.

Annexe 10. Recommandations physico-chimiques pour REUE en agriculture (Journal Officiel de la République Algérienne, 2012).

	<u>Paramètres</u>	<u>Unité</u>	<u>CONCENTRATION MAXIMALE ADMISSIBLE</u>
<u>Physiques</u>	pH	-	6 < pH < 8.5
	MES	mg/l	30
	CE	ds/m	3
	Infiltration le SAR = 0-3 CE		0.2
	3-6		0.3
	6-12		0.5
<u>Chimiques</u>	12-20	ds/m	1.3
	20-40		3
	DBO ₅	mg/l	30
	DCO	mg/l	90
	Chlorure (Cl)	meq/l	10
	Azote (NO ₃ -N)	mg/l	30
<u>Eléments toxiques (*)</u>	Bicarbonates (HCO ₃)	meq/l	8.5
	Aluminium	mg/l	20.0
	Arsenic	mg/l	2.0
	Cadmium	mg/l	0.05
	Béryllium	mg/l	0.5
	Chrome	mg/l	1.0
	Cobalt	mg/l	5.0
	Cuivre	mg/l	5.0
	Bore	mg/l	2.0
	Cyanures	mg/l	0.5
	Fluor	mg/l	15.0
	Fer	mg/l	20.0
	Phénols	mg/l	0.002
	Plomb	mg/l	10.0
	Lithium	mg/l	2.5
	Manganèse	mg/l	10.0
	Mercure	mg/l	0.01
	Molybdène	mg/l	0.05
	Nickel	mg/l	2.0
	Sélénium	mg/l	0.02
	Vanadium	mg/l	1.0
	Zinc	mg/l	10.0

(*) : Pour type de sols á texture fine, neutre et alcalin.

Annexe 11. Valeurs mensuelles de radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère (Iga) et durée mensuelle du jour (H) pour la latitude nord 32° (Ollier et Poiree, 1983).

latitude nord 32°	Valeurs de d'Iga	Valeurs de H
janvier	480	320
février	599	311
mars	746	372
avril	871	389
mai	949	429
juin	975	427
juillet	956	434
août	885	413
septembre	773	371
octobre	634	354
novembre	501	316
décembre	439	312

Annexe 1. Coefficients cultureux des cultures (Doorenbos et Pruitt, 1975).

La Phase végétative	Kc		
	Orge	Luzerne	Palmier dattier
Initiation :	0,3	0.40	0.95
Medium :	1,15	1.20	1.00
end :	0,25	1.15	1.00

La phase initiale correspond à la phase de germination et démarrage de la croissance, quand la surface du sol n'est pas, ou à peine, couverte par la culture. La phase medium ; cette phase s'étaler depuis le moment où la phase initiale s'achève jusqu'au débuté la maturation. Pour la phase end, débuté de la maturation la jusqu'à maturité complète (Doorenbos et Pruitt, 1975 ; Choissnel, 1998).

Annexe 2. Tableaux de MAC GRADY pour le calcul de l’NPP dans la dilution (3 tube/dilution) (Norme ISO 7218 :1996(F))

Tables NPP (d'après la norme ISO 7218 :1996(F))

Tableau 1 - Table NPP pour 3 x 1 g (ml), 3 x 0,1 g (ml) et 3 x 0,01 g (ml).

Nombre de résultats positifs			NPP	Catégorie lorsque le nombre d'essais de mesures est de 1 pour le lot considéré	Limites de confiance			
					>95%	>95%	>99%	>99%
0	0	0	<0,30		0,00	0,94	0,00	1,40
0	0	0	0,30	3	0,01	0,95	0,00	1,40
0	1	0	0,30	2	0,01	1,00	0,00	1,60
0	1	1	0,61	0	0,12	1,70	0,05	2,50
0	2	0	0,62	3	0,12	1,70	0,05	2,50
0	3	0	0,94	0	0,35	3,50	0,18	4,60
1	0	0	0,36	1	0,02	1,70	0,01	2,50
1	0	1	0,72	2	0,12	1,70	0,05	2,50
1	0	2	1,1	0	0,4	3,5	0,2	4,6
1	1	0	0,74	1	0,13	2,00	0,06	2,70
1	1	1	1,1	3	0,4	3,5	0,2	4,6
1	2	0	1,1	2	0,4	3,6	0,2	4,6
1	2	1	1,5	3	0,5	3,8	0,2	5,2
1	3	0	1,6	3	0,5	3,8	0,2	5,2
2	0	0	0,92	1	0,15	3,50	0,07	4,60
2	0	1	1,4	2	0,4	3,5	0,2	4,6
2	0	2	2	0	0,5	3,8	0,2	5,2
2	1	0	1,5	1	0,4	3,8	0,2	5,2
2	1	1	2,0	2	0,5	3,8	0,2	5,2
2	1	2	2,7	0	0,9	9,4	0,5	14,2
2	2	0	2,1	1	0,5	4,0	0,2	5,6
2	2	1	2,8	3	0,9	9,4	0,5	14,2
2	2	2	3,5	0	0,9	9,4	0,5	14,2
2	3	0	2,9	3	0,9	9,4	0,5	14,2
2	3	1	3,6	0	0,9	9,4	0,5	14,2
3	0	0	2,3	1	0,5	9,4	0,3	14,2
3	0	1	3,8	1	0,9	10,4	0,5	15,7
3	0	2	6,4	3	1,6	18,1	1,0	25,0
3	1	0	4,3	1	0,9	18,1	0,5	25,0
3	1	1	7,5	1	1,7	19,9	1,1	27,0
3	1	2	12	3	3	36	2	44
3	1	3	16	0	3	38	2	52
3	2	0	9,3	1	1,8	36,0	1,2	43,0
3	2	1	15	1	3	38	2	52
3	2	2	21	2	3	40	2	56
3	2	3	29	3	9	99	5	152
3	3	0	24	1	44	99	3	152
3	3	1	46	1	9	198	5	283
3	3	2	110	1	20	400	10	570
3	3	3	>110					
autres valeurs			non cité dans la table ISO 7218 : 1996 (F)					

Annexe 3. Guide et interprétation de la qualité des eaux d'irrigation (Ayers, 1977 in Daddi Bouhoun, 1997).

Nature des problèmes	Guide de pour de la qualité des eaux		
	Pas de problèmes	Problèmes modérés	Problème sévère
La salinité C. E. _{iW} de l'eau d'irrigation (dS/m)	< 0,75	0,75 – 3,0	> 3,0
La perméabilité C. E. _{iW} (d S /m) S.A.R. ajusté	> 0,5 < 6,0	< 0,5 6,0 – 9,0	< 0,2 > 9,0
La toxicité des ions spécifique - Absorption racinaire Sodium (évalué par le S.A.R.ajusté) Chlore (meq /l) Bore (mg/l ou ppm) - Absorption foliaire (irrigation par aspersion) Sodium (meq /l) Chlore (meq /l)	< 3,0 < 4,0 < 0,5 < 0,5 < 3,0	3,0 - 9,0 4,0 - 10 0,5 - 2,0 > 3,0 > 3,0	> 9,0 > 10 2,0 -10 - -
Problèmes divers NH ₄ -N et NO ₃ -N pour les plantes sensibles (ppm) HCO ₃ seulement pour l'aspersion (meq/l)	< 5,0 <1,5	5,0 - 30 1,5 - 8,5	> 30 > 8,5
pH	Zone normale : 6,5- 8,4		

Annexe

Annexe 4. Directives de la F.A.O. (1974) concernant la qualité physicochimique des eaux destinées à l'irrigation (Tamrabet, 2011).

	Restriction pour l'irrigation		
	Aucune	Légère à modérée	Forte
Salinité (influe sur l'eau disponible pour la plante)			
CEi (ds/m)	<0.7	0.7-3.0	>3.0
TDS (mg/l)	< 450	450-2000	>2000
Infiltration (influe sur la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol : utiliser à la fois CEi et SAR)			
SAR = 0-3 et CEi =	>0.7	0.7- 0.2	<0.2
SAR = 3-6 et CEi =	>1.2	1.3	<0.3
SAR = 6-12 et CEi =	>1.9	1.9-0.5	<0.5
SAR = 12-20 et CEi =	>2.9	2.9-1.3	<1.3
SAR = 20-40 et CEi =	>5.0	5.0-2.9	<1.3
Toxicité de certains ions (affectent les cultures sensibles)			
Sodium (Na): (SAR méq/l).	<3	3-9	>9
Irrigation de surface Irrigation par aspersion	<3	>3	
Chlore (Cl)			
Irrigation de surface (méq/l)	<4	4-10	>10
Irrigation par aspersion (méq/l).	<3	>4	
Bore (mg/l)	<0.7	0.7-3.0	>3.0
Effets divers (affecte les cultures sensibles)			
Azote (NO ₃ -N) (mg/l)	<5	5-30	>30
Bicarbonate (HCO ₃) (pour aspersion sur frondaison) (méq/l)	<1.5	1.5-8.5	>8.5
pH	Zone normale : 6.5-8.4		

Annexe 5. Classification des eaux d'irrigation selon leurs conductivités électriques (Durand, 1983).

Classe	CE 25C° (µmhos/cm/cm)	Salinité des eaux
C1	CE < 250	Eau non saline
C2	250 < CE < 750	Eau à salinité moyenne
C3	750 < CE < 2250	Eau à forte salinité
C4	2250 < CE < 5000	Eau à très forte salinité
C5	5000 < CE < 20 000	Eau à salinité excessive

Annexe 6. SAR et degré d'alcalinisation des sols (Servant, 1975).

SAR	Alcalinisation
SAR < 4	Pas d'alcalinisation
4 < SAR < 8	Faible alcalinisation
8 < SAR < 12	Alcalinisation moyenne
12 < SAR < 18	Alcalinisation forte
SAR > 18	Alcalinisation intense

Annexe 7. Liste des cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées (Journal Officiel, 2012).

Groupes de cultures pouvant être irriguées avec des eaux usées épurées	Liste des cultures
Arbres fruitiers (1)	Dattiers, vigne, pomme, pêche, poire, abricot, nèfle, cerise, prune, nectarine, grenade, figue, rhubarbe, arachides, noix, olive.
Agrumes	Pamplemousse, citron, orange, mandarine, tangerine, lime, clémentine.
Cultures fourragères (2)	Bersim, maïs, sorgho fourragers, vesce et luzerne.
Culture industrielles	Tomate industrielle, haricot à rames, petit pois à rames, betterave, sucrière, coton, tabac, lin.
Cultures céréalières	Blé, orge, triticales et avoine.
Cultures de production de semences	Pomme de terre, haricot et petit pois.
Arbustes fourragers	Acacia et Atriplex.
Plantes florales à sécher ou à usage industriel	Rosier, iris, jasmin, marjolaine et romarin.

(1) L'irrigation avec des eaux usées épurées est permise à condition que l'on cesse l'irrigation au moins deux (2) semaines avant la récolte. Les fruits tombés au sol ne sont pas ramassés et sont à détruire.

(2) Le pâturage direct dans les parcelles irriguées par les eaux usées épurées est strictement interdit et, ce afin de prévenir toute contamination du cheptel et par conséquent des consommateurs.

Annexe 19. Hydrochimie de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla d'après ANRH entre 2010 et 2014.

Janvier 2010						Octobre 2010							Mars 2012							Juin 2013								Février 2014									
Piézométrie		Hydrochimie				Piézométrie		Hydrochimie						Piézométrie		Hydrochimie				NO 3 (Mg /l)		Piézométrie		Hydrochimie						Piézo	NS(m)/Sol	CE(i nsitu)	CE(l abo)	RS		PH(la bo)	NO3 (Mg/l)
Piéz o	NS(m)/Sol	CE	RS	PH	NO3 (Mg/l)	Piéz o	NS(m)/ Sol	CE	RS	PH	NO3 (Mg/l)	Date	Piézo	NS(m)/Sol	CE	RS	PH	NO 3 (Mg /l)	Date	Piézo	NS(m) /Sol	CE(in situ)	CE(la bo)	RS	PH(in situ)	T°(ins itu)	PH(la bo)	NO3 (Mg/l)	Piézo	NS(m)/Sol	CE(i nsitu)	CE(l abo)	RS		PH(la bo)	NO3 (Mg/l)	
P001	0,85	128,2	132044	7,37		P001	0,94	121,9	164628	8,5		02/11/2010	P001							P001	0,88	146,9	123,5	153348	7,47	26,8	7,7		P001	0,81		125,7	161260		7,74		
P002	1,13	77,4	86184	7,71		P002	1,22	79,7	90480	7,99		02/11/2010	P002							P002	1,25	87,9	79,4	82270	7,62	26,3	7,78		P002	1,15		79,9	92536		7,85		
P006	1,25	25,74	22220	7,74	4,90	P006	1,44	24,7	20920	8,22	23		P006	1,4	19,73	15756	7,25	17	01/03/2012	P006	1,53	21,1	20,5	17478	7,6	26,7	7,82	32,5	P006	1,38		19,02	16262		7,85	1,1	
P012	0,95	74,5	75536	8,26		P012	1	78,6	80912	7,87		26/10/2010	P012	0,91	88,9	88560	8,16		01/03/2012	P012	1,06	94,5	84,3	88200	7,68	27	8,02		P012	0,96		86	96600		7,84		
P015	1,53	23	20050	7,48	1,689	P015	1,69	28,5	26856	7,96	27	26/10/2010	P015	1,33	21,8	18100	7,64	17,15	01/01/2012	P015	1,19	13,6	13,39	11556	7,48	27,8	7,8	30	P015	1		14,85	12818		7,8	0,8	
P019	1,08	56,6	58734	8		P019	1,21	56,5	68121	8,55		02/11/2010	P019	1,22	64,2	78564	7,9		01/03/2012	P019	1,25	73,4	67,1	71000	7,58	25,8	7,71		P019	1,13		60,5	66616		7,77		
P021	0,72	165	170217	7,49		P021	0,82	159,2	419362	7,46		24/10/2010	P021							P021	0,73	199,9	165,7	287832	7,54	27,1	7,78		P021	0,65		166,1	300750		7,75		
P030	0,85	102	115804	7,8	4,561	P030	0,79	97,3	116832	7,86	7	24/10/2010	P030							P030	0,6	119,4	103,9	121088	7,75	30,7	7,91	10,5	P030	0,64		115,8	141790		7,72	0,5	
P041	0,44	28,1	28394	7,98		P041	0,61	29,4	30064	8,34		26/10/2010	P041	0,47	35,6	78564	7,9		01/03/2012	P041	0,61	34,8	33,2	37394	7,79	29,1	8,08		P041	0,47		34,1	32782		7,95		
P043						P043	0,66	103,7	149692	8,05		26/10/2010	P043	0,67	115,9	148500	7		01/03/2012	P043	0,72	122	107,3	131760	7,71	28	7,95		P043	0,64		112,5	151990		7,85		
P054	2,6	4,05	3866	8,24		P054	2,76	4,68	3884	8,32		26/10/2010	P054	2,76	4,87	3588	7		01/03/2012	P054	2,86	4,61	4,63	3672	7,6	23,9	7,87		P054	2,77		5,25	4134		7,96		
P056	2,54	6,99	5284	8,28	17,153	P056	2,8	7,36	6840	8,26	28,5	26/10/2010	P056	3,3	6,21	5054	6,83	28	01/03/2012	P056	3,42	6,41	6,49	5650	7,53	24,1	7,7	23,25	P056	3,47		6,66	5800		7,68	0	
P057	3,19	6,08	5009	8,15		P057	3,31	6,38	4988	8,16		26/10/2010	P057	3,45	6,26	4902	6,9		01/03/2012	P057	3,66	5,83	5,94	4862	7,63	24,4	7,77		P057	3,72		5,76	4880		8,04		
P059	11,56	2,57	1534	8,31	16,027	P059	10,79	3,78	1592	8,19	50	27/10/2010	P059	11,8	3,06	2166	7,25	43,5	01/03/2012	P059	12,17	2,41	2,96	4078	7,86	26,3	7,6	10,75	P059	12,15		4,39	1916		7,73	0	
P064	1,38	163,8	161297	7,4		P064	1,45	160,6	197840	7,63		27/10/2010	P064	1,37	169,7	348840	6,3		01/03/2012	P064	1,34	199,9	166,4	338780	7,27		7,51		P064	1,31		164,3	340260		7,81		
P096	0,51	81,8	90296	7,8	0	P096	0,6	81,4	101460	9,14	0	31/10/2010	P096	0,41	101,9	116200	7,2	0	01/03/2012	P096	0,51	88	95,8	116550	7,4	29,7	7,6	1	P096	0,46		99,9	126860		7,75	0	
P113	3,33	72,7	87772	7,97	0	P113	3,31	72,9	144480	8,18	2,5	03/11/2010	P113	3,54	74,4	101924	7,44	0	01/03/2012	P113	3,42	78,9	71	112584	7,51	26,8	7,97	2,25	P113	3,55		70,1	232530		7,85	0	
P162	0,62	167,6	178154	7,1		P162	0,8	159,5	190632	7,04		25/10/2010	P162	0,75	173,9	390000	6,23		01/03/2012	P162	0,89	199,9	166,5	398696	6,37	28	7		P162	0,91		167,8	387680		7,32		
P163	0,45	162,4	176416	5,88	0	P163	0,67	156,5	207552	6,76	1,5	25/10/2010	P163	0,7	171,5	363660	6,1	0	01/03/2012	P163	0,81	199,9	163,7	413688	6,09	28,3	6,63	17	P163	0,7		166,1	383730		7,05	0	
PZ12	0,53	122,6	130624	7,95		PZ12	0,64	91,6	105128	8,67		25/10/2010	PZ12	0,38	55,2	51528	7,52		01/03/2012	PZ12	0,5	68	60,1	59150	7,76	28,6	8,01		PZ12	0,41		51,5	55292		8,08		
P165	0,99	176,4	174500	7,46		P165	0,82	170,7	173772	7,65		25/10/2010	P165	1,23	182,3	359690	6,73		01/03/2012	P165	1,21	199,9	174,4	360780	6,98	26,5	7,4		P165	0,59		79,3	84556		8,1		
P416	2,39	5,18	4386	8,37	50,887	P416	2,42	6,1	4644	8,68	39	24/10/2010	P416							P416	2,44		6,35	5258			8	60	P416	2,44		5,6	4830		8,22	4,3	
P419 bis	0,17	8,01	6816	7,07	0	P419bis	0,26	8,13	7304	8,44	0,35	31/10/2010	P419bis	0,08	9,24	8042	7,63	0	01/03/2012	P419bis	0,31	12,3	11,32	10136	7,68	27,8	8,15	0	P419bis	0,07		12,21	10854		7,86	0	
P422	5,62	3,85	3198	8,28	23,253	P422	5,72	2,9	2456	8,22	47	20/10/2010	P422	5,82	3,18	2488	8	48,5	01/03/2012	P422	5,85	3,17	3,28	2574	7,85	22,2	8,25	49,5	P422	5,94		3,08	2502		7,92	12,5	
P423	1,88	156,9	162454	6,69		P423	1,82	148,5	178215	7,06		31/10/2010	P423	1,73	161,6	486010	6,1		01/03/2012	P423	1,75	188	157,1	442460	6,65	27,9	7	0	P423	1,65		156,2	458580		7,1		
P430	16,67	4,42	4630	8,12	16,389	P430	16,51	5,39	5448	8,94	29	24/10/2010	P430							P430	16,58	8,17	8,76	6972	8,12	25,2	7,72	31	P430	17,45		7,18	6352		8,04	2,4	
PL03	1,16	11,3	10204	8,06	0	PL03	0,8	9,99	9504	8,28	2,5	27/10/2010	PL03	0,72	12,49	10656	7,4	2,5	01/03/2012	PL03	0,65	11,9	11,74	10334	7,58	30,1	8,17	1	PL03	0,37		11,41	10126		7,9	0	
PL10	2,42	5,8	6174	7,8	10,989	PL10	2,13	5,37	5348	8,45	17	28/10/2010	PL10	2,05	5,13	4772	7,64	36,5	01/03/2012	PL10	2,32	5,25	5,6	5342													

Annexe 20. Analyse Factorielle Discriminante (AFD) avec XLSTAT 2014.5.03

Les matrices de covariance intra-classe sont supposées différentes

Les probabilités a priori ne sont pas prises en compte

Niveau de signification (%) : 5

Correction du poids des classes : Automatique

Variable	Modalités	Effectifs	%
Eau d'irrigation	EC	26	78,7879
	EUE	3	9,0909
	non irriguée	4	12,1212

Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
CE Hiver (mS/cm)	33	0	33	20,0000	160,0000	89,4394	41,1377
pH Hiver	33	0	33	7,1000	8,1000	7,6424	0,2359
Cl- Hiver (mg/l)	33	0	33	2002,3000	150006,1880	27694,3870	33119,5318
SO4- Hiver (mg/l)	33	0	33	1003,0000	9525,0000	3524,8364	2206,9302
HCO3- Hiver (mg/l)	33	0	33	47,0000	600,0000	208,8727	156,4858
NO3- Hiver (mg/l)	33	0	33	0,1450	0,9900	0,5776	0,2166
NO2- Hiver (mg/l)	33	0	33	0,0130	0,8000	0,2279	0,1976
Ca++ Hiver (mg/l)	33	0	33	142,0000	6324,0000	2408,9788	1759,0950
Mg++ Hiver (mg/l)	33	0	33	120,4000	3654,1000	681,3394	718,3945
Na+ Hiver (mg/l)	33	0	33	1476,3000	25330,3000	6343,0570	4607,3337
K+ Hiver (mg/l)	33	0	33	520,0000	5562,0000	1840,5909	1019,1024
NH4+ Hiver (mg/l)	33	0	33	0,1300	7,1000	2,9882	1,9517
PO43- Hiver (mg/l)	33	0	33	0,0010	0,2800	0,1416	0,0664
CE Eté (mS/cm)	33	0	33	12,5000	162,5000	88,3788	42,9360
pH Eté	33	0	33	4,5000	75,0000	9,6182	11,7521
Cl- Eté (mg/l)	33	0	33	2120,4000	150756,1480	25994,2302	33066,3299
SO4- Eté (mg/l)	33	0	33	1013,0000	9520,0000	3503,5727	2179,7453
HCO3- Eté (mg/l)	33	0	33	48,0000	623,0000	210,9394	159,4394
NO3- Eté (mg/l)	33	0	33	0,1550	0,9500	0,5533	0,2210
NO2- Eté (mg/l)	33	0	33	0,0100	0,8800	0,2285	0,2034
Ca++ Eté (mg/l)	33	0	33	141,6000	6312,4000	2403,6939	1748,3262
Mg++ Eté (mg/l)	33	0	33	122,3000	3674,1000	729,8061	738,8372
Na+ Eté (mg/l)	33	0	33	1442,6000	25221,3000	6087,5964	4554,3878
K+ Eté (mg/l)	33	0	33	518,4000	5542,0000	1799,6061	1003,0372
NH4+ Eté (mg/l)	33	0	33	0,1200	6,8800	2,8906	1,9199
PO43- Eté (mg/l)	33	0	33	0,0010	0,2600	0,1412	0,0643
DBO 5 Hiver (mg/l)	33	0	33	17,0000	42,0000	36,1818	8,0252
DCO Hiver (mg/l)	33	0	33	42,0000	95,0000	65,1515	10,3836
O2 Hiver (mg/l)	33	0	33	2,1000	4,1000	2,5636	0,4629

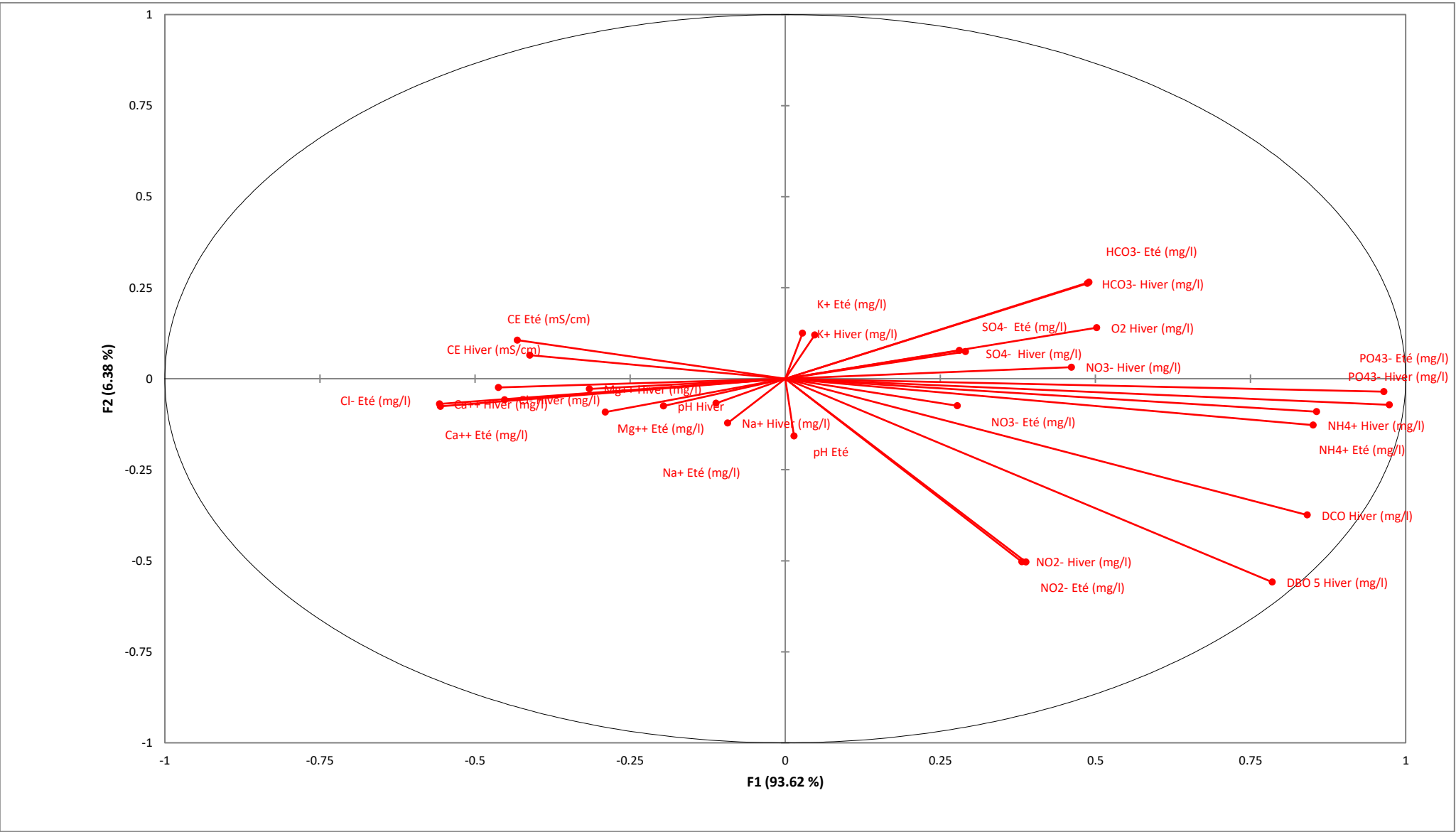
Matrice de corrélation

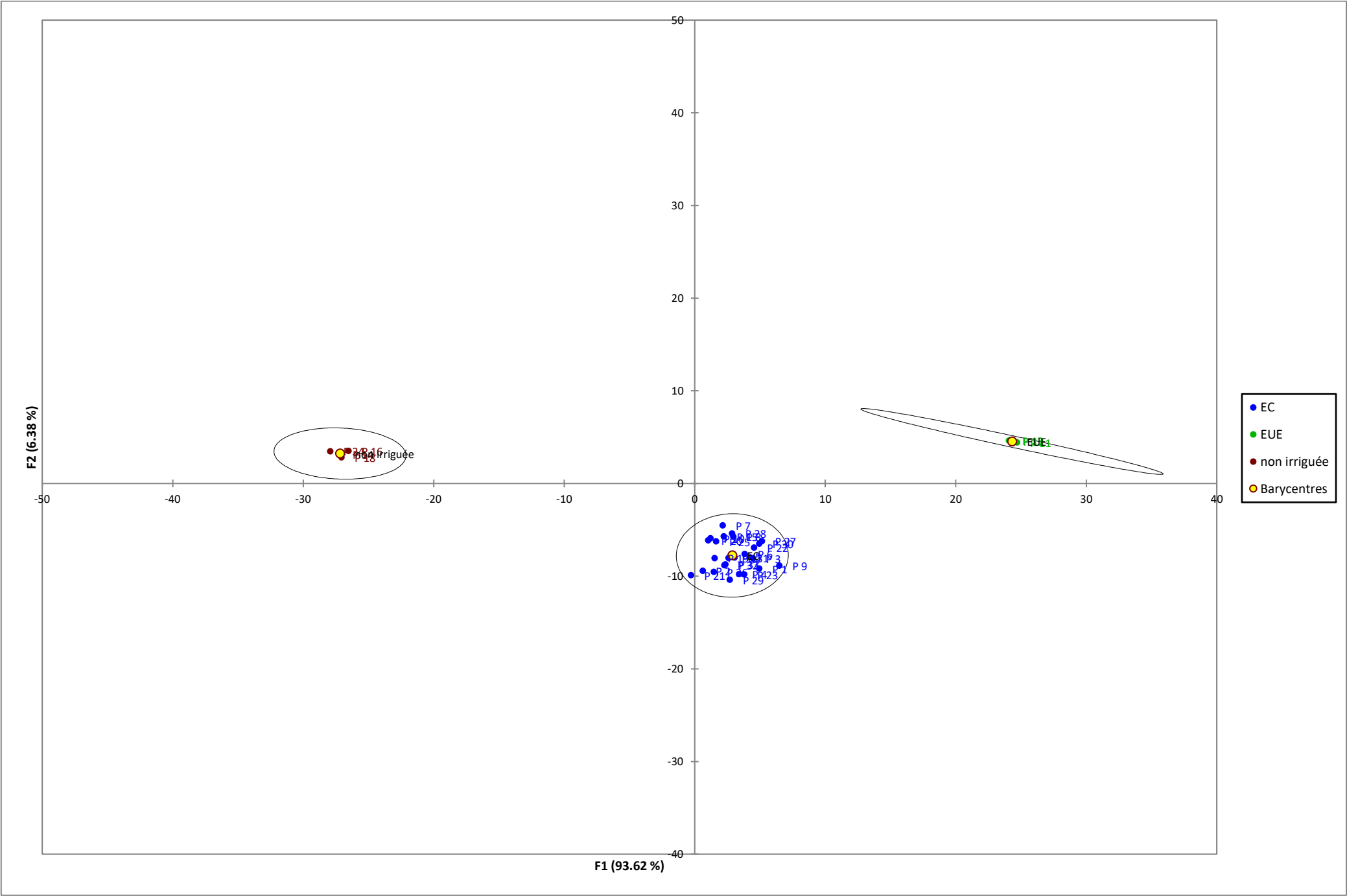
Variables	CE Hiver (mS/cm)	pH Hiver	Cl- Hiver (mg/l)	SO4- Hiver (mg/l)	HCO3- Hiver (mg/l)	NO3- Hiver (mg/l)	NO2- Hiver (mg/l)	Ca++ Hiver (mg/l)	Mg++ Hiver (mg/l)	Na+ Hiver (mg/l)	K+ Hiver (mg/l)	NH4+ Hiver (mg/l)	PO43- Hiver (mg/l)	CE Eté (mS/cm)	pH Eté	Cl- Eté (mg/l)	SO4- Eté (mg/l)	HCO3- Eté (mg/l)	NO3- Eté (mg/l)	NO2- Eté (mg/l)	Ca++ Eté (mg/l)	Mg++ Eté (mg/l)	Na+ Eté (mg/l)	K+ Eté (mg/l)	NH4+ Eté (mg/l)	PO43- Eté (mg/l)	DBO 5 Hiver (mg/l)	DCO Hiver (mg/l)	O2 Hiver (mg/l)
CE Hiver (mS/cm)	1,0000	0,0940	0,4538	0,0524	0,1141	0,0268	0,1205	0,0439	0,0565	0,1642	0,2624	0,0954	0,2892	0,9108	0,1394	0,4285	0,0478	0,1138	0,0806	0,1302	0,0420	0,0256	0,1851	0,2491	0,0802	0,2650	0,3562	0,0946	0,1096
pH Hiver	0,0940	1,0000	0,0217	0,0123	0,0799	0,1223	0,0287	0,2677	0,1826	0,0273	0,1296	0,0735	0,0558	0,0101	0,1421	0,0357	0,0159	0,0863	0,1257	0,0173	0,2615	0,1332	0,0106	0,1327	0,0802	0,0036	0,0933	0,0869	0,1571
Cl- Hiver (mg/l)	0,4538	0,0217	1,0000	0,3725	0,2948	0,0852	0,2099	0,2323	0,2726	0,0806	0,1146	0,0980	0,2438	0,3694	0,1005	0,9663	0,3784	0,2899	0,0789	0,2175	0,2330	0,2273	0,1034	0,1068	0,0947	0,2721	0,3188	0,0702	0,1395
SO4- Hiver (mg/l)	0,0524	0,0123	0,3725	1,0000	0,0947	0,0531	0,0101	0,3250	0,1116	0,1543	0,1628	0,2126	0,0628	-0,0791	0,0036	0,3067	0,9993	0,0956	0,0409	0,0209	0,3212	0,0123	0,1648	0,1667	0,2201	0,0399	0,0030	0,2034	0,3066
HCO3- Hiver (mg/l)	-0,1141	0,0799	0,2948	0,0947	1,0000	0,3772	0,3126	0,0965	0,3555	0,0111	0,3868	0,0600	0,1156	-0,0604	0,0180	0,3469	0,0951	0,9992	0,2821	0,3184	0,0978	0,3706	0,0281	0,3986	0,0467	0,0747	0,0125	0,1179	0,0723
NO3- Hiver (mg/l)	0,0268	0,1223	0,0852	0,0531	0,3772	1,0000	0,1696	0,2748	0,1334	0,2106	0,1944	0,2802	0,1771	0,0482	0,2769	0,1233	0,0513	0,3790	0,9724	0,1939	0,2703	0,1685	0,1787	0,2164	0,2565	0,0871	0,0985	0,0704	0,2462
NO2- Hiver (mg/l)	-0,1205	0,0287	0,2099	0,0101	0,3126	0,1696	1,0000	0,0138	0,1844	0,3588	0,1084	0,3579	0,1838	-0,0731	0,0793	0,2039	0,0144	0,3075	0,1365	0,9836	0,0189	0,2137	0,3659	0,0922	0,3605	0,2004	0,3506	0,6161	0,2539
Ca++ Hiver (mg/l)	0,0439	0,2677	0,2323	0,3250	0,0965	0,2748	0,0138	1,0000	0,1417	0,1057	0,2177	0,3065	0,2493	0,0360	0,4119	0,2457	0,3262	0,0995	0,2803	0,0421	0,9998	0,1783	0,1192	0,2138	0,2876	0,2227	0,2117	0,0245	0,1989
Mg++ Hiver (mg/l)	-0,0565	0,1826	0,2726	0,1116	0,3555	0,1334	0,1844	0,1417	1,0000	0,0114	0,4247	0,3278	0,1425	-0,0231	0,0368	0,3061	0,1106	0,3565	0,1277	0,2124	0,1411	0,9273	0,0368	0,4450	0,3280	0,2550	0,0608	0,1328	0,2608
Na+ Hiver (mg/l)	-0,1642	0,0273	0,0806	0,1543	0,0111	0,2106	0,3588	0,1057	0,0114	1,0000	0,2946	0,1143	0,0408	-0,3114	0,0274	0,1634	0,1543	0,0132	0,2459	0,2890	0,1029	0,0398	0,9955	0,3090	0,1073	0,1165	0,0202	0,1116	0,1407
K+ Hiver (mg/l)	-0,2624	0,1296	0,1146	0,1628	0,3868	0,1944	0,1084	0,2177	0,4247	0,2946	1,0000	0,3823	0,0476	-0,2412	0,0331	0,1116	0,1649	0,3772	0,1448	0,1317	0,2173	0,4332	0,2640	0,9978	0,3794	0,0883	0,0222	0,2421	0,0008
NH4+ Hiver (mg/l)	-0,0954	0,0735	0,0980	0,2126	0,0600	0,2802	0,3579	0,3065	0,3278	0,1143	0,3823	1,0000	0,5055	-0,1388	0,2276	0,1270	0,2184	0,0527	0,3382	0,3780	0,3080	0,3491	0,0967	0,3775	0,9968	0,5728	0,4060	0,6061	0,4203
PO43- Hiver (mg/l)	-0,2892	0,0558	0,2438	0,0628	0,1156	0,1771	0,1838	0,2493	0,1425	0,0408	0,0476	0,5055	1,0000	-0,3159	0,1142	0,2689	0,0681	0,1086	0,1329	0,1730	0,2477	0,1313	0,0554	0,0398	0,5136	0,9694	0,6546	0,5471	0,0244
CE Eté (mS/cm)	0,9108	0,0101	0,3694	0,0791	0,0604	0,0482	0,0731	0,0360	0,0231	0,3114	0,2412	0,1388	0,3159	1,0000	0,1142	0,4493	0,0883	0,0614	0,1014	0,0771	0,0388	0,0067	0,3333	0,2313	0,1234	0,2774	0,3456	0,0811	0,0463
pH Eté	-0,1394	0,1421	0,1005	0,0036	0,0180	0,2769	0,0793	0,4119	0,0368	0,0274	0,0331	0,2276	0,1142	-0,1142	1,0000	0,0926	0,0101	0,0166	0,2564	0,0913	0,4137	0,0449	0,0214	0,0362	0,1925	0,0028	0,1242	0,0193	0,3240
Cl- Eté (mg/l)	0,4285	0,0357	0,9663	0,3067	0,3469	0,1233	0,2039	0,2457	0,3061	0,1634	0,1116	0,1270	0,2689	0,4493	0,0926	1,0000	0,3094	0,3410	0,1183	0,2111	0,2492	0,2633	0,1879	0,1041	0,1220	0,2948	0,3223	0,0857	0,1120
SO4- Eté (mg/l)	0,0478	0,0159	0,3784	0,9993	0,0951	0,0513	0,0144	0,3262	0,1106	0,1543	0,1649	0,2184	0,0681	-0,0883	0,0101	0,3094	1,0000	0,0958	0,0380	0,0178	0,3221	0,0213	0,1646	0,1691	0,2253	0,0463	0,0071	0,2072	0,3086
HCO3- Eté (mg/l)	-0,1138	0,0863	0,2899	0,0956	0,9992	0,3790	0,3075	0,0995	0,3565	0,0132	0,3772	0,0527	0,1086	-0,0614	0,0166	0,3410	0,0958	1,0000	0,2842	0,3130	0,1009	0,3716	0,0292	0,3903	0,0399	0,0677	0,0121	0,1125	0,0696
NO3- Eté (mg/l)	0,0806	0,1257	0,0789	0,0409	0,2821	0,9724	0,1365	0,2803	0,1277	0,2459	0,1448	0,3382	0,1329	0,1014	0,2564	0,1183	0,0380	0,2842	1,0000	0,1776	0,2752	0,1684	0,2127	0,1691	0,3184	0,0399	0,0992	0,1054	0,2902
NO2- Eté (mg/l)	-0,1302	0,0173	0,2175	0,0209	0,3184	0,1939	0,9836	0,0421	0,2124	0,2890	0,1317	0,3780	0,1730	-0,0771	0,0913	0,2111	0,0178	0,3130	0,1776	1,0000	0,0462	0,2409	0,2979	0,1176	0,3788	0,1981	0,3547	0,6725	0,3267
Ca++ Eté (mg/l)	0,0420	0,2615	0,2330	0,3212	0,0978	0,2703	0,0189	0,9998	0,1411	0,1029	0,2173	0,3080	0,2477	0,0388	0,4137	0,2492	0,3221	0,1009	0,2752	0,0462	1,0000	0,1776	0,1159	0,2133	0,2893	0,2208	0,2062	0,0209	0,2013
Mg++ Eté (mg/l)	-0,0256	0,1332	0,2273	0,0123	0,3706	0,1685	0,2137	0,1783	0,9273	0,0398	0,4332	0,3491	0,1313	0,0067	0,0449	0,2633	0,0213	0,3716	0,1684	0,2409	0,1776	1,0000	0,0608	0,4531	0,3463	0,2301	0,0154	0,1212	0,2615
Na+ Eté (mg/l)	-0,1851	0,0106	0,1034	0,1648	0,0281	0,1787	0,3659	0,1192	0,0368	0,9955	0,2640	0,0967	0,0554	-0,3333	0,0214	0,1879	0,1646	0,0292	0,2127	0,2979	0,1159	0,0608	1,0000	0,2770	0,0908	0,1275	0,0017	0,1227	0,1168
K+ Eté (mg/l)	-0,2491	0,1327	0,1068	0,1667	0,3986	0,2164	0,0922	0,2138	0,4450	0,3090	0,9978	0,3775	0,0398	-0,2313	0,0362	0,1041	0,1691	0,3903	0,1691	0,1176	0,2133	0,4531	0,2770	1,0000	0,3746	0,0868	0,0094	0,2303	0,0089
NH4+ Eté (mg/l)	-0,0802	0,0802	0,0947	0,2201	0,0467	0,2565	0,3605	0,2876	0,3280	0,1073	0,3794	0,9968	0,5136	-0,1234	0,1925	0,1220	0,2253	0,0399	0,3184	0,3788	0,2893	0,3463	0,0908	0,3746	1,0000	0,5769	0,3924	0,6024	0,4143
PO43- Eté (mg/l)	-0,2650	0,0036	0,2721	0,0399	0,0747	0,0871	0,2004	0,2227	0,2550	0,1165	0,0883	0,5728	0,9694	-0,2774	0,0028	0,2948	0,0463	0,0677	0,0399	0,1981	0,2208	0,2301	0,1275	0,0868	0,5769	1,0000	0,6945	0,5887	0,1038
DBO 5 Hiver (mg/l)	-0,3562	0,0933	0,3188	0,0030	0,0125	0,0985	0,3506	0,2117	0,0608	0,0202	0,0222	0,4060	0,6546	-0,3456	0,1242	0,3223	0,0071	0,0121	0,0992	0,3547	0,2062	0,0154	0,0017	0,0094	0,3924	0,6945	1,0000	0,5982	0,1734
DCO Hiver (mg/l)	-0,0946	0,0869	0,0702	0,2034	0,1179	0,0704	0,6161	0,0245	0,1328	0,1116	0,2421	0,6061	0,5471	-0,0811	0,0193	0,0857	0,2072	0,1125	0,1054	0,6725	0,0209	0,1212	0,1227	0,2303	0,6024	0,5887	0,5982	1,0000	0,4225
O2 Hiver (mg/l)	-0,1096	0,1571	0,1395	0,3066	0,0723	0,2462	0,2539	0,1989	0,2608	0,1407	0,0008	0,4203	0,0244	-0,0463	0,3240	0,1120	0,3086	0,0696	0,2902	0,3267	0,2013	0,2615	0,1168	0,0089	0,4143	0,1038	0,1734	0,4225	1,0000

Annexe

Valeur propre	490,8013	33,4651	0,0000
Discrimination (%)	93,6168	6,3832	0,0000
% cumulé	93,6168	100,0000	100,0000

Projection des variables sur les axes F1 et F2





Barycentres des variables

Annexe 21 : Test de Newman-Keuls (SNK) pour l'analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95%.

Variables	Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
Conductivité électrique	EUE vs non irriguée	-42,3500	-1,3551	2,4655	0,3768	Non
	EUE vs EC	-11,8115	-0,4734	2,0423	0,6394	Non
	EC vs non irriguée	-30,5385	-1,3895	2,0423	0,1749	Non
pH	EUE vs non irriguée	-0,1083	-0,5858	2,4655	0,8287	Non
	EUE vs EC	-0,0795	-0,5384	2,0423	0,5943	Non
	EC vs non irriguée	-0,0288	-0,2218	2,0423	0,8260	Non
Chlore	EUE vs non irriguée	-33183,8800	-1,3060	2,4655	0,4029	Non
	EUE vs EC	-17440,7265	-0,8598	2,0423	0,3967	Non
	EC vs non irriguée	-15743,1535	-0,8811	2,0423	0,3853	Non
Sulfates	non irriguée vs EUE	-1365,2500	-0,7926	2,4655	0,7104	Non
	non irriguée vs EC	-482,2731	-0,3981	2,0423	0,6934	Non
	EC vs EUE	-882,9769	-0,6421	2,0423	0,5257	Non
Bicarbonates	non irriguée vs EUE	-219,0833	-1,9056	2,4655	0,1546	Non
	non irriguée vs EC	-31,3577	-0,3879	2,0423	0,7009	Non
	EC vs EUE	-187,7256	-2,0453	2,0423	0,0497	Non
Nitrates	non irriguée vs EUE	-0,2133	-1,2833	2,4655	0,4154	Non
	non irriguée vs EC	-0,1120	-0,9581	2,0423	0,3457	Non
	EC vs EUE	-0,1013	-0,7635	2,0423	0,4511	Non
Nitrites	non irriguée vs EC	-0,2290	-2,2774	2,4655	0,0746	Non
	non irriguée vs EUE	-0,1215	-0,8499	2,0423	0,4021	Non
	EUE vs EC	-0,1075	-0,9415	2,0423	0,3540	Non
Calcium	EUE vs non irriguée	-2004,3667	-1,4979	2,4655	0,3062	Non
	EUE vs EC	-1046,7244	-0,9798	2,0423	0,3350	Non
	EC vs non irriguée	-957,6423	-1,0177	2,0423	0,3169	Non
Magnésium	EUE vs non irriguée	-439,1750	-0,7830	2,4655	0,7162	Non
	EUE vs EC	-216,2846	-0,4830	2,0423	0,6326	Non
	EC vs non irriguée	-222,8904	-0,5651	2,0423	0,5762	Non
Sodium	EUE vs EC	-1251,1790	-0,4326	2,4655	0,9023	Non

Annexe

	EUE vs non irriguée	-879,0067	-0,2427	2,0423	0,8099	Non
	non irriguée vs EC	-372,1723	-0,1461	2,0423	0,8848	Non
Potassium	EC vs EUE	-290,9385	-0,4556	2,4655	0,8923	Non
	EC vs non irriguée	-197,8385	-0,3517	2,0423	0,7275	Non
	non irriguée vs EUE	-93,1000	-0,1164	2,0423	0,9081	Non
Ammonium	non irriguée vs EUE	-4,3317	-3,4462	2,4655	0,0047	Oui
	non irriguée vs EC	-3,0962	-3,5028	2,0423	0,0015	Oui
	EC vs EUE	-1,2355	-1,2312	2,0423	0,2278	Non
Phosphates	non irriguée vs EUE	-0,2398	-9,6844	2,4655	< 0.0001	Oui
	non irriguée vs EC	-0,1477	-8,4786	2,0423	< 0.0001	Oui
	EC vs EUE	-0,0922	-4,6624	2,0423	< 0.0001	Oui
DBO5	non irriguée vs EC	-21,1154	-9,5291	2,4655	< 0.0001	Oui
	non irriguée vs EUE	-17,0000	-5,3950	2,0423	< 0.0001	Oui
	EUE vs EC	-4,1154	-1,6359	2,0423	0,1123	Non
DCO	non irriguée vs EUE	-23,8333	-4,4004	2,4655	0,0004	Oui
	non irriguée vs EC	-23,4615	-6,1600	2,0423	< 0.0001	Oui
	EC vs EUE	-0,3718	-0,0860	2,0423	0,9321	Non
Oxygène dissous	non irriguée vs EUE	-0,5833	-1,6718	2,4655	0,2324	Non
	non irriguée vs EC	-0,2038	-0,8308	2,0423	0,4127	Non
	EC vs EUE	-0,3795	-1,3623	2,0423	0,1833	Non

EUE : Sites irriguées par les eaux épurées

EC : Sites irriguées par les eaux conventionnelles

Annexe 22. Synthèse des comparaisons multiples par paires (Newman-Keuls (SNK))

Variables	Modalité	Moyenne estimée	Groupes		
Conductivité électrique	EUE	75,0000	A		
	EC	86,8115	A		
	non irriguée	117,3500	A		
pH	EUE	7,5667	A		
	EC	7,6462	A		
	non irriguée	7,6750	A		
Chlore	EUE	9930,9200	A		
	EC	27371,6465	A		
	non irriguée	43114,8000	A		
Sulfates	non irriguée	3020,7500	A		
	EC	3503,0231	A		
	EUE	4386,0000	A		
Bicarbonates	non irriguée	164,2500	A		
	EC	195,6077	A		
	EUE	383,3333	A		
Nitrates	non irriguée	0,4700	A		
	EC	0,5820	A		
	EUE	0,6833	A		
Nitrites	non irriguée	0,0365	A		
	EUE	0,1580	A		
	EC	0,2655	A		
Calcium	EUE	1341,3333	A		
	EC	2388,0577	A		
	non irriguée	3345,7000	A		
Magnésium	EUE	457,7000	A		
	EC	673,9846	A		
	non irriguée	896,8750	A		
Sodium	EUE	5250,7333	A		
	non irriguée	6129,7400	A		
	EC	6501,9123	A		

Annexe

Potassium	EC	1790,1615	A		
	non irriguée	1988,0000	A		
	EUE	2081,1000	A		
Ammonium	non irriguée	0,1550	A		
	EC	3,2512		B	
	EUE	4,4867		B	
Phosphates	non irriguée	0,0035	A		
	EC	0,1512		B	
	EUE	0,2433			C
DBO5	non irriguée	18,0000	A		
	EUE	35,0000		B	
	EC	39,1154		B	
DCO	non irriguée	44,5000	A		
	EC	67,9615		B	
	EUE	68,3333		B	
Oxygène dissous	non irriguée	2,3500	A		
	EC	2,5538	A		
	EUE	2,9333	A		

Annexe 23. Qualité physicochimique des eaux phréatiques par site dans le périmètre agricole Nord de la STEP de Ouargla Sid Otba (entre 2015-2019).

Mode d'irrigation	Site d'étude	Conductivité E _c		pH		Oxygène dissous		Sodium		Potassium		Ammonium		Phosphore		DBO5; DCO		Chlore		Sulfates		Bicarbonates		Nitrates		Nitrites		Ca		Mg		SAR
		Moyens	Ecartype	Moyens	Ecartype	Moyens	Ecartype	Moyens	Ecartype	Moyens	Ecartype	Moyens	Ecartype	Moyens	Ecartype	DBO5	DCO	Moyens	Ecartype	Moyens	Ecartype	Moyens	Ecartype	Moyens	Ecartype	Moyens	Ecartype	Moyens	Ecartype	Moyens	Ecartype	
Sites irriguées par les eaux épurées	P 1	106,60	2,64	7,62	0,19	4,65	0,92	28150,67	17936,75	2841,17	1593,02	4,49	2,04	0,11	0,01	40	95	18100,68	4153,36	6722,83	1021,90	163,66	101,94	0,18	0,04	0,61	0,31	4722,13	1839,58	403,23	192,06	556,09
	P 2	110,98	0,92	7,65	0,22	4,70	0,57	21082,67	13482,30	1929,00	681,97	3,71	1,82	0,11	0,01	41	80	55392,78	17612,84	2764,50	1274,05	64,84	27,63	0,46	0,17	0,45	0,04	4112,83	2110,53	479,83	250,00	439,96
	P 3	89,50	0,55	7,77	0,12	4,30	0,14	11408,20	8778,68	1409,15	218,57	2,71	0,91	0,22	0,02	41	82	23389,59	9629,10	1751,75	246,96	75,12	25,01	0,23	0,10	0,34	0,13	1769,72	2570,01	249,02	202,67	359,08
	P 4	71,03	1,52	7,87	0,29	5,20	0,42	7740,22	4150,98	2306,52	1017,03	2,03	1,14	0,21	0,01	40	60	13502,57	3367,45	1621,67	166,63	108,60	20,93	0,40	0,20	0,27	0,23	4283,30	3984,27	630,25	544,63	156,16
	P 5	67,12	1,54	8,00	0,27	4,45	0,35	3842,47	2379,43	1475,33	1026,04	3,67	2,37	0,12	0,03	42	64	9702,28	600,19	2869,67	984,16	181,80	27,96	0,36	0,11	0,14	0,05	5921,20	960,25	544,91	66,85	67,58
	P 6	78,68	1,15	7,92	0,21	4,60	0,00	3623,12	73,42	2099,98	1846,89	5,81	1,33	0,21	0,01	39	61	18380,80	7881,87	1980,00	1063,56	172,75	18,49	0,44	0,10	0,21	0,03	2424,05	765,85	415,18	494,66	96,16
	P 7	76,63	1,86	7,85	0,19	5,10	0,85	2266,87	1169,64	1668,88	1203,70	2,36	2,13	0,11	0,01	38	62	12423,95	6063,04	1366,83	445,95	243,00	39,62	0,58	0,24	0,18	0,05	1209,50	547,09	127,44	4,22	87,68
	P 11	24,27	1,13	7,68	0,26	4,30	1,41	8918,48	3179,69	3492,50	2072,84	2,77	2,05	0,24	0,01	37	65	29182,55	31733,33	3089,83	1066,42	477,35	187,89	0,32	0,12	0,07	0,07	1589,88	506,05	618,02	454,83	268,42
	P 12	107,75	3,52	7,83	0,20	4,85	0,21	11433,47	10534,45	2229,45	804,89	2,33	2,01	0,21	0,01	33	68	26085,40	31288,76	2415,33	687,02	347,93	61,44	0,62	0,16	0,10	0,05	1705,10	577,69	528,98	393,45	342,09
	P 13	105,42	4,55	7,92	0,19	4,95	0,92	14084,75	14752,95	1279,55	540,17	2,74	0,66	0,27	0,01	35	72	31425,29	23897,74	611,00	99,52	192,11	58,47	0,61	0,11	0,14	0,03	1756,27	443,21	479,99	477,23	421,21
	P 20	22,97	1,35	7,67	0,21	5,55	0,21	18776,98	10434,06	2389,33	1471,19	2,02	0,51	0,14	0,01	41	63	11614,72	1511,07	4747,33	476,89	182,39	108,32	0,57	0,17	0,25	0,22	3204,10	1714,80	232,37	78,28	452,99
	P 22	26,58	0,77	7,68	0,26	6,00	0,99	16940,90	12751,73	1413,83	348,28	2,14	1,84	0,16	0,01	42	68	49875,30	50814,93	4601,50	1499,29	122,69	6,69	0,67	0,32	0,33	0,02	4031,12	827,39	949,22	746,22	339,49
	P 26	108,98	1,88	7,67	0,16	4,95	0,35	7463,13	5564,51	866,18	517,30	2,67	1,13	0,14	0,01	41	63	27937,72	30863,23	2181,58	726,56	152,87	91,92	0,26	0,19	0,22	0,11	1052,96	1322,31	681,24	356,85	253,45
	P 27	98,38	3,49	7,68	0,19	4,85	0,78	8280,52	13260,34	423,90	142,21	1,86	0,42	0,19	0,01	42	68	23769,37	25858,65	1578,67	262,72	255,50	155,45	0,46	0,10	0,17	0,10	2021,45	1342,99	215,86	127,14	247,58
	P 28	45,13	1,43	7,78	0,12	5,45	0,35	8566,38	9047,45	2740,67	1388,29	3,67	2,27	0,18	0,01	40	69	27918,64	25003,32	2431,25	923,54	153,66	39,30	0,63	0,22	0,14	0,10	2873,80	2624,37	574,55	452,25	206,30
	P 29	132,33	1,23	7,65	0,24	4,80	1,98	6665,17	2905,24	1314,72	466,08	1,62	1,28	0,15	0,00	42	67	15973,40	1693,47	4068,67	1875,59	432,79	178,13	0,84	0,11	0,14	0,25	2255,07	1742,51	1057,22	367,14	163,78
	P 33	130,07	0,83	7,72	0,20	5,20	0,71	21377,69	19837,85	2371,57	2571,62	3,38	1,66	0,17	0,00	40	69	30311,96	29776,58	3548,67	1763,13	172,82	85,08	0,68	0,19	0,22	0,13	2227,58	942,63	539,01	587,51	574,78
Sites irriguées par les eaux conventionnelles	P 8	125,73	0,85	7,55	0,32	5,05	0,35	6054,05	3253,44	2321,60	874,26	1,14	0,84	0,12	0,02	37	63	13653,89	6039,59	3816,67	1255,98	178,09	38,97	0,67	0,18	0,06	0,07	1688,78	1050,34	230,22	146,43	195,44
	P 9	118,47	2,11	7,50	0,23	5,35	0,21	7957,13	1587,32	2647,85	1325,42	0,53	0,37	0,17	0,01	36	67	15538,78	1427,63	3570,33	2064,04	171,97	17,06	0,74	0,24	0,16	0,13	2324,75	933,64	169,33	69,05	225,33
	P 10	22,67	1,03	7,57	0,21	4,95	0,49	5711,82	6457,48	1140,70	180,17	2,81	1,56	0,18	0,01	36	69	16103,61	5565,76	6595,67	1231,92	151,53	81,19	0,28	0,08	0,08	0,08	4743,13	2653,72	457,47	253,68	112,01
	P 15	133,70	1,72	7,70	0,20	5	0,71	7377,92	1945,02	2521,07	1988,67	2,62	1,68	0,12	0,01	20	75	14659,93	2460,45	6504,67	2833,92	267,33	94,70	0,60	0,07	0,19	0,06	2724,79	572,87	260,52	276,64	190,97
	P 17	21,08	4,32	7,68	0,23	4	0,85	21859,15	9608,52	2228,33	685,44	2,99	1,11	0,16	0,01	36	65	54253,73	25945,62	6143,33	2274,69	141,21	112,17	0,37	0,12	0,10	0,06	3073,47	1719,26	204,23	66,96	539,96
	P 19	131,00	2,00	7,70	0,19	5,05	0,78	12360,33	4558,64	1431,83	631,07	1,59	1,35	0,15	0,01	35	68	14563,11	1704,52	4212,50	1854,30	137,20	19,35	0,48	0,13	0,36	0,14	2989,03	2282,50	218,31	181,22	308,65
	P 21	23,07	1,57	7,75	0,28	5,35	0,35	21476,50	18000,14	3506,17	1139,88	1,80	0,71	0,15	0,01	42	67	16126,98	2905,57	2626,33	1745,27	104,95	75,10	0,45	0,27	0,25	0,05	1762,91	483,91	831,78	729,19	596,26
	P 23	29,90	1,03	7,58	0,17	4,95	0,64	10127,80	4526,70	2483,67	840,42	1,82	0,81	0,12	0,01	41	61	25012,25	17895,69	2034,33	673,16	220,76	139,85	0,75	0,32	0,07	0,04	4055,22	2634,02	852,05	610,44	204,46
	P 25	37,73	31,79	7,70	0,32	4,9	0,57	2650,70	1665,06	3724,17	2076,81	0,46	0,26	0,15	0,01	42	64	40460,39	18756,53	1848,83	459,73	290,23	133,81	0,48	0,13	0,18	0,11	1117,19	1109,91	378,07	88,26	96,94
	P 30	144,50	1,03	7,67	0,21	4,1	0,71	14096,28	7152,07	2625,60	2110,65	1,35	1,40	0,15	0,01	41	64	18581,59	4368,17	2716,67	1620,77	171,60	70,67	0,40	0,21	0,18	0,15	2247,25	2087,76	617,51	389,76	372,46
	P 31	111,58	1,36	7,72	0,19	4,15	1,06	19039,22	13972,24	2427,88	904,96	1,20	0,93	0,15	0,01	40	65	41326,64	37008,10	2384,00	1198,66	252,47	108,70	0,42	0,30	0,13	0,10	2012,40	668,68	580,00	679,81	528,83
	P 32	119,62	3,56	7,65	0,16	4,15	0,92	17831,55	13468,45	2035,50	1000,91	3,24	2,68	0,18	0,01	42	68	50987,82	34607,28	2019,33	925,95	115,51	91,77	0,51	0,25	0,25	0,16	3145,09	1955,66	639,95	443,68	409,89
Sites non irriguées	P 14	47,60	6,46	7,82	0,10	4,9	0,42	5694,67	637,97	5031,77	1332,13	1,65	2,32	0,00	0,00	18	45	16248,06	2661,23	3832,50	1516,38	76,53	14,99	0,50	0,20	0,05	0,03	1634,28	33,39	302,10	168,22	183,02
	P 16	142,17	3,57	7,70	0,14	5,45	0,21	6154,98	6920,92	1330,12	62,34	2,75	2,04	0,00	0,00	18	43	11874,20	1605,34	3480,17	1405,20	178,05	29,36	0,46	0,13	0,13	0,13	4982,57	1737,82	973,17	296,63	112,79
	P 18	121,52	0,93	7,75	0,16	4,3	1,56	9855,44	3932,64	1696,90	272,69	1,22	1,50	0,00	0,00	19	48	15671,83	1138,00	2286,33	622,39	167,64	122,38	0,37	0,06	0,09	0,05	3396,36	1001,86	476,80	563,96	223,95
	P 24	148,30	7,00	7,50	0,09	4	1,13	9619,97	7032,22	2446,83	1701,14	1,23	1,48	0,00	0,00	17	42	27200,03	14612,58	1706,75	497,16	221,12	117,86	0,31	0,13	0,06	0,09	4953,05	2821,21	511,31	258,19	184,04

Annexe 8. Variation spatiotemporelle moyens de la qualité physicochimique des eaux phréatiques dans le périmètre agricole Nord de la STEP de Ouargla (entre 2015-2019)

Sites d'études	EUE	EC	SNI	Sites d'études	EUE	EC	SNI	Sites d'études	EUE	EC	SNI			
Conductivité Hiver 2015		83,82	82,55	113,125	pH Hiver 2015		7,74	7,79	7,65	Sodium Hiver 2015		17210	18017,5	13649,75
Conductivité Hiver 2017		83,82	82,55	113,125	pH Hiver 2017		7,76	7,71	7,6	SodiumHiver 2017		16644,41	18399,58	14621,25
Conductivité Hiver 2018		85,28	83,49411765	115,175	pH Hiver 2018		7,81	7,70	7,75	Sodium Hiver 2018		10394,68	9494,75	8447,581
Conductivité Hiver 2019		85,28	83,49411765	115,175	pH Hiver 2019		7,67	7,59	7,7	Sodium Hiver 2019		5775,730	7217,875	6381,97
Moyen		84,55	83,02	114,15	Moyen		7,75	7,70	7,68	Moyen		12506,21	13282,43	10775,14
Ecartype		0,85	0,55	1,18	Ecartype		0,06	0,08	0,06	Ecartype		5446,96	5765,75	3990,55
Conductivité Eté 2015		82,79	82,17	112,325	pH Eté 2015		7,85	7,58	7,8	Sodium Eté 2015		15123,94	13499,33	15103,63
Conductivité Eté 2019		88,53	80,72	120,45	pH Eté 2019		7,73	7,52	7,65	Sodium Eté 2019		5658,879	6642,18	6165,29
Moyen		85,663	81,447	116,388	Moyen		7,79	7,55	7,73	Moyen		10391,41	10070,76	10634,46
Ecartype		4,060	1,023	5,745	Ecartype		0,09	0,04	0,11	Ecartype		6692,81	4848,74	6320,36
Sites d'études	EUE	EC	SNI	Sites d'études	EUE	EC	SNI	Sites d'études	EUE	EC	SNI			
Ammonium Hiver 2015		2,52	1,03	1,02	Chlorure Hiver 2015		36015,32	31076,15	14988,24	Sulfates Hiver 2015		2893,23	4634,66	2006,25
Ammonium Hiver 2017		2,51	1,63	2,99	Chlorure Hiver 2017		36925,17	33432,61	14362,24	Sulfates Hiver 2017		3006,38	4383,75	2153,125
Ammonium Hiver 2018		2,63	1,50	1,96	Chlorure Hiver 2018		15022,29	22398,13	16080,55	Sulfates Hiver 2018		2394,705	3050,25	3191,25
Ammonium Hiver 2019		3,84	2,73	0,16	Sodium Hiver 2019		14596,52	20859,54	20864,8	sulfates Hiver 2019		3014,917	3239,41	3020,75
Moyen		2,88	1,72	1,53	Moyen		25639,83	26941,61	16573,96	Moyen		2827,31	3827,02	2592,84
Ecartype		0,64	0,72	1,22	Ecartype		12512,61	6241,32	2947,36	Ecartype		293,69	798,10	599,62
Ammonium Eté 2015		2,40	1,29	2,02	Chlorure Eté 2015		33315,9971	35417,863	16103,4333	Sulfates Eté 2015		2736,911765	3737,33333	3613,5
Ammonium Eté 2019		3,74	2,60	0,14	Chlorure Eté 2019		14120,0909	17450,0377	24091,9	Sulfates Eté 2019		3018,935294	3190,91667	2973,75
Moyen		3,07	1,95	1,08	Moyen		23718,04	26433,95	20097,66	Moyen		2877,92	3464,13	3293,63
Ecartype		0,95	0,92	1,33	Ecartype		13573,55	12705,17	5648,69	Ecartype		199,42	386,37	452,37
Sites d'études	EUE	EC	SNI	Sites d'études	EUE	EC	SNI	Sites d'études	EUE	EC	SNI			
Nitrates Hiver 2015		0,43	0,41	0,274	Nitrites Hiver 2015		0,231	0,125	0,1375	calcium Hiver 2015		3150,26	2004,98	4261,9
Nitrates Hiver 2017		0,39	0,29	0,33	Nitrites Hiver 2017		0,209	0,131	0,145	calcium Hiver 2017		2991,538	2512,58	4040,45
Nitrates Hiver 2018		0,528	0,61	0,465	Nitrites Hiver 2018		0,217	0,2166	0,0665	calcium Hiver 2018		2865,55	2883,69	3447,52
Nitrates Hiver 2019		0,54	0,66	0,47	Nitrites Hiver 2019		0,274	0,200	0,0365	calcium Hiver 2019		2457,68	2376,90	3345,7
Moyen		0,48	0,50	0,38	Moyen		0,233	0,169	0,096	Moyen		2866,26	2444,54	3773,89
Ecartype		0,07	0,17	0,10	Ecartype		0,029	0,047	0,053	Ecartype		296,25	362,98	446,87
Nitrates Eté 2015		0,51	0,44	0,45	Nitrites Eté 2015		0,185	0,136	0,0675	calcium Eté 2015		2678,288	3792,69	4037,75
Nitrates Eté 2019		0,51	0,63	0,465	Nitrites Eté 2019		0,284	0,199	0,0295	calcium Eté 2019		2501,405	2371,15	3316,05
Moyen		0,52	0,54	0,46	Moyen		0,235	0,168	0,049	Moyen		2589,85	3081,92	3676,90
Ecartype		0,00	0,14	0,01	Ecartype		0,069	0,044	0,027	Ecartype		125,07	1005,18	510,32

Articles et conférences

Conférences internationales

Impact of agricultural treated wastewater reuse on phosphate fertilization of soils in Ouargla (northern algerian sahara). 2^{ed} international Conference on Sustainable Agriculture and Environment. 2015. Septembre 30- Octobre 3 2015. Konya, Turkey.

Impacts of agricultural reuse of treated wastewater on the microbiological quality of groundwater in Ouargla basin (Northern Algerian Sahara) 5^{ed} international Conference on Sustainable Agriculture and Environment. 2018. Octobre 4-7 2018, Hammamet, Tunisia.

Impacts of agricultural reuse of treated wastewater on the microbiological quality of groundwater in Ouargla basin (Northern Algerian Sahara). Second International conference on Hydrogeology & Environment. Faculty of hydrocarbons renewable energies & earth and universe sciences, University of Kasdi Merbah, Octobre 15-17 2019, Ouargla, Algeria.

Conférences Nationales

Diagnostic de l'état du périmètre phoenicicole irriguée par les eaux usées épurées à Ouargla. 7^{ème} workshop sur l'agriculture saharienne « potentialités agrobiologiques des sols : Problèmes posées et valorisation. 7 Mars 2018. Ouargla. Algérie. P 40.

Articles publiés :

Bouhanna A ; Daddi Bouhoun M ; Idder T. 2019. Impacts of treated wastewater on the halomorphic phoenicicultural environment in ouargla basin (Northern algerian sahara). International Journal of Sciences and Research , Ponte.2019. Vol. 75 | No. 7/1. Pp 13-23.

Situation de la reutilisation des eaux usees epurees en agriculture saharienne: cas de la cuvette de ouargla . Algerian journal of arid environment 39 vol. 5, n° 2, Décembre 2015: 38-49.

Résumé

Contribution à l'étude des impacts de la réutilisation agricole des eaux usées épurées sur la nappe phréatique : cas de la région de Ouargla

Notre travail a porté sur l'étude de des impacts de la réutilisation agricole des eaux épurées dans la cuvette de Ouargla sur les eaux de la nappe phréatique. Une étude comparative a été menée entre parcelles irriguées conventionnellement, non irriguées et irriguées avec des eaux non conventionnelles épurées au niveau d'un périmètre de mise en valeur. Notre approche des investigations administratives et sur terrain ainsi que l'étude expérimentale sur la pollution des eaux phréatique nous a permis de faire certaines conclusions. Les principaux résultats obtenus dans le cadre de cette recherche montrent que la nappe phréatique dans la zone d'étude est peu profonde inférieure à 3m, excessivement salé (moyen de $94,10 \pm 15,29 \text{ mS/cm}$) et peu alcalin (moyen $7,70 \pm 0,09$). Toutefois, il présente une pollution organique modéré à forte ($1,5 < \text{IPO} < 3,5$). Parallèlement, l'irrigation par les eaux épurées a influe l'augmentation des concentrations des germes microbiens des eaux phréatiques (moyen $35,6 \cdot 10^2 \text{ germes/100ml}$), ainsi que ces teneurs en métaux lourds notamment le cadmium ($0,213 \text{ mg/l}$). Au stade de cette étude, nous avons constaté que les eaux épurées posent quelques problèmes d'ordre physique, physico-chimique, chimique et biologique pour les eaux phréatique. La valorisation de ces eaux non conventionnelles traitées en agriculture nécessite une législation particulière qui prend en considération les particularités sanitaires et environnementales à Ouargla. Toutefois, la réutilisation des eaux épurées est recommandée pour combler le déficit hydrique après l'amélioration de leur qualité notamment par voie biologique.

Mots clés : Eaux épurées, agriculture, Nappe phréatique, Ouargla, Sahara.

ملخص

مساهمة في دراسة آثار إعادة الاستخدام الزراعي لمياه الصرف الصحي المعالجة على المياه الجوفية بورقلة

ركز عملنا على دراسة آثار إعادة الاستخدام الزراعي للمياه المعالجة في حوض ورقلة على المياه الجوفية. أجريت دراسة مقارنة بين اراضي زراعية مسقية بالمياه العادية، مساحات غير مسقية و اخرى مروية بالمياه المعالجة الغير تقليدية منقاة على مستوى محطة التنقية بورقلة. سمح لنا نهج الدراسة المتبع من خلال التحقيقات الإدارية والميدانية وكذلك الدراسة التجريبية حول تلوث المياه الجوفية بالتوصل إلى بعض الاستنتاجات. تظهر النتائج الرئيسية التي تم الحصول عليها كجزء من هذا البحث أن منسوب المياه في منطقة الدراسة ضحل يقل عن 3م، شديد الملوحة (معدل $94,10 \pm 15,29 \text{ mS/cm}$)، وليست قلوية (معدل $7,70 \pm 0,09$). ومع ذلك، فإنه يحتوي على تلوث عضوي معتدل حتى عالى ($1,5 < \text{IPO} < 3,5$). في الوقت نفسه، أثر الري بالمياه المعالجة على زيادة تركيزات الجراثيم الميكروبية في المياه الجوفية (معدل $35,6 \cdot 10^2 \text{ germes/100ml}$) وكذلك مستويات المعادن الثقيلة، ولا سيما الكاديوم ($0,213 \text{ mg/l}$). في هذه المرحلة من الدراسة، لاحظنا أن استخدام المياه المعالجة أدى لحدوث بعض التغيرات الفيزيائية، الفيزيو-كيميائية، الكيميائية والبيولوجية للمياه الجوفية. من جهة اخرى تثمين هذه المياه الغير تقليدية في الزراعة يتطلب تشريعات خاصة تأخذ بعين الاعتبار الخصائص الصحية والبيئية في ورقلة. ومع ذلك، يوصى بإعادة الاستخدام الزراعي لهذه المياه لتكملة النقص المائي بعد تحسين الجوده، ولا سيما بالواسطة الوسائل البيولوجية.

الكلمات المفتاحية: المياه المعالجة، الزراعة، المياه الجوفية، ورقلة، الصحراء.

Summary

Contribution to the study of the impacts of the agricultural reuse of treated wastewater on the groundwater in Ouargla

Our work focused on the study of the impacts of the agricultural reuse of the treated water on groundwater in Ouargla basin. A comparative study was conducted between plots irrigated conventionally, non-irrigated and irrigated with unconventional water at an agriculer perimeter. Our approach of administrative investigations as well as the experimental study on groundwater pollution allowed us to make some conclusions. The main results obtained in this research show that the groundwater in the study area is shallow at 3m, excessively salty ($94,10 \pm 15,29 \text{ mS/cm}$) and not very alkaline ($7,70 \pm 0,09$). However, it presents moderate to forte organic pollution ($1,5 < \text{IPO} < 3,5$). At the same time, irrigation with treated wastewater has influenced the increase in the concentrations of microbial germs in groundwater ($35,6 \cdot 10^2 \text{ germes/100ml}$) as well as the levels of heavy metals, particularly cadmium ($0,213 \text{ mg/l}$). At the stage of this study, we found that treated water poses some physical, physico-chemical, chemical and biological problems for groundwater. The valorization of these unconventional waters in agriculture requires a particular legislation which takes into sanitary and environmental repercussions in Ouargla. However, the reuse of treated water is recommended to make up the water deficit after the improvement of their quality, particularly by biological means.

Keywords: treated wastewater, agriculture, groundwater, Ouargla, Sahara.