الجمهـوريـــة الجـزائريـــــة الديمـــقراطيـــــة الشـعبيـــة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE OUARGLA

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Agronomiques

THESE
Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT en SCIENCES
Spécialité : Sciences Agronomiques
Option : Sciences du sol

Par : Mohamed Abdelmalek Khemgani

Thème

Effets de la nappe alluviale de l'Oued Zegrir sur la qualité des eaux et la salinisation des sols de l'oasis de Guerrara

Soutenue Publiquement le : 20 /01/2020

Devant le Jury Composé de :

CHELOUFI Hamid	**Professeur**	**Université de Ouargla**	**Président**
HAMDI AISSA Baelhadj	**Professeur**	**Université de Ouargla**	**Directeur de thèse**
ABDULRASOUL M Al-Omran	**Professeur**	**Univ. Roi Saud Riyadh**	**Co-promoteur**
BENSLAMA Mohamed	**Professeur**	**Université de Annaba**	**Rapporteur**
BENKHALIFA Mohamed	**Professeur**	**Univ. de Mostaganem**	**Rapporteur**
IDDER Mohamed Tahar	**Professeur**	**Université de Ouargla**	**Rapporteur**

Année universitaire :2019/2020

Remerciements

J'exprime mes vifs remerciements à mon directeur de thèse, le professeur Hamdi Aissa Baelhadj pour l'aide qu'il m'a apporté et son encouragement à finir ce travail.

Je suis extrêmement reconnaissant à mon co promoteur le professeur Abderasul El Omran de l'université du Roi Saoud – Riyad pour son aide précieux qu'il m'a apporté lors de mon stage au département sol de l'université du Roi Saoud Riyad , son soutien et son encouragement durant toutes les phases de réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements aux membres de jury : Messieurs le professeur Chelloufi Hamid, Benkhalifa Mohamed, Benslama Mohamed et Idder Mohamed Tahar, pour avoir accepté de faire party du jury.

J'adresse ma profonde reconnaissance à messieurs Gherab Djemoui, Bouzgag Brahim, Dadibouhoun Moustafa, Belaroussi Mohamed, Dada Moussa Mohamed Lakhdar du département des sciences agronomiques UKM Ouargla, le professeur Sukru Dursan, le docteur Mithat Derik et le docteur Ramazan Acar de l'université Selçuk – Konya en Turquie pour leurs aides, soutiens et encouragement à finir ce travail de recherche.

Ma profonde gratitude à Mme Khikhi Oumelkhir du CDARS- Ouargla, pour son aide à l'élaboration de ce travail.

Mes remerciements sont adressés également à l'ensemble des membres du laboratoire de recherche Bio Geo Chimie des zones désertiques – UKM Ouargla et particulièrement le directeur du laboratoire le professeur Hadj Mohamed Mahfoud pour son encouragement et son soutien durant la réalisation de cette thèse.

Je tiens à remercier monsieur Mansouri Salah et touts les gents de la commune de Guerrara pour leur aide pour la réalisation de ce travail.

A tous ce qui, de loin ou de prés, ont contribué directement ou indirectement à ce travail de recherche, j'adresse tous mes remerciements.

Je dédie finalement ce travail à ma famille qui m'a soutenue et supporté pendant toutes ces années de travail de recherche.

ملخص:
انشأت واحة القرارة على طبقة مياه جوفية ضحلة في غرين واد زقرير. واجه هذا النظام الايكولوجي عوائق جديدة مثل استخدام المياه الجوفية العميقة في الري، الإفراط في استعمال الأسمدة و تصريف مياه الصرف الصحي، مما اثر على نشاطه. الهدف من هذا البحث هو دراسة نوعية المياه في طبقة المياه الجوفية الغرينية وتأثيرها على التربة. هي دراسة هيدروديناميكية ، دراسة كيميائية لمياه طبقة المياه الجوفية الغرينية ، دراسة تربة منطقة الدراسة ودراسة تأثير هذه المياه في الري على التربة. لدراسة المياه ، تم اختيار أربع محطات في الواحة القديمة للقرارة ليتم أخذ عينات منها ثم تحليلها في المختبر وفقًا لإجراء معياري. التحليل الفيزيائي الكيميائي أظهر أن درجة الحموضة ودرجة الحرارة والتوصيل الكهربائي. ترتبط هذه المعايير بشدة مع تمعدن الماء الكلي. مياه طبقة المياه الجوفية الغرينية مالحة للغاية ، مع درجة الحموضة قلوية ، مع سحنة كيميائية كبريتية كلورية و كبريتية جيرية و مغنسية . أوضحت الدراسة البيومترية أن المياه لها نفس الخريطة بيزومترية خلال جميع فترات المراقبة وأن اتجاه سيران الماء هو الجنوب الغربي / الشمال الغربي والجنوب الغربي / الشمالي الغربي. فيما يتعلق بدراسة التربة وتأثير الري عليها ، فقد تم اختيار أربعة مواقع داخل بستان نخيل القرارة . في كل موقع لدينا مقطع في التربة لتعريف ووصف وتحليل وتصنيف التربة. لمراقبة تطور التربة ، أخذت عينات التربة بعد كل عملية ري ثم تم تحليلها في المختبر وفقًا للإجراء القياسي. في هذا السياق ، تُظهرالتحاليل المورفولوجية و التحليلية أن التربة ضعيفة الملوحة معتدلة (0.45 إلى 0.72دس/م في التربة غير المروية ومعتدلة إلى التربة ذات الملوحة العالية (1.03 إلى 2.45). دس.م) للتربة المروية. التربة قلوية بعض الشيء مع درجة الحموضة بين 7.36 و 7.8 ، مع قيم الجير حوالي 7.98 - 11.18 ٪ ، مع مستويات منخفضة إلى متوسطة من المواد العضوية (1.37 - 1.85 ٪) وبمستويات منخفضة من الجبس (1.85 - 11،05). تؤكد الدراسة التحليلية للتربة ومياه الري وتفاعلاتها أن ري التربة بهذه المياه لا يشكل خطرا بشرط توفر إدارة جيدة للري تسمح بغسيل الأملاح نحو الأسفل.
الكلمات المفتاحية:
طبقة المياه الضحلة، واد زقرير، التربة الغرينية، واحة ، القرارة

Résumé :

L'Oasis de Guerrara est plantée sur une nappe alluviale peu profonde dans l'alluvion de l'oued Zegrir. Cet écosystème c'est trouvé confronté à de nouvelles contraintes à savoir l'utilisation des nappes profondes en irrigation, l'utilisation excessive des engrais et les rejets des eaux d'épuration , qui ont influencé son fonctionnement. Le but de ce travail de recherche est d'étudier la qualité de l'eau de la nappe alluviale de Guerrara et son impact sur le sol. Il s'agit d'une étude hydrodynimaque, étude chimique des eaux de la nappe alluviale, étude des sols de la région d'étude et étude de l'impact de l'utilisation de cette eau en irrigation sur le sol. Pour l'étude des eaux, 30 puits ont été sélectionnés dans l'ancienne palmeraie de Guerrara afin d'être échantillonnés pour être ensuite analysés en laboratoire selon une procédure standard. L'analyse physico-chimique de l'eau a montré de nombreuses différences de pH, de température et de conductivité électrique. Ces paramètres sont fortement corrélés à la minéralisation totale de l'eau. Les eaux de la nappe alluviale sont trop salées, à pH neutre avec de facies chimique chloré sulfaté et sulfaté calcique et magnésium. L'étude piézométrique a montré que les eaux avaient le même aspect de carte piézométrique durant toutes les compagnes d'observation et que le sens d'écoulement était Sud-ouest /Nord-est. Concernant l'étude des sols et l'impact de l'irrigation par les eaux de la nappe alluviale sur le sol, quatre sites ont été sélectionnés à l'intérieur de la palmeraie de Guerrara. Dans chaque site nous creusé un profil de sol pour la description, les analyses et la classification des sols. Pour le suivi de l'évolution des sols, des échantillons de sol ont été prélevés après chaque irrigation, pour être ensuite analysés en laboratoire selon la procédure standard. Dans ce contexte l'étude morphologique et analytique du sol montre que le sol est faiblement à moyennement salé (0,45 à 0,72 dS / m) dans les sols non irrigués et moyennement à fortement salé (1,03 à 2,45 dS / m) pour les sols irrigués. Le sol est légèrement alcalin avec un pH compris entre 7,36 et 7,8, moyennement calcaire avec des valeurs de $CaCO_3$ d'environ 7,98 - 11,18%, avec des teneurs faibles à moyennes en matières organiques (1,37 - 1,85%) et avec de faibles teneurs en gypse (1,85 - 11.05). L'étude analytique des sols et de l'eau d'irrigation et leurs interactions confirment que l'irrigation des sols par cette eau ne constitue pas un gros problème pour le sol, à condition de disposer d'une bonne gestion de l'irrigation avec des quantités respectées et une fréquence suffisante, permettant la lixiviation des sels solubles en profondeur.

Mots clés : Nappe alluviale, l'Oued Zegrir, sols alluviaux, Oasis, Guerrara.

Abstract:

Guerrara Oasis is planted on a shallow alluvial aquifer in the Zegrir Wadi alluvium. This ecosystem found itself confronted with new constraints, namely the use of deep aquifers in irrigation, the excessive use of fertilizers and the discharge of sewage, which influenced its functioning. The aim of this research is to study the water quality of the Guerrara alluvial aquifer and its impact on soil. It is a hydrodynamic study, chemical study of the waters of the alluvial aquifer, soils study and study of the impact of the use of this water in irrigation on the soil. For the water study, 30 wells were selected in the old palm grove of Guerrara to be sampled and then analyzed in the laboratory according to a standard procedure. The physical chemical analysis of the water showed numerous differences in pH, temperature and electrical conductivity. These parameters are strongly correlated with total mineralization of water. The waters of the alluvial aquifer are too salty, with a neutral pH, with chlorinated sulphated and sulphated calcium and magnesium facies. The piezometric study showed that the waters had the same piezometric map appearance during all observation periods and that the direction of flow was Southwest / Northeast. With regard to the study of soils and the impact of water irrigation of the alluvial ground water, four sites have been selected within the Guerrara palm grove. In each site we dug a soil profile for the description, analysis and classification of soils. To monitor soil evolution, soil samples were taken after each irrigation and then analyzed in the laboratory according to the standard procedure. In this context, the morphological and analytical soil study shows that the soil is weakly to moderately saline (0.45 to 0.72 dS / m) in the non-irrigated and moderately to high- saline soils (1.03 to 2.45). dS / m) for irrigated soil. The soil is slightly alkaline with a pH between 7.36 and 7.8, moderately calcareous with CaCO3 values of about 7.98 - 11.18%, with low to medium levels of organic matter (1.37 - 1.85%) and with low levels of gypsum (1.85 - 11.05). The analytical study of soil and irrigation water and their interactions confirm that the irrigation of soils by this water is not a big problem for the soil, provided to have a good management of irrigation with quantities respected and a sufficient frequency, allowing the leaching of salts in depth.

Key words: Alluvial groundwater, Zegrir wadi, , alluvial soils, Oasis, Guerrara.

Liste des abréviations

C.D.A.R.S: Commissariat au Développement de l'Agriculture dans les Régions Sahariennes.

F.A.O: Food and Agriculture Organization.

O.N.M : Office national de météorologie.

O.M.S : Organisation mondiale de santé

M.O: Matière organique

C.E : Conductivité électrique

Prof.: Profondeur

A: Argile

Lf: Limon fin

Lg: Limon grossier

Sf: Sable fin

Sg: Sable grossier

CNEPRU : Comité National d'Evaluation et de Programmation de la Recherche Universitaires

DGRST : Direction Générale de la Recherche Scientifique et Technique.

Liste des figures

Numéro	Titre	Page
1	Les sols alluviaux dans la classification Française (CPCS, 1967)	**8**
2	Les sols alluviaux dans la classification Américaine (USDA, 1998)	**9**
3	Répartition des sols alluviaux par continent (F.A.O, 1993)	**10**
4	Situation géographique de Guerrara	**13**
5	Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN de Ghardaïa	**17**
6	Diagramme d'Emberger de la région de Ghardaïa	**18**
7	Carte géologique de Ghardaïa	**20**
8	Carte du réseau hydrographique du bassin de M'Zab	**25**
9	Positionnement des profils dans la palmeraie	**31**
10	Répartition spatiale des puits à l'intérieur de la palmeraie de Guerrara	**36**
11	Carte piézométrique de la 1re compagne	**37**
12	Carte piézométrique de la 2ième compagne	**38**
13	Carte piézométrique de la 3ième compagne	**39**
14	Carte piézométrique de la 4ième compagne	**39**
15	Variation du niveau piézométrique durant la 1re et 2ième compagne	**40**
16	Evolution du niveau piézométrique durant la 1re et 2ième compagne	**41**
17	Fluctuation de la nappe durant les deux années d'observation	**41**
18	Fluctuation de la nappe durant la 1re, 3ième et 4ième compagne	**42**
19	Variation saisonnière du pH	**47**
20	Variation du pH de l'eau dans le temps	**47**
21	Evolution de la CE durant la 3ère compagne	**48**
22	Evolution de la CE durant la 4ième compagne	**48**
23	Carte iso-conductivité de la 1ère compagne	**49**
24	Carte iso-conductivité de la 3ième compagne	**50**
25	Carte iso-conductivité de la 4ième compagne	**50**
26	Carte iso-minéralisation durant la 1ère compagne	**51**
27	Carte iso-minéralisation durant la 2ième compagne	**52**
28	Relation résidus sec/conductivité électrique durant la 1ère compagne	**53**
29	Relation résidus sec/conductivité électrique durant la 2ième compagne	**54**
30	Relation minéralisation/profondeur de la nappe durant la 1ère compagne	**55**
31	Variation de la dureté des eaux durant la 3ième et 4ième compagnes	**56**
32	Variation des [Ca^{++}] des eaux de la 3ième et 4ième compagnes	**57**
33	Variation des [Mg^{++}] des eaux de la 3ième et 4ième compagnes	**58**
34	Variation des [Na^{+}] des eaux de la 3ième et 4ième compagnes	**59**
35	Variation des [K^{+}] des eaux de la 3ième et 4ième compagnes	**59**
36	Variation des [Bicarbonates] des eaux de la 3ième et 4ième compagnes	**60**
37	Variation [Sulfates] des eaux de la 3ième et 4ième compagnes	**61**
38	Variation [Cl^{-}] des eaux de la 3ième et 4ième compagnes	**62**
39	Evolution [No_3^{-}] des eaux (3ième et 4ième compagnes)	**63**
40	Diagramme de Piper de la 1ière cmpagne	**66**
41	Diagramme de Piper de la 2ième compagne	**67**
42	Diagramme de Schoêller-Berkaloff (1ière cmpagne)	**68**
43	Schéma représentatif de la détermination de l'origine du Ca^{2+}	**69**
44	Schéma représentatif de la détermination de l'origine du Na^{+}	**70**
45	Relation sulfate/calcium	**71**
46	Relation sulfate/magnésium	**71**

47	Représentation graphique des variables sur le plan factoriel (F1-F2)	**75**
48	Représentation graphique des variables sur le plan factoriel (F1-F4)	**75**
49	Représentation graphique des variables sur le plan factoriel (F1-F3)	**76**
50	Diagramme de Richards des eaux de la nappe alluviale ($1^{ière}$ compagne)	**78**
51	Diagramme de Richards des eaux de la nappe alluviale ($2^{ième}$ compagne)	**78**
52	Positionnement des profils dans la palmeraie	**83**
53	Diagramme de Piper des eaux d'irrigation	**91**
54	Diagramme de RIVERSIDE des eaux d'irrigation des quatre points	**92**
55	Evolution de la CE en fonction de la profondeur des profils (point A)	**95**
56	Evolution de la CE en fonction de la profondeur des profils (point B)	**96**
57	Evolution de la CE en fonction de la profondeur des profils (point C)	**96**
58	Evolution de la CE en fonction de la profondeur des profils (point D)	**97**
59	Evolution de la CE moyenne dans le temps	**98**
60	Evolution du pH en fonction de la profondeur des profils (point A)	**99**
61	Evolution du pH en fonction de la profondeur des profils (point B)	**99**
62	Variation du pH moyen des quatre points étudiés dans le temps	**100**

Liste des tableaux

Numéro	Titre	Page
I	Précipitations moyennes mensuelles pendent la période (1987/2012).	**14**
II	Températures moyennes mensuelles à Ghardaïa (1987/2012).	**15**
III	Températures et précipitations moyennes mensuelles à Ghardaïa (1987/2012).	**16**
IV	Vitesses de vents (m/s) à Ghardaïa (1987 -2012)	**18**
V	Humidité de l'air (H%) dans la région de Ghardaïa (1987 -2012)	**19**
VI	Présentation statistique des éléments chimique de la nappe	**46**
VII	Faciès chimique des eaux de la nappe alluviale de Guerrara	**65**
VIII	Matrice de corrélation entre paramètres chimiques	**73**
IX	Coefficients de corrélation entre variables et axes principaux	**74**
X	Evolution des classes d'eau d'irrigation selon la méthode de Richards	**79**
XI	Caractéristiques physiques et chimiques des sols étudiés	**88**
XII	Résultats des analyses physiques et chimiques des sols	**88**
XIII	Résultats des analyses des caractéristiques de l'eau d'irrigation	**90**

Liste des photographies

Numéro	Titre	Page
01	Profil A	**84**
02	Profil B	**85**
03	Profil C	**86**
04	Profil D	**87**

Tableau des annexes

Numéro	Titre	Page
1	Coordonnées géographiques des puits	**111**
2	Fluctuation saisonnière du niveau piézométrique de la nappe	**112**
3	Evolution saisonnière de la CE de l'eau	**113**
4	Evolution saisonnière du pH de l'eau	**114**
5	Les rapports caractéristiques des éléments chimiques de l'eau (2011/2012)	**115**
6	Les rapports caractéristiques des éléments chimiques de l'eau (2012/2013)	**116**
7	Indice d'échange de base (IEB)	**117**
8	SAR	**118**
9	La dureté totale de l'eau	**119**
10	Classe de la salinité en fonction de la CE et la somme des anions	**120**
11	Classification des eaux phréatiques	**120**
12	Indice croisé SAR/ conductivité	**121**
13	Classes des sols gypseux (BARZANJI , 1973)	**122**
14	Echelle de calcaire total (BAIZE, 2000)	**122**
15	Echelle de salinité de l'extrait 1/5 (SERVANT, 1975)	**122**
16	Echelle d'interprétation du pH de l'extrait 1/2,5 (BAIZE, 2000)	**122**
17	Echelle d'interprétation de la matière organique (MORAND, 2001)	**123**
18	Classes d'eau selon l'USSL(1954)	**123**
19	Bilan ionique de la 3^{ième} compagne	**124**
20	Bilan ionique de la 4^{ième} compagne	**125**
21	Résultats des analyses physico-chimiques des sols	**126**
22	Paramètres avec valeurs limites (normes de l'OMS, 2006) LENNTECH	**127**
23	Test de corrélation eau/sol	**128**

Table des matières

Titre	Page
Introduction	1
Chapitre I- Synthèse bibliographique	
I.1. La nappe alluviale	4
I.1.1. Relation nappe alluviale/cour d'eau	4
I.1.2. Etude de la nappe alluviale	5
I.1.2.1. Etude hydrodynamique (piézométrique)	5
I.1.2.2. Etude hydrogéochimique des eaux de la nappe	5
I.1.2.2.1. Origine et signification géochimique des éléments chimiques	5
I.2. Etude des sols	6
I.2.1. Généralités sur les sols alluviaux	6
I.2.1.1. Evolution des sols alluviaux	7
I.2.1.2. Classification des sols alluviaux	7
I.2.1.2.1. Classification française	7
I.2.1.2.2. Classification américaine	9
I.2.1.2.3. Classification de l'FAO	9
I.2.1.3. Répartition des sols alluviaux	10
I.2.1.3.1. Dans le monde	10
I.2.1.3.2. Dans les zones arides	10
I.3. Effet des irrigations sur le sol (salinisation)	11
Chapitre II- Contexte de l'étude	
II.1. Introduction	12
II.2. Situation géographique	12
II.3. Contexte climatique	14
II.3.1. Précipitations	14
II.3.2. Températures	15
II.3.2.1. Régime thermique	16
II.3.3. Vents	18
II.3.4. Humidité relative	19
II.4. Contexte géologique	19
II.4.1. Platforme saharienne	21
II.4.2. Description litho-stratigraphique	21
II.5. Contexte géomorphologique	22
II.6. Contexte hydrogéologique	23
II.6.1. Nappe du continental intercalaire	23
II.6.2. Nappe du complexe terminal	23
II.7. Hydrologie superficielle	24
II.7.1. Réseau hydrographique	24
II.8. Contexte pédologique	26
II.9. Contexte biologique	27
Chapitre III- Matériels et méthodes	
III.1. Introduction	28
III.2. Choix de la zone d'étude	28
III.2.1. Choix des sites et des puits à étudier	28

III.2.2. Matériels utilisés durant l'étude	29
III.3. Méthodologie de travail	30
III.3.1. Travail sur terrain	30
III.3.2. Méthodes d'analyse au laboratoire	31
III.3.2.1. Etude de la nappe	31
III.3.2.1.1. Paramètres physiques	31
III.3.2.1.2. Paramètres chimiques	32
III.3.2.2. Etude des sols	32
III.3.2.2.1. Granulométrie	32
III.3.2.2.2. Calcaire total	32
III.3.2.2.3. Gypse	33
III.3.2.2.4. Matière organique	33
III.3.2.2.5. CE	33
III.3.2.2.6. pH	33
III.3.2.2.7. Bilan ionique	33
III.3.2.3. Outils informatiques	34
Chapitre IV- Résultats et discussions	
IV.1. Etude de la nappe alluviale de Guerrara	35
IV.1.1. Etude hydrodynamique (piézométrique)	35
IV.1.1.1. Inventaire des points d'eau	35
IV.1.1.2. Piézométrie de la nappe	36
IV.1.1.2. 1. Fluctuation de la nappe	40
IV.1.1.3. Profondeur du réservoir	42
IV.1.1.4. Identification des paramètres en relation avec le niveau de la nappe	43
IV.1.1.5. Structure géochimique des eaux de la nappe	43
IV.1.2. Etude hydrogéochimique des eaux de la nappe	44
IV.1.2.1. Origine et signification des élément chimiques	45
IV.1.2.2. Description des paramètres physicochimiques	45
IV.1.2.2.1. Etude des paramètres physiques et physicochimiques	46
a. Température	46
b. pH	47
c. CE	48
d. Minéralisation	51
e. Relation résidu sec/CE	53
f. Relation résidu sec/ profondeur	54
g. Dureté totale	55
IV.1.2.2.2. Etude des paramètres chimiques	56
A.Cations	56
B.Anions	60
IV.1.2.3. Rapports caractéristiques	63
IV.1.2.4. Indice d'échange de base	64
IV.1.2.5. Détermination des principaux faciès	65
IV.1.2.6. Origine de chimisme des eaux	68
IV.1.2.7. Application d'analyses statistiques des résultats	72
IV.1.2.8. Qualités des eaux destinées aux activités agricoles	77
IV.1.3. Conclusion	81
IV.2. Etude des sols	83

IV.2.1. Etudes des profils de sol	83
IV.2.1.1. Description de l'environnement des profils	83
IV.2.1.2. Caractérisation morphologique et analytique des profils	83
IV.2.1.2.1. Description morphologique des profils de sol	84
IV.2.1.2.2. Description analytique	88
IV.2.1.3. Discussion des résultats	88
IV.2.2. Qualité des eaux d'irrigation	90
IV.2.2.1. Caractéristiques physiques des eaux	90
IV.2.2.1.1. Température	90
IV.2.2.1.2. pH	90
IV.2.2.1.3. CE	90
IV.2.2.2. Chimie et qualité de l'eau d'irrigation	91
IV.2.2..2.1. Bilan ionique	91
IV.2.2.2.2. Faciès chimique	91
IV.2.2.2.3. Degré d'aptitude à l'irrigation	92
IV.2.3.Conclusion	93
IV.3. Etude de l'impact des eaux de la nappe alluviale sur le sol	94
IV.3.1. Introduction	94
IV.3.2. Evolution de la CE	94
IV.3.2.1. Evolution de la CE en profondeur	94
IV.3.2.2. Evolution de la CE dans le temps	98
IV.3.3. Evolution du pH	99
IV.3.3.1. Evolution du pH en fonction de la profondeur	99
IV.3.4. Discussions	101
IV.3.5. Conclusion	103
Conclusion générale	104
Références bibliographiques	107
Annexes	111

Introduction générale

Introduction générale

En zones arides algériennes, les systèmes alluviaux constituent les principaux éléments de base de l'installation et de l'existence d'une agriculture oasienne particulière. En effet, les fluvisols, malgré très limités en surface, sont les sols les plus aptes pour la mise en culture dans ces régions. Dans ces alluvions apportés et déposés par les cours d'eau occasionnels, loge une nappe superficielle ou alluviale (nappe d'inféroflux) qui est formée dans le quaternaire comme unique ressource en eau potable et pour l'irrigation des palmeraies avant l'apparition des forages profonds vers les années cinquante.

L'Oasis de Guerrara constitue un exemple typique d'un système alluvial en zones arides, formé d'alluvions de l'Oued Zegrir et une nappe alluviale facilement captée par des puits de trois à trente mètres de profondeur. Cette nappe du quaternaire présente une formation piézométrique caractéristique dans la région. Le renouvellement de cette ressource est assuré par une recharge artificielle de l'aquifère qui dépend pour sa part des précipitations, de l'évapotranspiration et du ruissellement.

L'utilisation de la nappe profonde du continental intercalaire (Albien) comme source d'eau en irrigation, le passage du réseau d'assainissement à l'intérieur de la palmeraie, les pratiques culturales et l'activité urbaine et industrielle, ainsi que l'absence d'entretien des puits ont induit à une détérioration de la qualité des eaux de la nappe alluviale. Ceci peut influencer le sol et le couvert végétal au niveau de cette région.

En effet, les agriculteurs considèrent que la qualité des eaux de la nappe alluviale a changé et elle est inconvenable pour l'irrigation de plusieurs spéculations. Ils confirment que l'eau des puits est devenu de plus en plus salée ce qui leurs a poussé d'arrêter de l'utiliser en irrigation dans certains cas. Cette salinité des eaux de la nappe alluviale est considérée comme un problème pour la gestion des sols et de l'irrigation pour les agriculteurs.

Il faut noter que les crues occasionnelles de l'Oued Zegrir, malgré irrégulières, conditionnent le bon fonctionnement de ce système alluvial, en assurant la recharge naturelle de sa nappe et l'apport d'alluvions et le lessivage des sols de la palmeraie.

C'est à travers notre problématique que nous démontrons l'intérêt du thème comme une préoccupation de la zone de recherche et qui peut être défini en trois aspects suivants :

-Hydraulique ;

-Ecologique ;

- Agronomique.

Le présent travail a est réalisé dans le cadre du projet CNEPRU « Les sols du Bas-Sahara Approches agronomiques et écologiques » et du projet à impact socio-économique Val-Péd-Oasis «Valorisation des données pédologiques des oasis du Bas Sahara » de la DGRSDT.

L'objectif de la présente étude est de faire une approche sur le fonctionnement du système alluvial de l'ancienne palmeraie de Guerrara, en essayons d'étudier l'impact de la nappe alluviale de l'Oued Zegrir sur la qualité des eaux et la salinisation des sols, en étudiant l'évolution de la qualité chimique et hydrodynamique de cette nappe, ainsi que les caractéristiques physiques et chimiques des sols, en particulier le problème de salinisation des sols par les eaux de la nappe.

L'approche méthodologique envisagée pour notre étude montre les grands traits de notre travail de recherche. Il s'agit de :

- L'étude hydrodynamique de la nappe alluviale de Guerrara ; où nous avons essayé d'établir une étude piézométrique de la nappe, par des prélèvements et le suivi piézométrique sur plusieurs compagnes. Il s'agit de tracer des cartes piézométriques et de déterminer le sens d'écoulement de la nappe.
- L'étude géochimique de la nappe, par des analyses chimiques des échantillons d'eau prélevés de trente puits et sur deux compagnes ; CE, minéralisation, pH, bilan ionique et faciès chimique ;
- L'étude et la classification des sols de la palmeraie de Guerrara;
- L'étude de l'impact des eaux d'irrigation sur les sols en particulier le problème de salinisation, par échantillonnage et analyse au laboratoire du sol (CE, pH, bilan ionique) et d'eau d'irrigation (CE, pH), plus un suivi de l'évolution de la conductivité électrique du sol en relation avec l'irrigation.

Afin d'étudier les problématiques liés à notre objectif d'étude, nous avons essayé d'effectuer une recherche sur les travaux réalisés. Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'étude de la nappe superficielle et les sols alluviaux à travers plusieurs zones du monde. Parmi ces auteurs nous citons les travaux de JEGO , 2008 ; SORMAN et ABDULRAZZAK, 1993.

D'autres études sur la même thématique ont été menées en Algérie; à titre d'exemple on cite les travaux de DUTIL (1971) sur les sols et les paléosols du Sahara, POUGET

(1980) sur les steppes sud algéroises, HALITIM (1988) sur les sols des régions arides. D'autres études ont été menées dans le même contexte, tel que celles de AOUAM., 2007 ; KHADRAOUI., 2007 ; BRADAI., 2017 sur les sols de la plaine de Chelif.

Plusieurs études sur les sols alluviaux et la nappe superficielle ont été menées dans la région d'étude. Il s'agit des travaux de DJILI., 2004, 2018 ; YOUCEF., 2006, sur les aspects analytiques et morphologiques des sols alluviaux en zones arides (cas de la Dayet El Amied) ; HAMDI AISSA; 2008, ainsi que les travaux de HADJ-SAID et al 2008, 2011 ; et CHELLAT., 2015 sur la nappe alluviale de Guerrara.

A travers cet objectif qui va servir à une bonne politique agricole nous espérons contribuer à donner une idée sur l'état actuel de ce système complexe pour penser à une politique environnementale qui permet la préservation et la continuité d'un tel système typique pour le bon fonctionnement du système oasien au niveau de la région de Guerrara.

Partie I- Synthèse bibliographique

I.1. La nappe alluviale

La nappe alluviale est une nappe libre qui circule dans les alluvions de la rivière et qui se trouve à une profondeur faible, ce qui facilite son exploitation par des puits et des forages. Elle est caractérisée par la porosité des milieux qui détermine l'espace disponible pour l'eau, ses dimensions, sa hauteur, la vitesse et le sens d'écoulement (LENOBLE, 1995).

La nappe alluviale de Guerrara présente un intérêt très important dans le domaine agricole. Elle sert comme une source pour l'irrigation de la palmeraie de la région. Cette nappe est exploitée par des puits traditionnels et alimentée essentiellement par les eaux de pluies torrentielles. Les eaux de la nappe profonde (albien) de certains forages sont destinées à l'irrigation et l'alimentation en eau potable (KHADRAOUI, 2007).

Dans la région de Guerrara, la nappe superficielle est sollicitée par un grand nombre de puits traditionnels (1300 puits) utilisés en irrigation de la palmeraie (HADJ SAID et al, 2007)

Elle est formée d'alluvions et de sables du Quaternaire, constituées de galetas et des poudingues tapissant les lits des Oueds (KHADRAOUI, 2007).

I.1.1. Relation nappe alluviale/cours d'eau

La relation entre une nappe alluviale et le cours d'eau peut être identifiée par l'observation de la variation de charge près de la rivière; s'il y a une décroissance des charges vers les cours d'eau cela signifie qu'on est en situation d'un écoulement vers la rivière. Si par contre les charges sont croissantes on parle d'un écoulement rivière nappe (BANTON et BANGOY, 1999).

L'infiltration des eaux de crues de l'Oued et l'alimentation de la nappe sont liées à certaines propriétés du sol à savoir la texture, la structure, la conductivité hydraulique et la pression totale de l'eau.

D'après SORMAN et ABDULRAZZAK (1993), l'alimentation en eau des nappes alluviales dans les régions arides est intermittente en résulte des pertes de transmission des eaux de crue dans les lits dessellés des Oueds. Le volume d'eau qui alimente la nappe dépend principalement de la largeur du périmètre humidifié et de la durée de submersion. Nous notons qu'une partie importante des eaux des crues est perdue suite aux variations des débits en amont.

I.1.2. Etude de la nappe alluviale

Pour l'étude des eaux souterraines il est indispensable d'avoir une idée détaillée sur leurs caractéristiques (géométriques, physiques et chimiques), piézométrie, charges hydrauliques et écoulements (BANTON et BANGOY, 1999).

I.1.2.1. Etude hydrodynamique (piézométrique)

La piézométrie d'une nappe est la mesure de son état de charge. Alors que l'établissement de la carte piézométrique d'une nappe c'est la cartographie de l'énergie utilisable pour les écoulements. Pour une nappe libre, il s'agit de caractériser aussi l'état de remplissage de l'aquifère car la surface supérieure de l'eau change avec le régime de remplissage. Donc, c'est la cartographie du toit de la nappe. (BANTON et BANGOY, 1999).

I.1.2.2. Etude hydrogéochimique des eaux de la nappe

La géochimie des eaux apporte des renseignements complémentaires sur la structure et le fonctionnement des systèmes aquifères à partir de l'étude hydro-chimique qui donne des informations à l'hydrogéologie. Elle complète les cartes piézométriques, permet de comparer les eaux entre elles et parfois trouver des solutions pour les besoins d'alimentation (DJEMMEL, 2009).

Il est évident que le chimisme des eaux souterraines dépend principalement de la composition lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux.

Cette interaction influe sur la teneur en éléments majeurs (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-}). Les concentrations de ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs tels que les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface (GOUAIDIA, 2008).

I.1.2.2.1. Origine et signification géochimiques des éléments chimiques

a. Ions Ca^{2+} et Mg^{2+}

Ces ions ont toujours une origine interne au système. Ils proviennent surtout de la dissolution des roches calcaires et dolomitiques. Le calcium peut aussi provenir du gypse. Ils indiquent principalement le temps du séjour de l'eau dans l'aquifère (BAKALOWICZ, 1979 in CHABOUR, 2006)

a. Les ions Sulfates

Les eaux naturelles contiennent pratiquement toujours des ions sulfates avec des proportions très variables. Leur présence résulte de la légère solubilité des sulfates de calcium dans les roches gypseuses et de l'oxydation des sulfures se trouvant dans les roches. Cependant, ils peuvent aussi provenir de l'oxydation dans l'atmosphère de l'anhydrite sulfureuse par combustion des hydrocarbures (BAKALOWICZ, 1979 in CHABOUR, 2006).

I.2. Etude des sols

I.2.1. Généralité sur les sols alluviaux

Un sol alluvial est un sol azonale constitue de dépôts alluvionnaires relativement récents. Il s'agit d'un sol du type (A) C ou AC formé sur matériaux marins, fluviatiles, ou lacustres; généralement humide, à horizon (A) faiblement développe ou même absent. Le sol ne présent donc pas de développement de profil. Les matériaux grossiers, s'ils sont présents, sont roulés (LOZET et MATHIEU, 2002).

Ce sont des sols jeunes, soit des sols proches du matériau d'origine dont l'évolution pédologique est nulle ou faible. Leur principale caractéristique découlant directement de cela est qu'ils sont chimiquement peu altérés. Ainsi, peu de redistribution de fer, de carbonates ou de sels sont possibles, et ces caractéristiques se traduisent par une faible coloration des profils en raison de la faible quantité de fer libre (DUCHAUFOUR, 2001).

Selon JEGO, 2008, une plaine alluviale peut être assimilée au lit majeur d'un cours d'eau. Il s'agit d'une surface topographique, à faible dénivelé, en fond de vallée. Elle est constituée par des alluvions (débris, matériaux) déposées lors des crues du cours d'eau. La plaine alluviale appartient à la zone inondable d'un cours d'eau.

Les sols alluviaux constituent les dépôts récents des vallées où ils occupent le « lit majeur» très souvent inondé des rivières. Ils sont caractérisés par la présence d'une nappe phréatique qui circule, et n'est donc pas réductrice mais subit de fortes oscillations saisonnières (DOUFEN, 2012).

Ils sont en générale soumis à une alternance de sécheresse et d'humidité provoquée par les oscillations de la nappe. Cette alternance favorise leur oxygénation qui empêche les

phénomènes de réduction et provoque la minéralisation rapide de matière organique. La formation de l'humus est alors limitée. (DUCHAUFOUR, 1977).

Les sols alluviaux fluviatiles peuvent être relativement homogènes ou présentent une grande hétérogénéité minéralogique et granulométrique qui reflète d'une part la diversité des matériaux géologiques et pédologiques situés en amont du bassin versant, et d'autre part la circonstance des alluvionnements, raison pour laquelle les sols alluviaux peuvent être calcaire ou acides, ou sableux, limoneux ou argileux ; peu altérés ou au contraires altérés et assez riche en fer (BECHICHI, 2011).

I.2.1.1. Évolution des sols alluviaux

Selon DUCHAUFOUR 1997 nous trouvant les sols alluviaux suivants :

- Les sols alluviaux brunifiés : sont plus riches en argile et en fer ; Ces caractères étant souvent hérité lorsque le matériau transporté et déposé, a subi lui-même une pédogenèse antérieure « brunifiante ».

- Sols alluviaux hydromorphes : les caractères hydromorphes s'accentuent, lorsque la nappe, circulant moins rapidement et subissant des oscillations plus faibles, devient plus réductrice.

- Sols alluviaux humifères : sols caractérisés par une incorporation profonde de matière organique, très humifiée et de couleur foncée liée à la présence d'une végétation hygrophile très développée. On distingue les types rendziniques, chernozémiques, et même vertiques.

I.2.1.2. Classification des sols alluviaux

I.2.1.2.1. Classification Française (CPCS, 1967)

Dans ce type de classification, les sols alluviaux sont subdivisés en deux groupes (figure 1):

A. Sols alluviaux à faible évolution hydromorphe

- sols alluviaux peu humifères
- Sols alluviaux humifères

B. Sols alluviaux hydromorphes

- Sols alluviaux peu humifères, à gley ;
- Sols alluviaux tourbeux ou à anmoor.

D'après POUGET in DJILI (2004), dans les zones arides et semi arides de l'Algérie, ont trouvé les sols suivants :

- Les sols peu évolues d'apport alluvial modaux.
- Les sols peu évolués vertiques.
- Les sols peu évolués halomorphes.

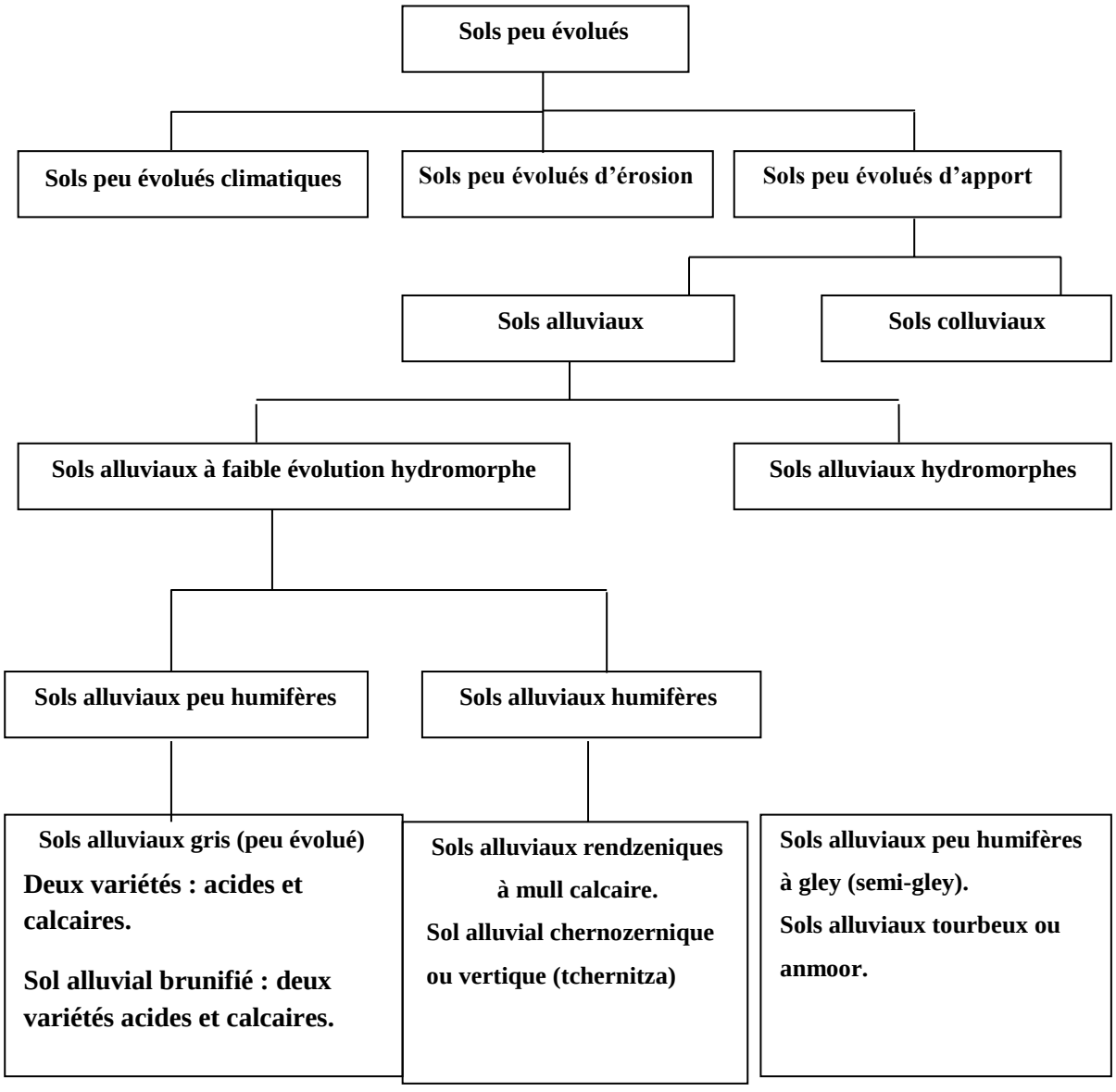

Figure 1 : Les sols alluviaux dans la classification Française (CPCS, 1967)

I.2.1.2.2. Classification américaine ou soil taxonomy (U.S.D.A, 1998)

Cette classification (figure 2) est basée sur les propriétés pédogénitiques des sols; caractéristiques morphologiques, chimiques, minérales et naturelles, qui sont connus sous le nom d'horizons diagnostiques.

D'après HALITIM , 1988, les sols alluviaux des zones arides de l'Algérie sont rattachés aux grands groupes de Torrifluvents et Ustifluvents de la soil taxonomy.

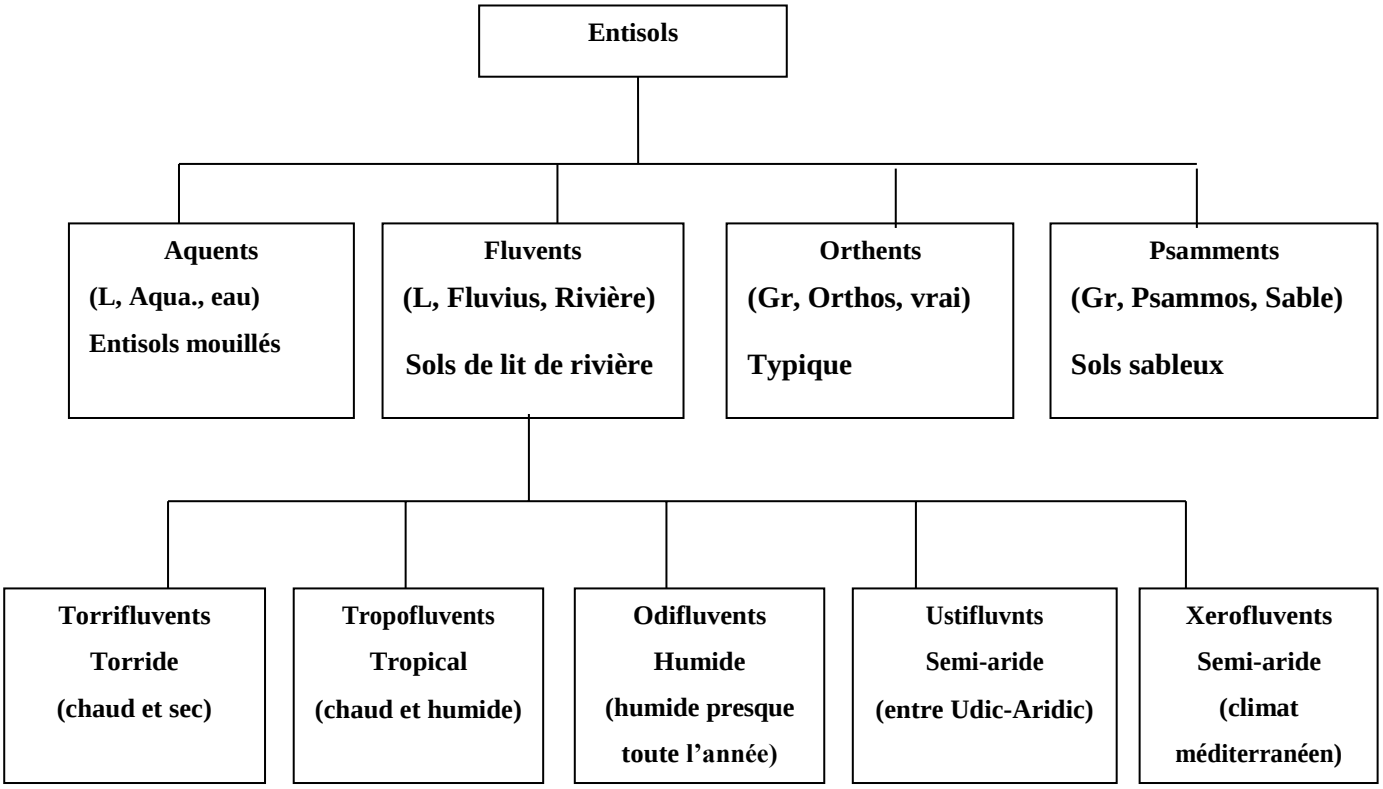

Figure 2: Les sols alluviaux dans la classification américaine (U.S.D.A, 1998)

I.2.1.2.3. Classification de la F.A.O

C'est une classification plus proche de la classification américaine dans la mesure où elle utilise la même notion d'horizon diagnostic fondamental. De ce fait, et suivant les caractéristiques des sols alluviaux, nous pouvons trouver certains d'entre eux rattachés à l'unité des Fluvisols, d'autres rattachés à l'unité des Vertisols (F.A.O, 1998).

I.2.1.3. Répartition des sols alluviaux

I.2.1.3.1. Dans le monde

Selon la FAO (1998), les sols alluviaux sont très répandus dans le monde. Leur surface totale est estimée à plus de 356 millions d'hectares. L'Afrique possède 98 million d'hectares de sols alluviaux, notamment dans les vallées de Chari, Niger, Sénégal et Nil.

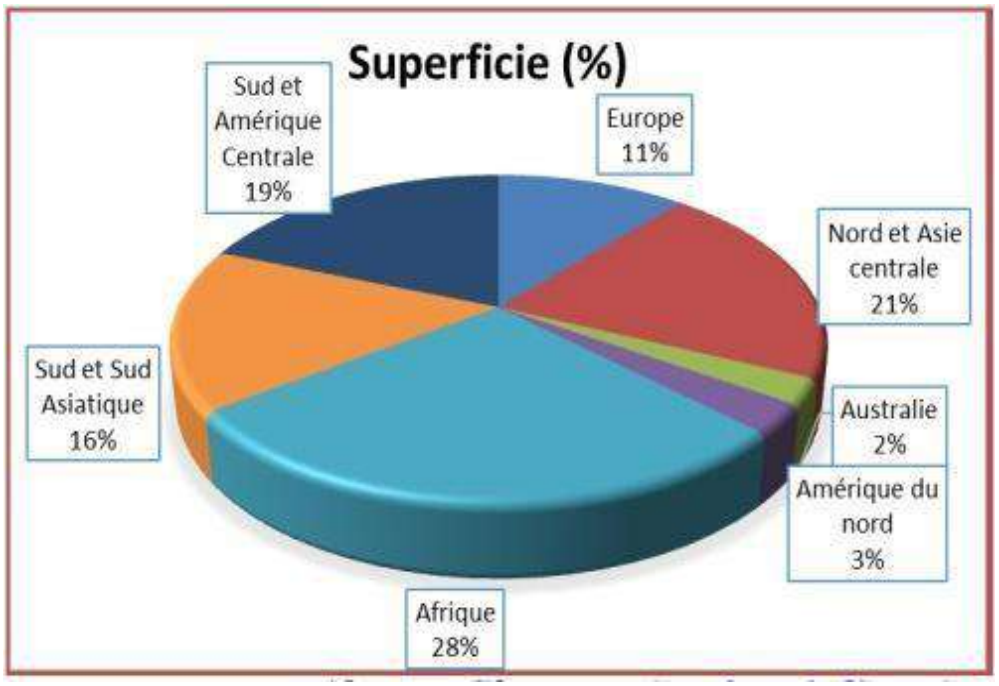

Figure 3 : Répartition des sols alluviaux par continent (F.A.O, 1998)

I.2.1.3.2. Dans les zones arides

Les sols alluviaux des zones arides sont ceux des lits d'oued et de leurs zones d'épandage. Les apports sont très limités dans le temps par la rareté de pluies d'intensité suffisante, et par la quantité des écoulements qui n'intéressent souvent que quelques tronçons du bassin ou de fond des Dayas (DUTIL, 1971; COOKE et al. 1993, in DOUFEN, 2012).

Les produits entrainés vers les points bas sont constitués principalement par des sables fins, une partie de limon et très peu d'argile. Souvent, dans les oueds il ne s'agit que d'un remaniement interne des dépôts de leur lit, se traduisant par un transfert en un autre point en aval du bassin. Les produits accumulés sont généralement des sables fins sans cohésion (DOUFEN, 2012).

1.3. Etude de l'effet des irrigations sur le sol (salinisation)

En Algérie, les pratiques d'irrigation accroissent le risque de salinisation, au point que plus de 20 % des sols irrigués sont affectés par un problème de salinité (DOUAOUI et HARTANI, 2007; BOUHLASSA et al., 2008; ROUBHIA et DJABRI, 2010 ; GOUAIDIA et al., 2012 ; in BRADAI A., 2017).

L'appréciation de la qualité d'une d'eau d'irrigation s'appuie sur la qualité totale des sels dissous et sur sa composition chimique qui permet de calculer le SAR. Il est également important de considérer la présence éventuelle des sels toxiques (chlorures, sodium… etc) (HAROUNA, 2001).

Chapitre II – Contexte de l’étude

II.1. Introduction

Pour la réalisation de notre travail de recherche nous avons opté pour la palmeraie de Guerrara qui constitue un système oasien particulier, caractérisé par un système alluvial fragile et dont l'anthropisation a modifié son bon fonctionnement ce qui peut altérer le système sol/nappe en premier lieu et l'environnement par la suite.

II.2. Situation géographique

Guerrara est située dans la partie nord du Sahara septentrional à 620 km au sud d'Alger et à 120 km au Nord Est de son chef lieu Ghardaia. Elle est à la latitude 32°50', la longitude 4° 30' et à une altitude de 300 m. Sa superficie est de 2600 km² (DJILI, 2004).

La commune de Guerrara est limitée (Fig. 4):

- Au Nord par la wilaya de Djelfa.
- A l'Ouest par les Daïra de Berriane et Bounoura.
- Au Sud par les Daïra de Zelfana et El Atteuf.
- A l'Est par la wilaya de Ouargla

La zone d'étude fait partie du bassin versant endoréique de l'Oued Zegrir. Elle occupe la rive gauche de ce cours d'eau qui draine le versant sud de l'atlas saharien et déverse dans Oued Zgag (CHELLAT, 2015).

Le mot Guerrara prend son origine de Gara (buttes témoins ; c'est-à-dire des plateaux tabulaires isolés par l'érosion et couronnées par une table de roche dure). D'autres expliquent le mot Guerrara ou El Guerrara comme vaste dépression en forme de cuvette ou l'eau se stagne périodiquement (HAMDI AISSA, 2008).

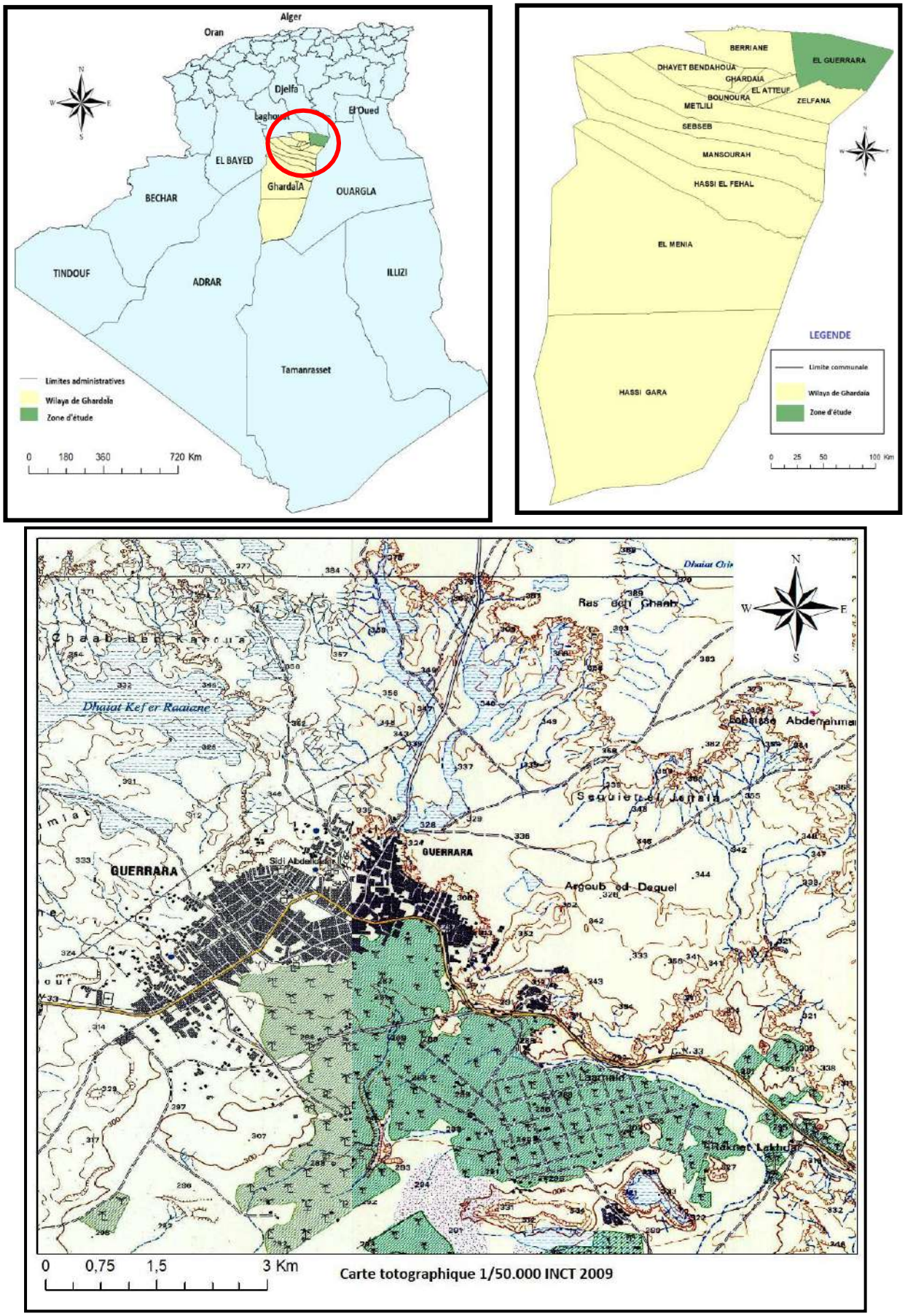

Figure 4 : Situation géographique de Guerrara (CDARS, 2019).

II.3. Contexte climatique

Les conditions climatiques et pluviométriques en particulier, les précipitations et l'évaporation jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique. Ces paramètres conditionnent l'écoulement superficiel et souterrain.

Les caractères du climat saharien sont dus tout d'abord à la situation en latitude, au niveau du tropique ce qui entraîne de fortes températures, et au régime des vents qui se traduit par des courants chauds et secs (OZENDA, 1983).

Les données climatiques ont été prises à la station météorologique de Ghardaïa qui fournis des mesures ponctuelles. La présente caractérisation du climat de la région est faite à partir d'une synthèse climatique de 25 ans (1987 à 2012).

II.3.1. Précipitations

Elles constituent un paramètre essentiel en hydrologie car elles permettent une appréciation indirecte de l'état des réserves en eau du sol, la recharge et le régime des cours d'eau. Pour l'étude des précipitations nous nous somme intéressés aux variations des précipitations moyennes mensuelles pour une période de 25 ans (1987/2012).

Les valeurs des précipitations mensuelles durant cette période sont données dans le tableau I.

Tableau I : Précipitations moyennes mensuelles pendent la période (1987/2012).

	Mois												
Années	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**JT**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**	**Total**
1987-2012 (mm)	11.76	1.79	3.55	8.75	1.89	3.23	3.20	4.56	22.46	9.71	5.84	4.11	**80.83***

(* Cumul annuel) (O.N.M. Ghardaïa, 2013)

Le maximum des précipitations moyennes mensuelles est de 22.46 mm durant le moi de septembre et le minimum est de 1.79 mm durant le mois de février. Le régime pluviométrique de la zone d'étude est caractérisé par une forte irrégularité d'un mois à l'autre et d'une année à une autre.

Les précipitations sont faibles (< 5mm) durant les mois de Février, Mars, Juin, Juillet, Aout et Décembre. Durant les autres mois les moyennes des précipitations sont entre 8.75 et 22.46 mm. Le cumul des précipitations annuelles moyennes pour la période 1987 – 2012 est de 80.83 mm (tableau I).

II.3.2. Températures

La température est un élément fondamental ayant une grande influence sur le bilan hydrique et dans le conditionnement de l'évapotranspiration. La température varie selon la latitude et l'altitude. Le tableau II montre les variations de la température moyenne mensuelle à la station de Ghardaïa durant la période (1987/2012).

Tableau II : Températures moyennes mensuelles à Ghardaïa (1987/2012).

Années	**1987/2012**		
Mois	**T. max. (°C)**	**T. min. (°C)**	**T. moy. (°C)**
Janvier	17.4	6.13	11.8
Février	18.88	7.40	13.4
Mars	24.5	10.9	17.7
Avril	28.6	14.9	21.6
Mai	33.2	18.7	26.05
Juin	38.4	24.3	31.8
Juillet	42.1	27.3	34.9
Aout	41.1	27.4	34.3
Septembre	35.8	22.7	29.5
Octobre	28.4	17.9	23.5
Novembre	22.9	11.4	17.4
Décembre	17.9	7.17	12.6

(O.N.M. Ghardaïa, 2013)

T max : la température moyenne mensuelle des maxima, (°C).

T min : désigne la température moyenne mensuelle des minima, (°C).

T moy= (T max + T min) /2 : désigne la température moyenne mensuelle (°C).

Le tableau précédent montre que le maximum du mois le plus chaud est enregistré au mois de juillet avec une moyenne qui dépasse 42°C. Le minimum du mois le plus froid est celui du mois de Janvier avec 6.13°C (tableau II).

II.3.2.1. Régimes thermiques

L'étude du climat nous permet de déterminer les périodes sèches et humides. En se basant sur le calcul des indices nous pouvons à partir des précipitations et des températures de déterminer le type du climat de la région d'étude.

a-Relation précipitations/températures

Le diagramme ombrothermique est établi selon la méthode de GAUSSEN et BAGNOULS et dont les températures sont reportées à l'échelle double des précipitations. Cela permet de déterminer la période sèche durant laquelle la moyenne mensuelle des précipitations du mois est inférieure ou égale au double de la température ($P \leq 2T$).

Tableau III : Températures et précipitations moyennes mensuelles à Ghardaïa (1987/2012).

Mois	Précipitations (mm)	T. moyennes (°C)	2 T. moyennes (°C)
Janvier	11.76	11.8	23.6
Février	1.79	13.4	26.8
Mars	3.55	17.7	34.14
Avril	8.75	21.6	42.12
Mai	1.89	26.05	52.10
Juin	3.23	31.8	62.16
Juillet	3.20	34.9	68.18
Aout	4.56	34.3	68.6
Septembre	22.46	29.5	59.0
Octobre	9.71	23.5	47.0
Novembre	5.84	17.4	34.8
Décembre	4.11	12.6	24.12

D'après les valeurs du tableau III dans le diagramme ombrothermique les valeurs dont ($P \leq 2T$) correspondent aux majorités des mois de l'année. De ce fait la période déficitaire en eau s'étale sur tous les mois de l'année.

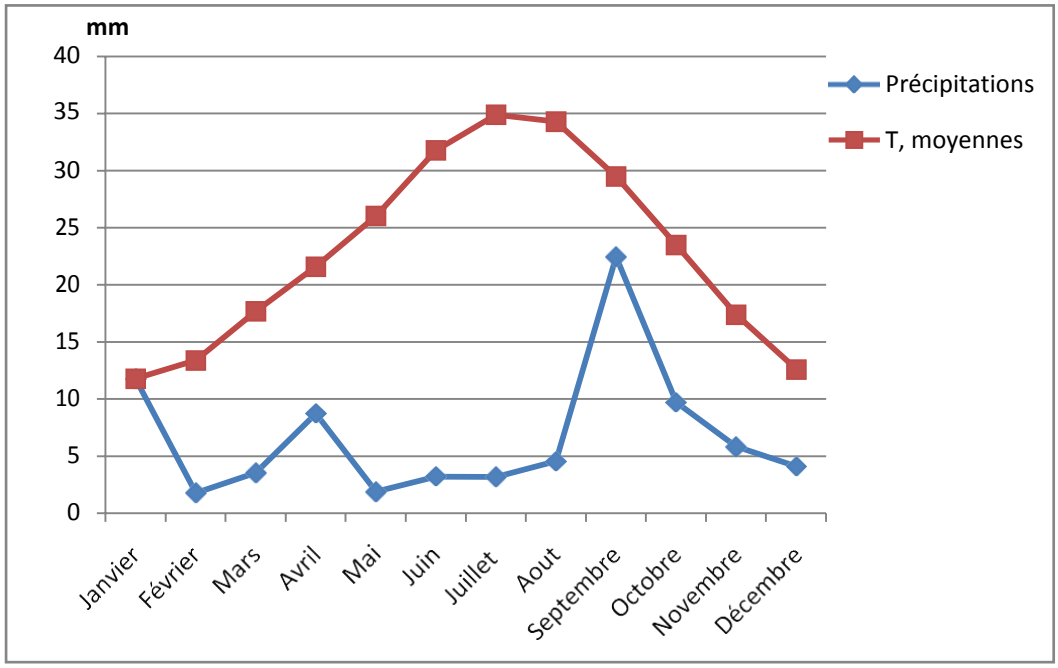

Figure 5 : Diagramme ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN de la région de Ghardaïa (1987-2012)

La courbe des doubles températures passe au-dessus de celle des précipitations en caractérisant une période sèche durant toute l'année.

b- Méthode d'Euverte

La méthode d'Euverte consiste à l'établissement des rapports P/T où :

P : désigne la précipitation moyenne mensuelle en mm.

T : désigne la température moyenne mensuelle en °C.

- P/T < 1 : Le régime est très sec.
- 1< P/T < 2 : Le régime est sec.
- 2 <P/T < 3 : Le régime est subhumide.
- P/T > 3 : Le régime est humide.

D'après le tableau III, le régime est très sec durant tous les mois de l'année.

c- Classification bioclimatique d'EMBERGER

Le climagramme d'Emberger est un abaque comportant : en ordonnée les valeurs de Q_2, données par la relation : **$Q2=Q_3 = 3.43 \times P / M - m$**

Q_3 : Quotient pluviométrique d'Emberger.

P : somme des précipitations annuelles en mm.

M : moyennes des températures maximales du mois le plus chaud.

m : moyennes des températures minimales du mois le plus froid.

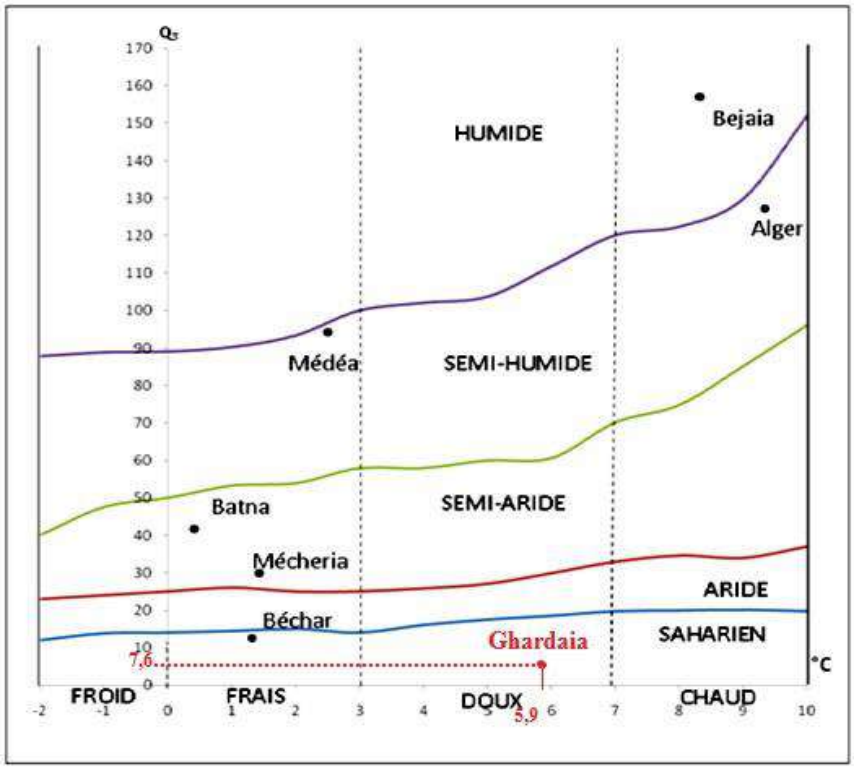

Figure 6: Climatogramme d'EMBERGER de la région de Ghardaïa (2012)

Le quotient Q_3 de la région d'étude calculé à partir des données climatiques obtenues durant une période de 25 années (1987 – 2012) est égal à 7,6. La moyenne des températures des mois les plus froids est égale à 5,9°C. En rapportant ces valeurs sur la climagramme d'Emberger (Fig.6), on constate que la région de Ghardaïa se situe dans l'étage bioclimatique saharien à hiver doux.

II.3.3. Vents

Le vent est un agent de dispersion des animaux et des végétaux, qui exerce une action de modification indirecte sur la température et l'humidité (DAJOZ, 2006).

C'est un phénomène continuel au désert ou il joue un rôle considérable en provoquant une érosion intense grâce aux particules sableuses qu'il transporte. Le tableau IV donne les valeurs de la vitesse des vents enregistrées dans la région de Ghardaïa durant la période 1987- 2012.

Tableau IV : Vitesses de vent (m/s) à Ghardaïa (1987- 2012).

Mois	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**JT**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**	**Moy.**
V (m/s)	-	3.9	3.8	3.1	4.1	3.7	3.2	2.4	2.2	2.4	2.4	2.6	2.2

(O.N.M. Ghardaïa, 2013)

V (m/s) : Vitesse du vent exprimée en mètre par seconde.

Nous constatons que les vents sont plus violents durant le printemps avec une vitesse moyenne maximale enregistrée au mois de Mai (4.1 m/s). La vitesse minimale est de l'ordre de 2.2 m/s au mois de septembre.

II.3.4. Humidité relative

Tableau V : Humidité relative de l'aire (H%) dans la région de Ghardaïa (1987-2012).

Mois	**J**	**F**	**M**	**A**	**M**	**J**	**JT**	**A**	**S**	**O**	**N**	**D**	**Moy. An.**
H(%)	51	45.5	42.1	34.2	26.3	22.5	19.7	23	30.5	37.7	56.6	53.2	36.9

H% : Humidité relative en pourcentage (O.N.M. Ghardaïa, 2013)

L'humidité relative de l'air à Ghardaïa est très faible avec une moyenne annuelle de 36.9% (Tableau V). Elle atteint son maximum au mois de novembre (56.6%) et son minimum au mois de juillet (19.7%).

Conclusion

Le climat est du type Saharien, caractérisé par une grande variabilité annuelle et interannuelle et de grandes périodes sèches. La pluviométrie qui régit le régime des eaux souterraines et superficielles se caractérise par des précipitations faibles et irrégulières, ayant lieu généralement entre septembre et Avril.

Ces précipitations se concentrent souvent durant quelques jours ou quelques heures. Les précipitations moyennes annuelles sont de 80.8 mm/an. Les températures maximales moyennes sont de 41 à 42°C en Aout et Juillet successivement, et de ce fait les valeurs de l'évapotranspiration sont très importantes et dépassent la moyenne des précipitations.

II.4. Contexte géologique

La région de Guerrara est située aux bordures occidentales du basin sédimentaire secondaire du Sahara, sur un grand plateau subhorizontal de massifs calcaires d'âge turonien appelé couramment « la dorsale du M'Zab ». L'épaisseur de ces massifs calcaires recoupés par les sondages est de l'ordre de 110m. Dans la région de Guerrara seuls les terrains du mio-pliocène et de petits bancs de crétacés affleurent. Ils sont recouverts par une faible épaisseur de dépôts quaternaire (CHELLAT, 2015).

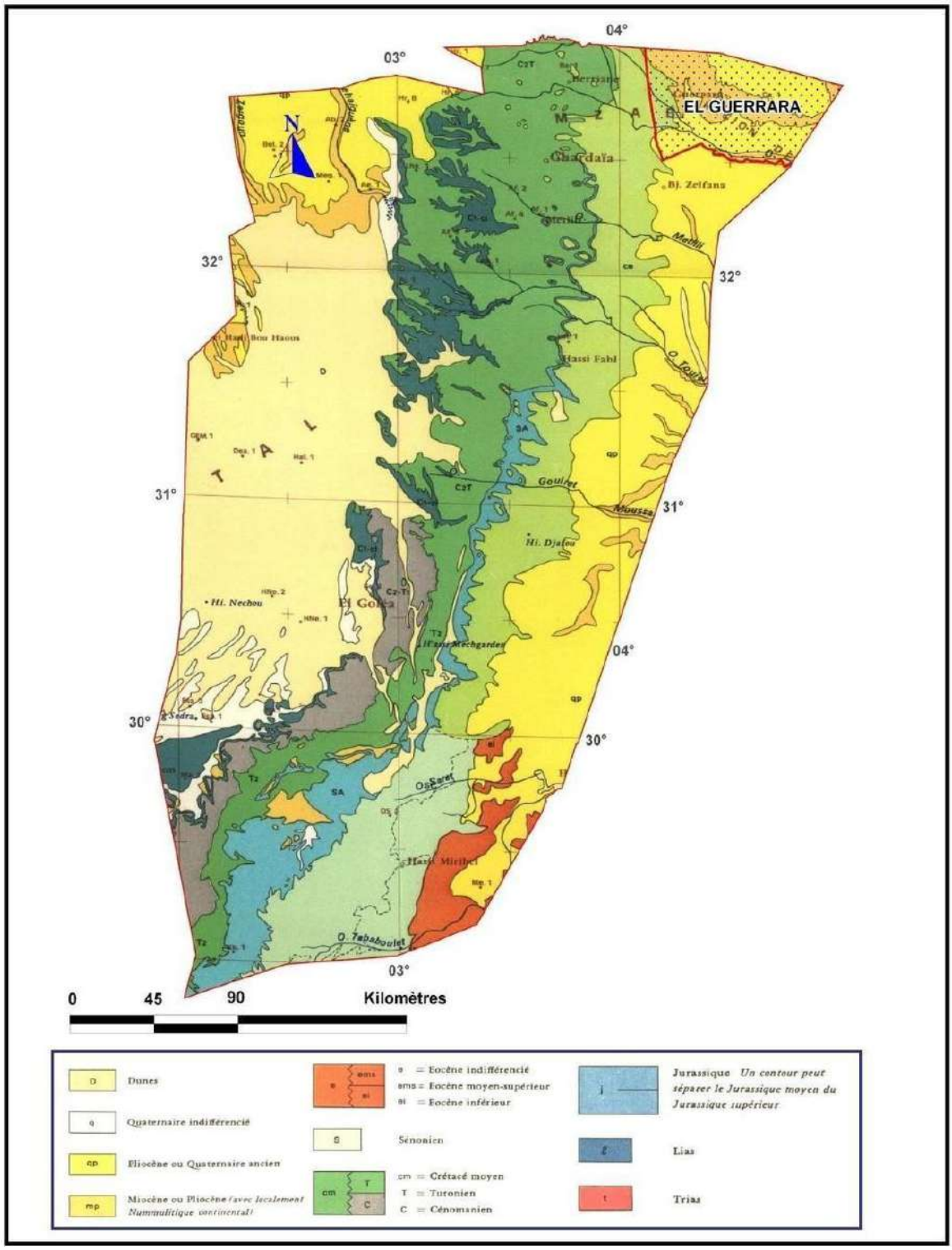

Figure 7. Carte géologique de la wilaya de Ghardaïa in OULED SIDI AMOR (2016)

Géologiquement la région comporte en grande majorité des affleurements de formations gréseuses d'âge moi-pliocènes. Les formations carbonatées et sénoniennes commencent à affleurer en paquet réduit à 10 km à l'Ouest de la ville de Guerrara dans le lit de l'Oued Zegrir (CHELLAT, 2015).

Sous les calcaires turoniens se trouve une couche imperméable de 220m formée d'argiles vertes et de marne riche en gypse et en anhydrite et qui est attribuée au cénomanien (figure 7). L'étage de l'albien est représenté par une masse importante de sable fins à grès et d'argiles vertes. Elle abrite des ressources hydrauliques considérables et son épaisseur est de 300m.

II.4.1 Plateforme saharienne

L'Oued M'Zab parcourt la plateforme allant du Nord-ouest vers le Sud-est. La vallée du M'zab est formée de plateau presque désertique qui est représenté en petits vallons assez creux qui se trouve non loin du territoire saharien de l'Algérie.

II.4.2. Description litho stratigraphiques

A. Crétacé supérieur

La lecture de la carte géologique d'Alger sud et la coupe géologique Ouest-est permet de constater l'existence d'affleurement secondaire représenté par le crétacé supérieur et occupe la zone de Bled Bouaicha au Nord-Ouest de Guerrara. Cette formation, qui caractérise une grande partie de la région de la Chebka de M'Zab, est constituée d'une double dalle calcaire dure, de calcaire plus ou moins dolomitiques parfois pétries de coquilles marines (FABRE, 1976 in DJILI, 2004).

B. Le Mio-pliocène

Ce sont des formations détritiques récentes qui occupent les dépressions de l'Atlas Saharien et qui s'étendent largement au Sud. Elles sont rattachées au Miocène supérieur et au Pliocène sans que l'on puisse établir une discrimination exacte. Ce sont en majeur partie des produits fragments anguleux que l'on ne saurait assimiler à des galets fluviatiles.

Le Pliocène continental (pc) forme les terraces caillouteuses des plateaux et des dayas. Il est formé essentiellement de cailloux, de sables et de limons rougeâtres recouvert par une calcréte « Hammada » caractérisant le sommet des affleurements néogène du Sahara (CHELLAT, 2015).

C. Le Quaternaire

Ces formations sédimentaires sont des alluvions quaternaires fluviatiles qui ne se trouvent pas exclusivement dans les vallées de ruissellement. Elles remplissent aussi de grandes aires déprimées dans les chaines plissées de l'atlas saharien (DJILI, 2004)

Récent : Cailloutis et éboulis aux pieds des montagnes ; dunes de sables ; alluvions sableuses et caillouteuses des lits actuels d'Oueds.

Moyen : Travertins de sources ; alluvions sableuses et argiles ; calcairo-gypseux (croûte superficielle composée par l'accumulation par évaporation des sels contenus dans l'eau).

Ancien : Poudingues ; grès dépôts sableux et argileux.

II.5. Contexte géomorphologique

Les paramètres géomorphologiques interviennent le plus souvent de façon combinée en agissant sur les modalités de l'écoulement. Ils nous offrent la possibilité de réaliser une analyse quantitative et une comparaison des différentes unités hydrologiques (DJILI, 2004).

La région d'étude est formée des unités géomorphologiques suivantes :

1) Une pleine sur dalle de hamada dans la partie Nord, Nord-est et Sud en présentant une topographie de glacis à pente faible qui diminue de l'Ouest en Est. Ce dernier est souvent de sable et de gravier gréseux. Du point de vue hydrographique elles sont plus sèches que le reste du territoire (HADJ SAID et al, 2007).

2) Des régions de dépressions au centre et à l'Ouest : dayas isolées sur le plateau de Glacis (plateaux des dayas). Ces dayas sont liées au réseau de l'Oued Zegrir comme zones d'épandage fermées (daya Ben Filah à l'Est de Guerrara), où possédant un exutoire prolongeant ainsi le lit d'Oued (Daya El Amiel). (DJILI, 2004).

3) Les garas sont des buttes témoins ; c'est-à-dire des plateaux tabulaires isolés par l'érosion et couronnés par une table de roche dure (CAPOT-REY et al, 1969 in DJILI, 2004). Ces garas sont façonnées par le fonctionnement passé du réseau hydrographique.

4) Des dunes d'obstacle développés à l'abri d'une butte témoin (garas) et des buissons de la végétation naturelle dans lit majeur de l'Oued Zegrir au Sud de la région de Guerrara par les modelés dunaires (les rides, les voiles sableux, les nebkas et massifs dunaires). (DJILI, 2004).

II.6. Contexte hydrogéologique

L'oasis de Guerrara referme des réserves d'eau souterraines. Il s'agit de deux principales nappes qui représentent les ressources en eaux non renouvelables ; la nappe du complexe terminal (Moi-Pliocène) et la nappe du continental intercalaire (Albien), een plus d'une autre renouvelable qui est la nappe libre (nappe alluviale) logée dans les alluvions quaternaires de l'Oued Zegrir.

II.6.1. Nappe du continental intercalaire

Cette formation occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la base du Trais et le sommet de l'albien. L'aquifère est constitué de formations détritiques ; il s'agit de sable, grès, argiles avec un passage dolomitique attribué à l'aptien. Elle dépasse 500m de profondeur (KHADRAOUI, 2007).

Dans la région de Guerrara la nappe est captée par 26 forages artésiens jaillissants de 950 m de profondeur (HADJ-SAID et al, 2007).

II.6.2. Nappe du complexe terminal

Elle est constituée de sable, grès et argile, avec un passage dolomitique attribué à l'Aptien. L'épaisseur moyenne de la nappe est de 650 m et le toit varie entre 500 et 900 m de profondeur dans le sens Est-ouest de la région de Guerrara (MELOUAH et ZEDDOURI, 2016).

Nappe du Mio-Pliocène et Eocène

Elle se localise dans la partie Est de Guerrara et il s'agit d'une nappe de Mio-Pliocène sableux de 125 m d'épaisseur en plus d'une nappe d'Eocène à calcaire blanc fin et de 100 m d'épaisseur.

- **Nappe du Sénonien**

Cette nappe est rencontrée dans la partie Ouest de Guerrara et liée aux deux précédentes nappes et qui peut être exploitée à environ 430 m de profondeur.

- **Nappe du Turonien carbonate**

Elle est de 74 m d'épaisseur et peut être captée à une profondeur d'environ 500m dans le secteur Ouest de Guerrara. Cette aquifère est constitué de dolomie beige compacte avec intercalation de calcaire tendre.

- **Nappe phréatique**

Il s'agit de nappes superficielles ou alluviales localisées dans les plaines et les lits d'Oueds et généralement exploitées par des puits de faibles profondeurs (2 à 50m). Elles sont constituées généralement par les formations quaternaires.

II.7. Hydrologie superficielle

Dans les régions arides et semi-arides les précipitations étant caractérisées par de fortes irrégularités ont généralement des effets dévastateurs et néfastes à travers les crues des cours d'eau. Ces Oueds qui ne présentent pas d'écoulement permanents sont en fait la principale origine de l'alimentation des aquifères, notamment les nappes de l'inféro-flux. Le régime des cours d'eau est fonction du régime pluviométrique. Ces cours d'eau se caractérisent par un régime torrentiel et se manifestent dans de courtes durées. Les apports sont très variables d'une année à l'autre. (CHABOUR, 2006)

II.7.1. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires où s'écoulent des eaux provenant de ruissellement ou restituées par les nappes souterraines.

a. Le sous bassin versant de l'Oued Zegrir

L'évolution topographique de la région d'étude a conduit à un façonnement en relief tabulaire, sillonné par des talwegs, rivières et dayas. Le bassin versant de l'Oued Zegrir s'élève à une altitude maximale de 400 m et minimale de 300m (HADJ-SAID et al, 2013).

L'un des quatre sous bassins qui constituent le bassin verseau des Oueds du M'Zab. Ce bassin couvre une superficie de 4100 Km^2 et il est situé en majeur partie sur les affleurements du Miocène et de Pliocène continentaux. Il est parsemé de nombreuses dayas parfois drainées par cet oued. Ces derniers, par la suite des phénomènes karstiques qui se produisent en ces régions disparaissent souvent avant d'atteindre leurs confluents avec le Zegrir ou son prolongement le Zgag.

L'Oued Zegrir est l'un des grands Oueds qui traversent le M'zab. Il prend son origine à la tête de l'Oued Ajerma (860 m d'altitude) avec environ 270 km de longueur. Cet Oued coule suivant une direction Ouest sud et Sud-est pour arriver à sa partie avale daya de Ben Filah (300 m d'altitude). (DUBIFE, 1953 in DJILI, 2004).

Le réseau hydrographique est de type dendritique et d'après (PEULVAST et VANNEY, 2001, in DJILI, 2004) ce type de réseau est constitué de tributaires irrégulières, ramifiées autour d'un tronc principale et raccordé selon des angles variés généralement très inferieur à 90°. La figure 8 montre le réseau hydrographique du bassin du M'zab.

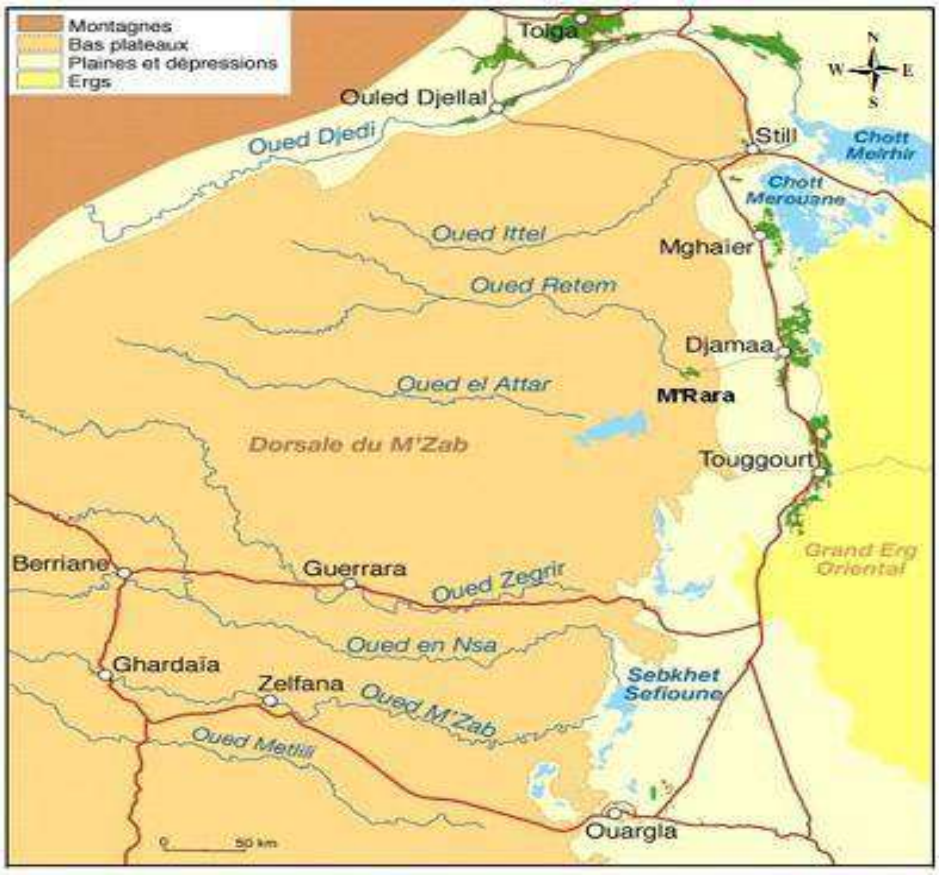

Figure 8 : Carte du réseau hydrographique du bassin du M'Zab (BALLAIS, 2010)

b. Les écoulements

L'installation de l'oasis de Guerrara s'est opérée essentiellement grâce à la maîtrise des crues et à l'exhaure des eaux et leur distribution collective. Le système hydraulique repose sur une nappe d'inféroflux alimentée artificiellement par des petits ouvrages composés de barrages, de trémies, de peignes et de plaines d'épandage.

La vitesse d'écoulement des eaux et la vitesse de propagation des crues sont essentiellement en relation avec la topographie. L'étude du profil au long des cours d'eau nous renseigne sur leurs effets dévastateurs et le mode d'alimentation des aquifères. Dans le but d'une bonne gestion des eaux de l'Oued Zegrir, les habitants de Guerrara ont mis en place un dispositif qui permet de guider les eaux des crues vers la palmeraie. L'inondation

de cette dernière pendant des jours à des semaines assure une bonne alimentation de la nappe alluviale.

Le nombre de jours de crues pour l'Oued Zegrir pour la période allant de 1921 à 1937 est de 18 jours, et sont de 27 jours pour la période allant de 1950 à 1961. On peut compter sur deux jours de crue par an des débits qui peuvent atteindre 300m^3/s pour de fortes crues. BRL(1998a), in AOUAM (2007).

c. Epandages des eaux de crues de l'Oued Zegrir

Ce dispositif relativement simple et peu coûteux consiste en :

- Une digue de dérivation des eaux de la crue vers un barrage de dérivation.
- Le barrage de dérivation qui s'ouvre soit vers l'ancienne oasis soit vers l'extérieur ou vers les deux.
- L'acheminement à l'intérieur de l'ancienne oasis est contrôlé par des canaux et diguettes (DJILI, 2004).

II.8. Contexte Pédologique

Les sols de l'ancienne palmeraie de Guerrara sont des alluvions apportées par les crues de l'Oued Zegrir et mélangées avec des apports éoliens. Ils sont issus de l'altération des affleurements géologiques du quaternaire et du mio-pliocène. Les phases successives d'érosion et de transport ont installé sur le fond de sédimentation de la vallée une hétérogénéité texturale des sols. Nous admettons que la période d'assèchement du Sahara est survenue après la dernière glaciation du quaternaire (AOUAM, 2007).

Les analyses minéralogiques et micromorphologiques des sols alluviaux de la région de Guerrara ont permis de mettre en évidence l'alternance de périodes arides/semi-arides donnant naissance à une succession de couches sableuses et de couches sablo-limoneuses. L'homogénéité qualitative du cortège minéralogique montre que les accumulations ont une même source d'apport ; il s'agit du bassin versant de Guerrara dominé par les grés rouges (AOUAM , 2007).

Dans les horizons takyriques et les couches sableuses de Dayet El-Amied, dans la région de Guerrara par exemple, il est fréquent d'observer dans un vide des lits de granulométrie différente (argile, limon, sable, etc.) posés les uns sur les autres. Cependant, il est rare que tous les vides contiennent la même séquence de traits texturaux car les vides ne se sont pas tous contemporains (HAMDI AISSA et all, 2008).

En effet, en amont de l'oued le sol est constitué des alluvions caillouteuses dont les éléments grossiers ont une forme émoussée et arrondie de nature dolomitique et quartzeuse. Ils sont le résultant d'une forte érosion hydrique qui reflète une allochtonie et révèle un remaniement par roulement plus ou moins long (DUTIL, 1971 in DJILI, 2004).

II.9. Contexte biologique

La couverture végétale joue un rôle important en limitant le ruissellement superficiel et conditionne l'évapotranspiration et par la suite le bilan hydrique du bassin.

Les groupements végétaux existants sont liés aux différents supports édaphiques à savoir ; les terrains gypseux, les sols salés et les sables ou les dayas. Ils reflètent d'une part le modelé géomorphologique et d'autre part la variation topographique dans chaque modèle. D'après BARRY et FAUREL (1973) in AOUAM (2007) les principaux groupements existent dans la région d Guerrara sont les suivants :

- Steppes gypseuses de faciès dégradé (anthropique) à *Euphorbia guyniana* et *Oudneya africana*
- Groupement spasmophiles à *Aristida pungens*.
- Steppes buissonneuses claires à *Rhanterium suavealens ssp*.
- Steppes buissonneuses à *Arthrophytum scoparium* et *Farsetia hamiltonii*.
- Palmeraie à *Phoenix dactylifera.*

Chapitre III- Matériels et méthodes

III.1. Introduction

Pour bien mener notre étude sur le système alluvial de Guerrara nous avons suivi une démarche scientifique qui consiste à recueillir le maximum de documents relatifs à notre travail de recherche. Il s'agit d'une étude bibliographique, des sorties sur terrain pour la prospection puis le choix des sites de l'étude, creusement et description des profils, des échantillonnages des eaux et des sols, analyses au laboratoire et interprétation des résultats.

Avant d'exposer les résultats des mesures et des analyses physico-chimiques obtenus sur les eaux de la nappe alluviale et le sol, nous jugeons utile de présenter les conditions et le mode d'échantillonnage ainsi que les matériels et techniques de mesure et d'analyse de nos échantillons. Des outils informatiques (logiciels) employés pour le traitement de nos résultats nécessitent d'être brièvement présentés.

III.2. Choix de la zone d'étude

C'est un système particulier qui est le résultat du génie humaine à domestiquer les effets néfastes de quelques paramètres climatiques. Ce système est fragile face aux enjeux écologiques, climatiques et anthropiques.

II.2.1. Choix des sites et des puits à étudier

L'ancienne palmeraie de Guerrara, d'une superficie de 400 hectare, est l'une des oasis traditionnelles du Mzab. L'ancien système traditionnel d'irrigation exploitait en partie la nappe phréatique (alluviale) à partir de nombreux puits (1300) couvrant la totalité de la palmeraie. Un système de digues et de barrages permettait par ailleurs de canaliser les eaux des crues de l'Oued Zegrir et de les diriger vers l'intérieur de la palmeraie. Les puits sont plus fréquents et sont généralement peu profonds et creusés à la main. Ils ne sont pas cimentés ni équipés de couvercles, donc non protégés et soumis à l'infiltration des eaux de surface. Leurs margelles sont anciennes et mal structurées et les puits sont exposés à la pénétration d'impuretés par les ouvertures. Lors de la prospection sur site 30 puits répartis d'une manière représentative ont été choisis pour faire l'objet de l'étude de la nappe.

Concernant l'étude des sols nous avons choisi quatre sites à l'intérieur de la palmeraie de Guerrara pour faire l'objet du creusement et description des profils de sol, et des prélèvements d'échantillons. Le choix des sites a été fait selon la disponibilité des parcelles irriguées uniquement par les eaux de la nappe superficielle, sur un axe Ouest-Est représentatif de la palmeraie, et selon la facilité d'accès dans les parcelles.

III.2.2. Matériels utilisés durant l'étude

Pour l'étude des eaux de la nappe et les sols des sites nous avons utilisé le matériel suivant :

- Une sonde électrique graduée pour la mesure de la profondeur de la nappe dans les puits ;
- Un GPS pour mesurer les coordonnes géographiques des puits et des sites de travail ;
- Un échantillonneur pour prélever l'eau des puits ;
- Des flacons en plastique pour le transport des échantillons d'eau ;
- Une tarière pour effectuer des sondages de sol et prélèvement d'échantillons de sol ;
- Une pioche pour creuser les profils de sol ;
- Une pelle ;
- Une bêche ;
- Une truelle pour rafraîchir la coupe;
- Un canif ;
- Un marteau pédologique ;
- Un flacon d'acide chlorhydrique à 10% ;
- Des flacons d'eau distillée ;
- Des sachets en plastique pour le transport des échantillons de sol ;
- Une charte de Munsel pour déterminer la couleur des sols ;
- Un conductimètre pour mesurer la CE des eaux et des sols;
- Un pH-mètre pour mesurer le pH de l'eau et des sols ;
- Une série de tamis pour faire la granulométrie ;
- Une pipette de Robinson pour évaluer les fractions fines du sol ;
- Une balance;
- Une étuve ;
- Un spectrophotomètre à flamme ;

III.3. Méthodologie de travail

III.3.1. Travail sur terrain

L'étude de la nappe a été menée sur deux années (2012 et 2013) et en deux compagnes pour chaque année. L'étude piézométrique de la nappe consiste en la mesure de sa profondeur, ses coordonnées géographiques et sa côte dans chaque puits. Cela dans le but de déterminer le sens d'écoulement de cette nappe. Les prélèvements d'eau ainsi que les mesures piézométriques se sont effectués dans deux périodes l'une vers la fin de la saison sèche (début d'Octobre) et une autre en fin de la saison humide (début d'Avril).

Concernant l'étude des sols, nous avons creusé quatre profils (un profil par site) de façon à représenter les caractéristiques morphologiques des sols de la zone d'étude. Le sol de chaque profil est constitué de deux couches pédologiques (horizons) distinctes. Apres description des profils selon la méthode décrite par BAIZE et JABIOL (1995), des échantillons de sol de chaque horizon ont été pris pour faire l'objet des analyses classiques au laboratoire par la suite.

Pour le suivi de l'évolution de la salinité et le pH des sols, l'échantillonnage du sol a été effectué périodiquement par sondage à la tarière après chaque irrigation (chaque semaine) et durant trois mois de suivi (du janvier à avril). Nous avons en tout quatre (04) sites d'échantillonnage (Fig. 9) dans l'ancienne palmeraie avec trois endroits différents dans chaque site (répétitions) en plus d'un prélèvement témoin (sol non irrigué).

Les prélèvements du sol ont été pris sur 20, 40, 60, 80, 100 et 120 cm de profondeur après 24h de l'irrigation. Au total (pour les quatre sites), 864 échantillons de sol en plus 24 échantillons des sols témoins (sols non irrigués) ont fait l'objet du suivi de la CE et du pH. En plus, 24 échantillons moyens pour chaque site (4 x 6) du dernier prélèvement ont subi une analyse physique et chimique au laboratoire. Au niveau des mêmes sites, nous avons échantillonnés des eaux à partir de quatre puits utilisés en irrigation. Les prélèvements d'eaux d'irrigation vont être analysés au laboratoire pour connaître leurs caractéristiques physico-chimiques.

La figure 9 montre la localisation des quatre sites choisis pour l'étude des sols.

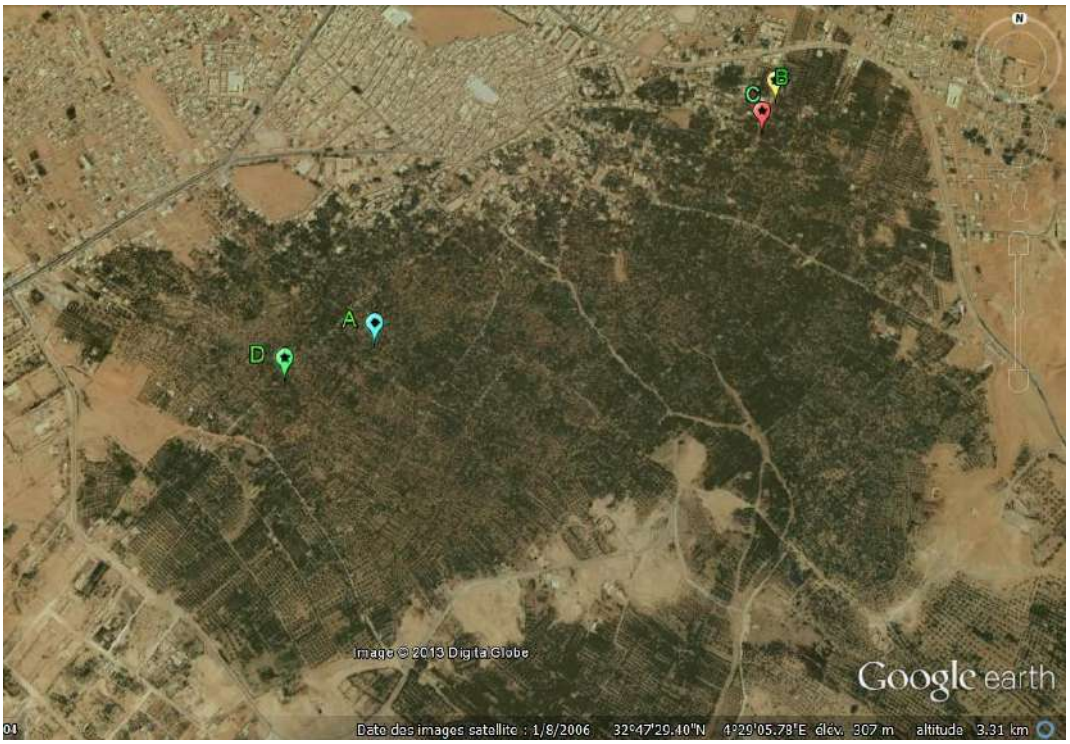

Figure 9 : Positionnement des profils dans la palmeraie

III.3.2. Méthode d'analyse au laboratoire

III.3.2.1. Etude de la nappe

III.3.2.1.1. Paramètres physiques

- **Potentiel Hydrogène et température**

Pour déterminer le pH, nous avons utilisé une méthode électro-métrique avec électrode. L'appareil donne les valeurs du pH et de la température, affichées directement sur son écran.

- **La conductivité**

La conductivité électrique a été mesurée au laboratoire à l'aide d'un conductimètre. L'unité de conductivité est exprimée par le déci Siemens par mètre (dS/m).

III.3.2.1.2. Paramètres chimiques

Les paramètres à étudier sont les cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}) et les anions (Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-}), par les méthodes suivantes:

- **Titrimétrie**

Les Chlorures, les carbonates et les bicarbonates, ainsi que le calcium ont été dosés par titrimétrie.

- ✓ Les chlorures Cl^- selon la méthode de MOHR, basée sur le titrage d'un volume d'eau avec une solution $AgNO_3$ concentrée en présence de l'indicateur K_2CrO_4, jusqu'à changement de la coloration et le début du dépôt d'un précipité rouge.
- ✓ Les carbonates CO_3^{2-} et les bicarbonates HCO_3^-, par ajustement du pH à 8.3 par H_2SO_4 dilué. Les concentrations des carbonates et bicarbonates expriment ce qu'on appelle l'alcalinité ou le titre alcalimétrique complet (TAC) ; donné en degré français (F°).
- ✓ Le calcium Ca^{2+}ajusté à un pH =13 par la soude (NaOH) avec ajout d'une pincée de murexide puis titrage d'un volume d'eau avec une solution d'EDTA concentrée jusqu'à changement de la coloration vers le violet.

- ➢ **Complexométrie**

La dureté totale a été déterminée par complexométrie en utilisant l'EDTA comme réactif et le noir d'Eriochrome T comme indicateur coloré. Ce dosage représente la mesure de la dureté de l'eau (TH) en degré Français, avec :

TH (°F) = [Ca^{2+} ($méql^{-1}$) + Mg^{2+} ($méql^{-1}$)]*5, et par conséquent : Mg^{2+}= TH - Ca^{2+}

- ➢ **Photométrie à flamme**

Le sodium Na^+ et le potassium K^+ **:** sont analysés par le photomètre à flamme.

- ➢ **Résidu sec**

Le résidu sec est obtenu par dessiccation à 105°C. Il correspond à la totalité des sels dissous et donne une idée sur le degré de minéralisation des eaux.

III.3.2.2. Etude des sols

Les analyses physiques et chimiques ont été réalisées au laboratoire de pédologie de la faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université d'Ouargla.

III.3.2.2.1. Granulométrie

L'analyse granulométrique a été faite par tamisage pour la fraction sableuse et par sédimentométrie pour la détermination des fractions limoneuses et argileuses.

III.3.2.2.2. Calcaire total

On utilise la propriété du carbonate de calcium de se décomposer sous l'action d'un acide, en eau et gaz carbonique. Ce dernier est recueilli dans un tube gradué en ml ou en unités inférieures (**AUBERT, 1978**).

$$CaCO_3 + 2HCl \; CaCl_2 + H_2O + CO_2$$

III.3.2.2.3. Gypse

Nous avons utilisé la méthode chimique par le dosage des ions SO_4^{2-} libérés après une attaque aux carbonates d'ammonium et précipitation sous forme de chlorure de baryum.

III.3.2.2.4. Matière organique

Pour la détermination du carbone organique et par la suite la matière organique nous avons utilisé la méthode ANNE. Elle repose sur l'oxydation du carbone organique du sol par un oxydant puissant (bicarbonate de potassium) en milieu acide puis titrer par le sel de MOHR (HABBAD,1992).

III.3.2.2.5. Conductivité électrique

Elle est mesurée par la méthode de conductimétrie pour un extrait 1/5 de la solution du sol.

III.3.2.2.6. pH

Il est mesuré par un pH-mètre sur des extraits au 1/2 de la solution du sol.

III.3.2.2.7. Bilan ionique

Effectué sur des extraits du rapport (terre/eau) de 1/5

a) Cations solubles

- Na^+ et K^+ par spectrophotomètre à flamme **;**

- Ca^{2+} et Mg^{2+} ont été déterminés par la méthode de titrimétrie à l' EDTA (Ethylène Diamine Tétra Acétique) qui permet de faire un dosage du calcium et du magnésium. Les réactifs nécessaires pour cette manipulation sont :

Ethyléne Diamine Tétra Acétique (EDTA) à 10N, une solution tampon pH=10, les indicateur colorés et une solution KOH (concentré à 28%) (RODIER et al., 2005, *In* MENSOUS,2010).

b) Anions solubles

- Cl^- : Les chlorures sont dosés selon la méthode de Mohr, qui basé sur la précipitation par les nitrates d'Argent en présence de chromate. (HABBAD, 1992)

- HCO_3 : Sont dosés par titrimétrie au H_2SO_4 en présence de méthyle orange

- SO_4^{2-} : Dosé par gravimétrie après précipitation à l'état de sulfate de Baryum (HABBAD, 1992).

III.3.2.3. Outils informatiques

Les résultats d'analyses physico-chimiques de l'eau de la nappe sont présentés sous forme de diagrammes qui permettent une interprétation aisée des résultats (le diagramme de Piper et le diagramme de Schoeller-Berkaloff). Le logiciel Surfer 9 a été utilisé pour l'élaboration des cartes piézométriques et autres cartes.

Chapitre IV- Résultats et Discussions

IV.1. Etude de la nappe alluviale de Guerrara

IV.1.1. Etude hydrodynamique (piézométrique)

Pour mener une caractérisation hydrodynamique de la nappe superficielle logée dans les alluvions de quaternaire de la région de Guerrara, des relevés piézométriques ont été effectués pendant plusieurs campagnes et qui visent la détermination des paramètres hydrodynamiques de cet aquifère et dont le but est comme suit :

- L'établissement des cartes piézométriques;
- La caractérisation de l'écoulement et le comportement de la nappe

L'étude piézométrique de la nappe consiste à la mesure de sa profondeur, ses coordonnées géographiques et sa côte dans chaque puits. Cela dans le but de tracer la carte piézométrique et de déterminer le sens d'écoulement de cette nappe. Les mesures de la profondeur de la nappe ont été effectuées par une sonde électrique graduée. Les coordonnés géographiques des points d'eau ont été mesurés par un GPS.

IV.1.1.1. Inventaire des points d'eau

Un inventaire des puits qui vont être utilisés comme piézomètres et points d'eau pour l'échantillonnage a été mené à travers l'ancienne palmeraie de Guerrara (Fig.10). Le choix des points d'eau ou puits s'est fait d'une manière à avoir un réseau suffisant pour réaliser les cartographies piézométriques de la nappe, une répartition la plus régulière que possible de ces points de manière à disposer d'un niveau d'information équivalent et progressif dans les endroits du passage des crues de l' Oued Zegrir à l'intérieur de la palmeraie, et en fin éviter les points où le captage des forages dont l'exploitation perturbe la piézométrie de la nappe.

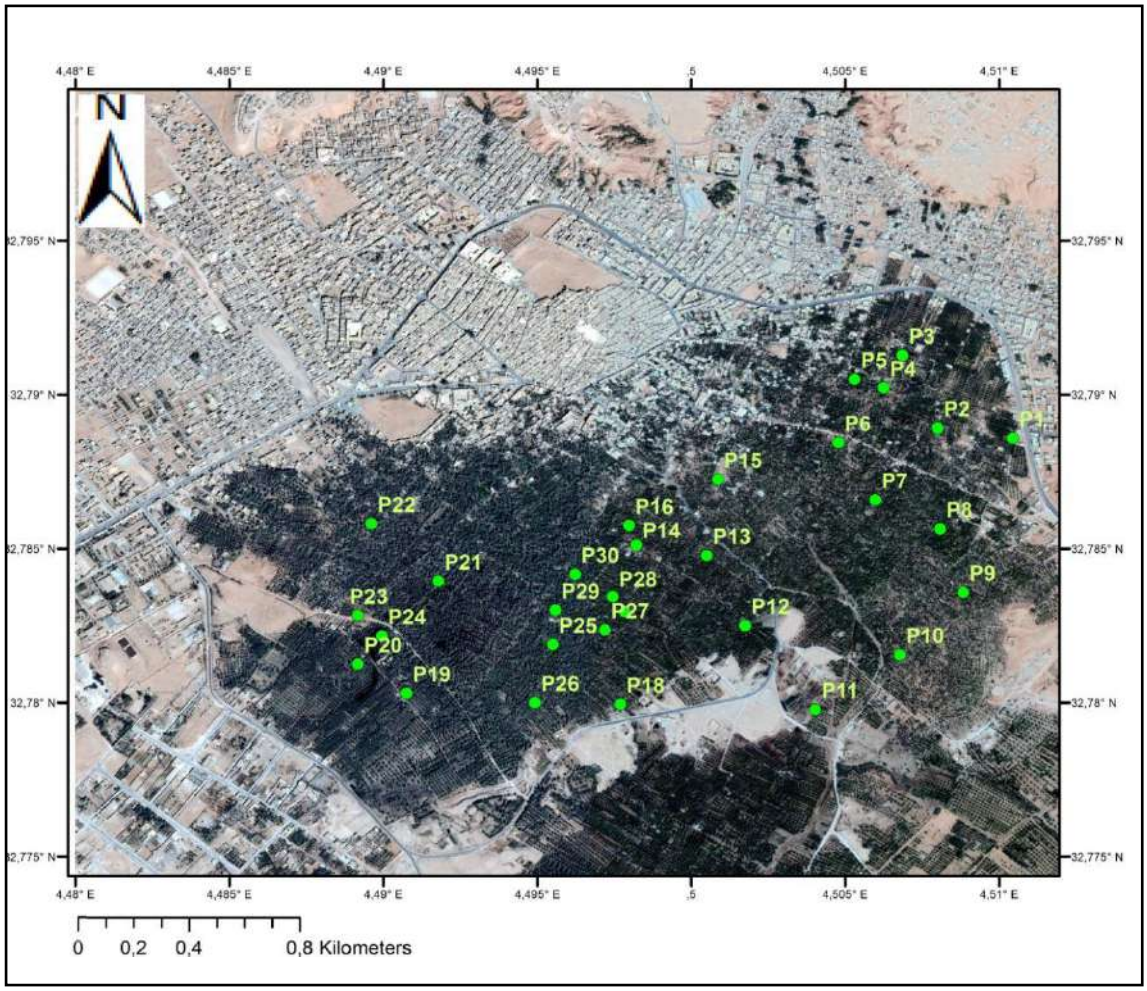

Figure 10: Répartition spatiale des puits à l'intérieur de la palmeraie de Guerrara

IV.1.1.2. Piézométrie de la nappe

Le suivi de la piézométrie de la nappe dans le temps et dans l'espace permet de reconnaître d'une part, la direction générale de l'écoulement et d'autre part d'identifier quelques paramètres hydrodynamiques (gradient hydraulique et vitesse d'écoulement). Ces derniers nous renseignent sur le temps de séjour des eaux d'infiltration dans la couche aquifère et par conséquent nous informe sur le degré des échanges chimiques entre l'eau et la roche.

La cartographie piézométrique a été illustrée à la base des relevés piézométriques des différentes campagnes, en utilisant le logiciel Surfer 9. Les figures 11, 12, 13 et 14 représentent les cartes piézométriques de la nappe alluviale de Guerrara, durant les quatre compagnes d'observation.

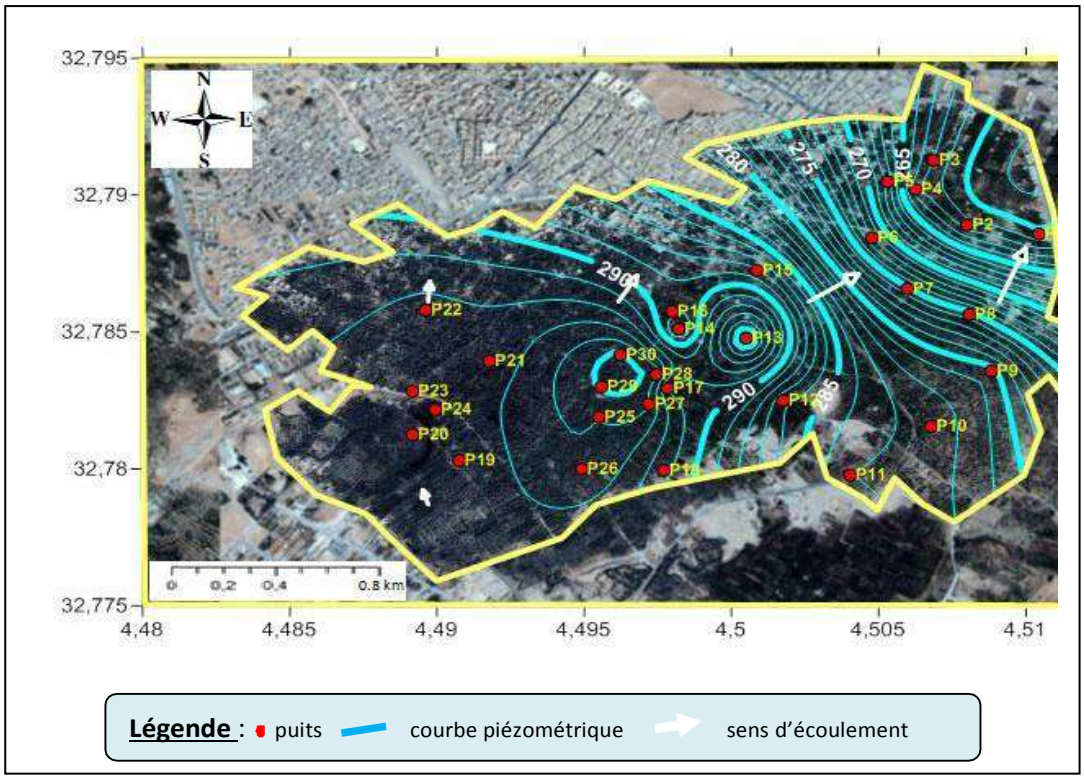

Figure 11 : Carte piézométrique de la première compagne (Octobre 2011)

L'observation de la morphologie de la carte piézométrique de première compagne permet de constater que l'écoulement souterrain se fait, en général, suivant les directions : du Sud-ouest vers le Sud et du Sud-ouest vers le Nord-est, où on remarque un dôme piézométrique ou ligne de partage des eaux souterraines qui représente la zone d'alimentation de la nappe par l'Oued.

Dans la zone centrale, les courbes se trouvent espacées suite à un gradient hydraulique faible. Au Nord- ouest de la palmeraie, les courbes deviennent plus espacées car c'est la zone d'accumulation des eaux souterraines. On pense que la variation du gradient hydraulique est due, essentiellement, à l'hétérogénéité de la lithologie. La profondeur maximale enregistrée est à de côte 295.3m, ce cas est rencontré au niveau du puits 21.

Lors de la deuxième compagne (Avril 2012), uniquement 18 puits sur 30 ont été étudiés, suite à des contraintes pratiques sur terrain, notamment des problèmes d'accès aux puits (fermeture des puits par les propriétaires des exploitations). De ce fait, les résultats de la piézométrie de la nappe pour cette compagne (Fig. 12), ainsi que la comparaison de la fluctuation de la nappe des deux compagnes octobre 2011 et avril 2012 (Fig.15), sont exprimés pour 18 puits uniquement.

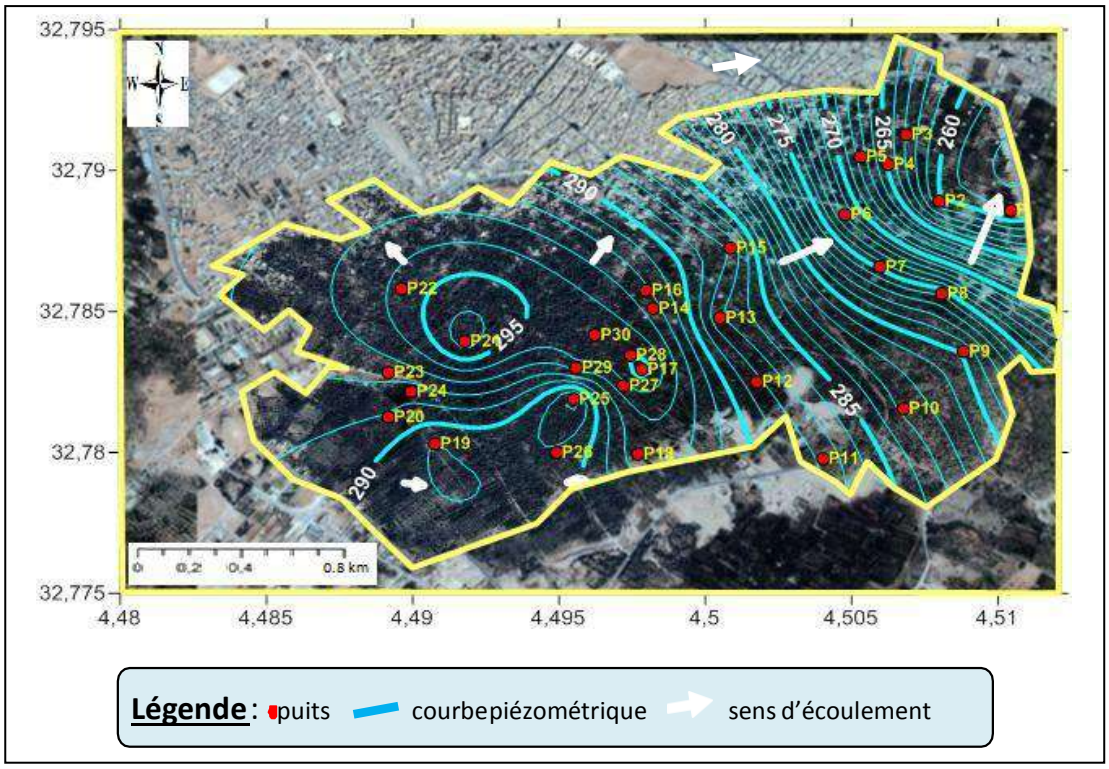

Figure 12 : Carte piézométrique de la deuxième compagne (Avril 2012)

La carte piézométrique correspondante à la deuxième compagne possède la même morphologie piézométrique que celle de la première compagne. Ceci est dû à la faible recharge qui n'arrive pas à combler l'exhaure de la nappe. Nous remarquons une certaine fluctuation de la surface piézométrique avec un gradient hydraulique très faible. Cependant, nous notons une faible diminution des côtes piézométriques des puits par rapport à la première compagne.

Le gradient hydraulique est fort au Nord-est ce qui traduit une faible perméabilité. Par contre, il est faible dans le reste de la palmeraie ce qui reflète une forte perméabilité des formations.

Les niveaux piézométriques de la nappe sont illustrés en annexes (Annexe 2). Elles sont comprises entre 2 à 23.8 m dans les puits 29 et 1 respectivement durant la première compagne. Concernant la deuxième compagne les profondeurs varient de 2.20 à 25.4 m dans les puits 11 et 1 respectivement.

Le niveau piézométrique présente une évolution régulière, caractérisée par une baisse pendant la deuxième compagne sous l'effet de l'évaporation, de la faible recharge de la nappe et du pompage dans certains endroits.

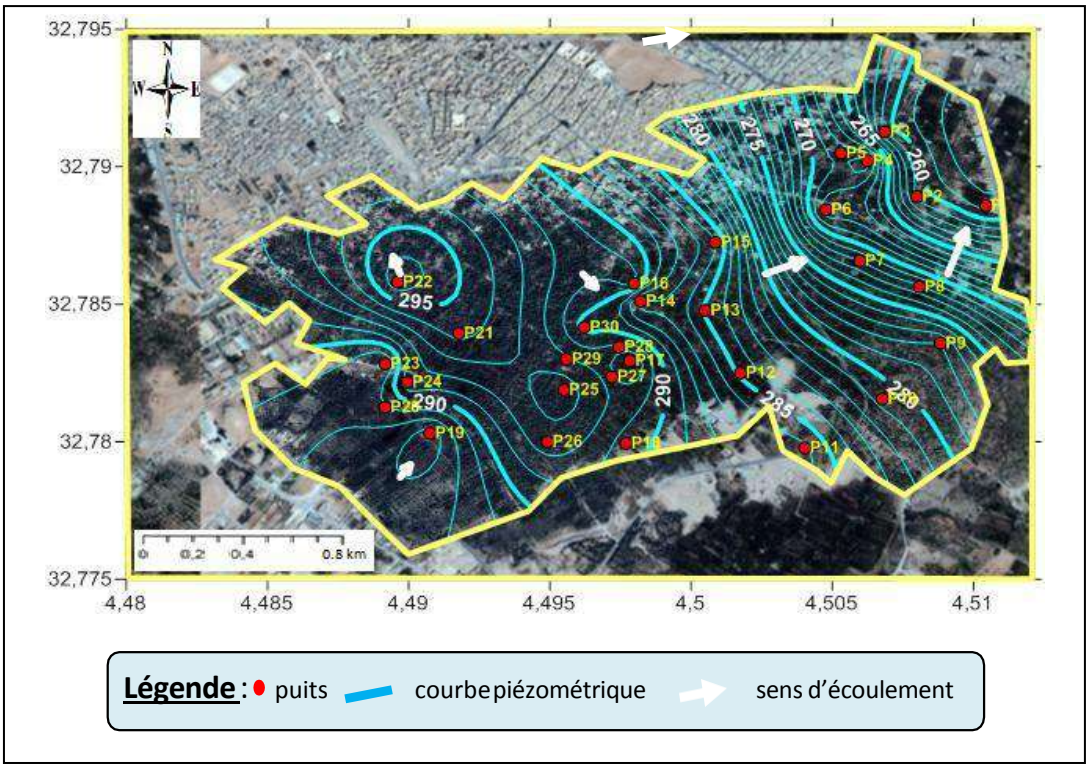

Figure 13 : Carte piézométrique de la troisième compagne (Octobre 2012)

La carte piézométrique de la 3ième compagne a la même forme que les deux précédentes et avec le même sens d'écoulement, mais avec une baisse du niveau piézométrique de la nappe.

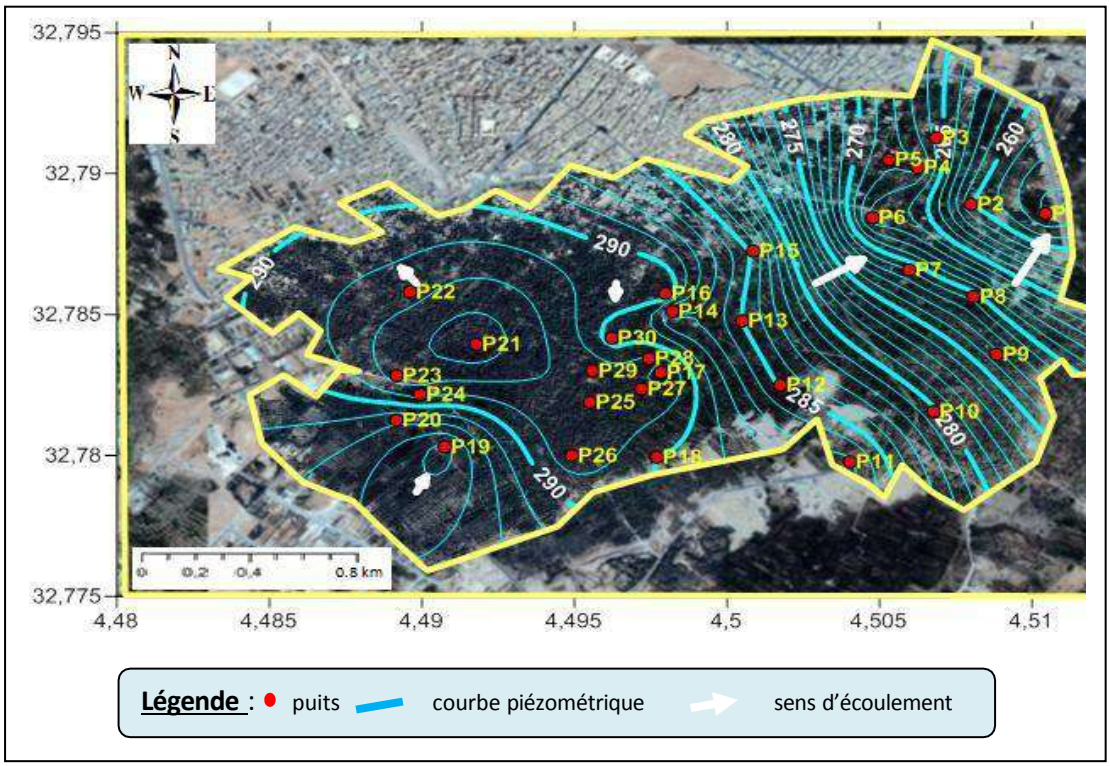

Figure 14 : Carte piézométrique de la quatrième compagne (Avril 2013)

la carte précédente a la même allure et le même sens d'écoulement, avec une baisse du niveau piézométrique.

IV.1.1.2.1.. Fluctuation de la nappe

Le niveau de la nappe dans les puits est variable. La comparaison des mesures piézométriques des compagnes permet de donner une idée sur la fluctuation du niveau piézométrique de la nappe durant les deux années de l'étude. Pour la première année de l'étude nous avons comparé les données piézométriques de la 1re et la 2ième compagne (Fig. 15 et 16) en tenant compte des données de 18 puits uniquement par défaut de manque de données durant la deuxième compagne.

En suite, nous avons essayé de voir la fluctuation de la nappe pour trois compagnes et dans 30 puits. Il s'agit de la première, la troisième et la quatrième compagne. Ceci pour vérifier l'évolution du niveau de la nappe sur deux années (Fig.16 et 17).

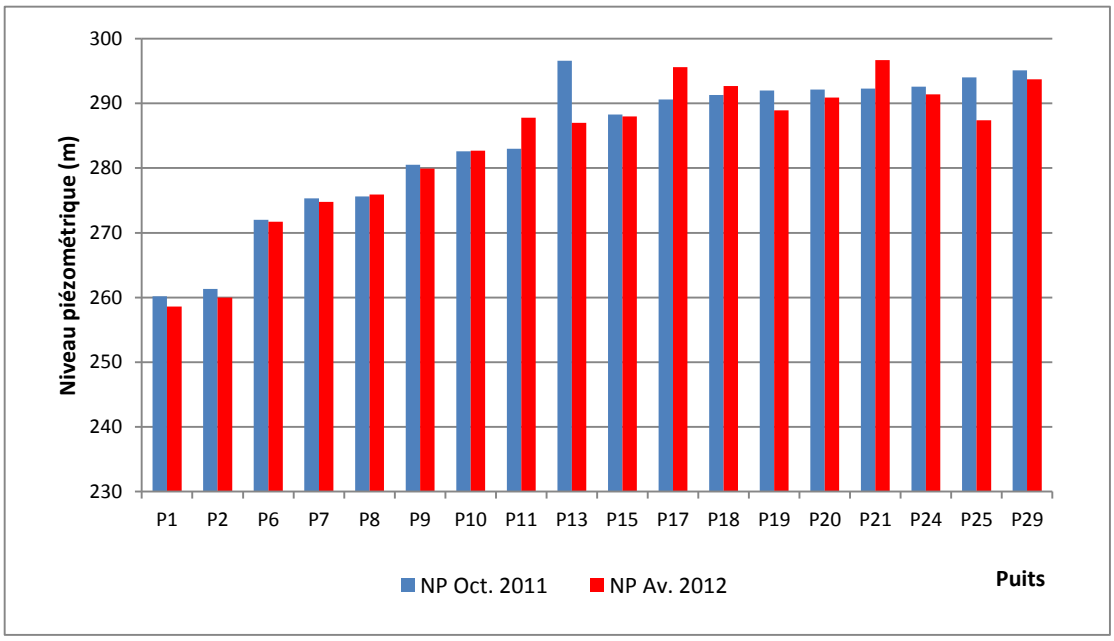

Figure 15: Variation du niveau piézométrique de la nappe durant la 1re et la 2ième compagne

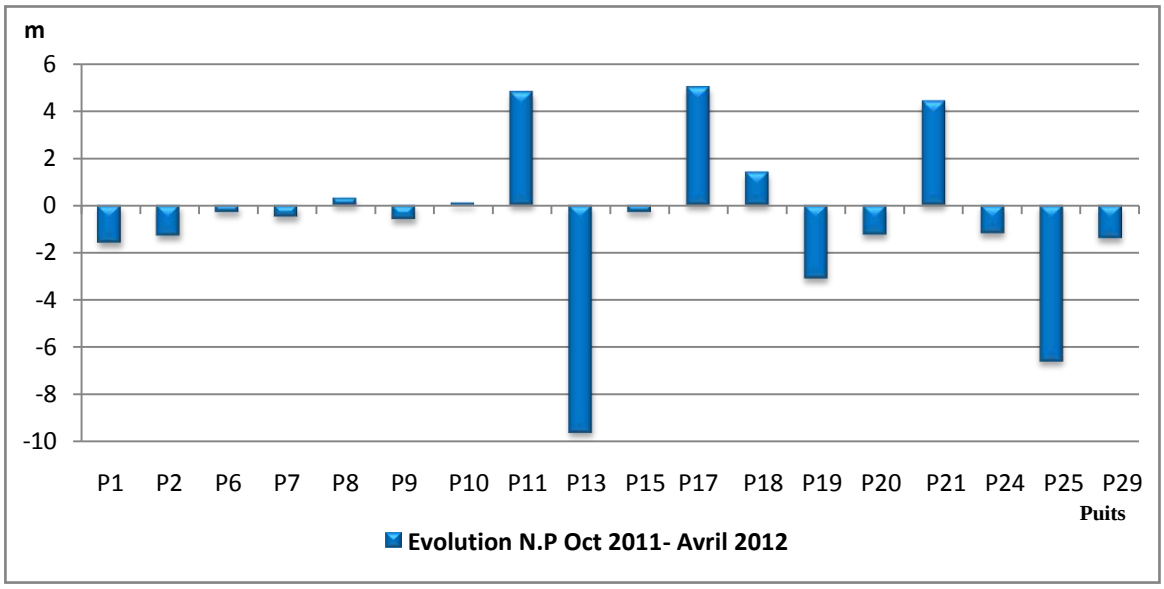

Figure 16: Evolution du niveau piézométrique durant 1re et la 2ième compagne

Les résultats des mesures du niveau piézométrique de la nappe durant les deux compagnes montrent que 12 puits sur 18 observés ont connu un rabattement de l'ordre de 0,3 à 7,7 m. on note une baisse remarquable du niveau piézométrique dans le puits p13 qui peut être expliqué par un fort rabattement de la nappe dans cette zone de la palmeraie (fort pompage).

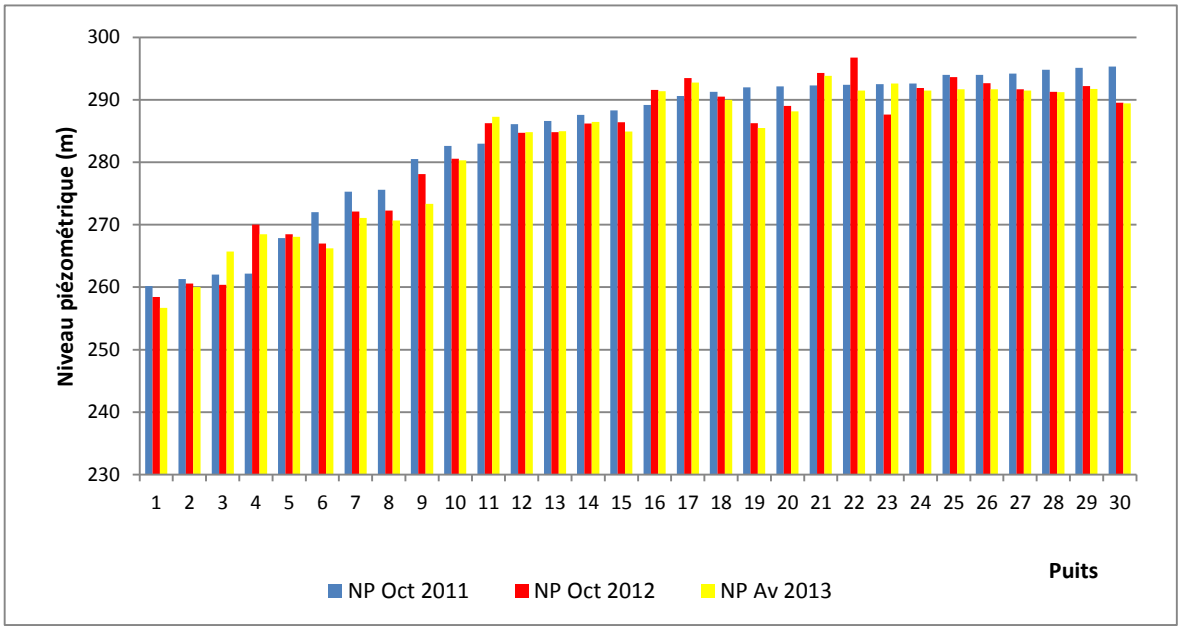

Fig. 17: Fluctuation de la nappe durant les deux années d'observation

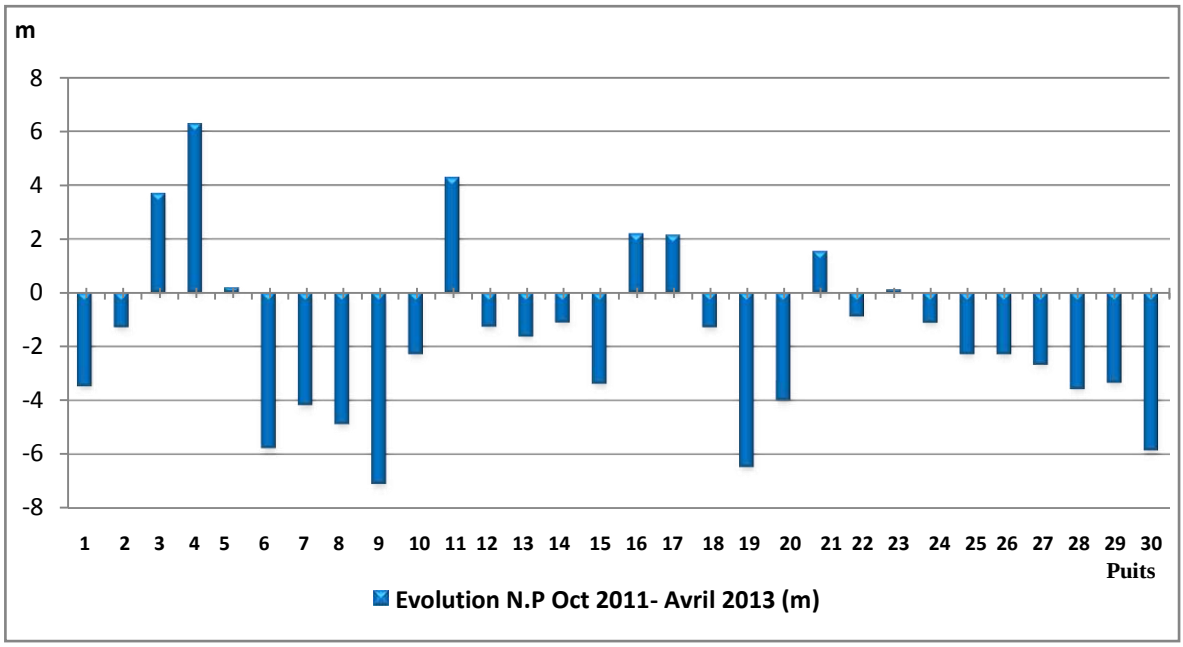

Fig. 18: Fluctuation de la nappe entre la 1re, la 3ième et la 4ième compagne

La nappe alluviale de Guerrara a connu un baissement du niveau piézométrique (rabattement) durant la période d'étude pour la majorité des puits observés.

Ce rabattement est variable d'un puits à l'autre et varie de 0,3 à presque 8 m d'une manière générale. Ceci a été observé dans 23 puits sur 30 entre Octobre 2011 et octobre 2012, et pour 24 puits sur 30 entre Octobre 2012 et Avril 2013.

Cette baisse du niveau de la nappe est due surtout à la faiblesse de l'alimentation en eau de la nappe durant cette période, suite à l'absence de crues de l'Oued Zegrir, le pompage et les fortes évaporations.

IV.1.1.3. Profondeur du réservoir

Les profondeurs de nappe mesurées dans les puits, durant la première compagne, par rapport au niveau du sol, sont comprises entre 2 à 23.8 m dans les puits 29 et 1 respectivement. Durant la deuxième, les profondeurs sont comprises entre 2.20 à 25.4 m dans le puits 11 et1 respectivement.

Le niveau piézométrique présente une évolution régulière, caractérisée par une baisse pendant la période de la deuxième compagne sous l'effet de l'évaporation et le faible régime pluviométrique pendant la période de mesure, suite à une faible recharge de la nappe et au pompage dans certains endroits.

IV.1.1.4 Identification des paramètres en relation avec le niveau de la nappe

a. Relation eaux de surface (météorologie et/ ou hydrographie) / eau de nappe

L'alimentation de l'aquifère de la nappe alluviale semble exclusivement assurée par les précipitations atmosphériques et le diversement des terrasses alluviales supérieures. De manière générale, l'Oued Zegrir qui coule sur ce bassin draine la nappe alluviale.

b. Relation eau de la nappe / autre aquifère souterraine

L'aquifère du système alluviale repose directement sur le substratum imperméable et n'est pas en relation avec d'autre aquifère souterrain, si ce n'est qu'avec les terrasses supérieurs. Néanmoins les aquifères et le lit majeur sont considérés comme étant en continuité hydrique. En période de crue, localement, des inversions de flux sont possibles au niveau des alluvions du lit majeur.

c. Influence anthropique

Le prélèvement : aucun pompage industriel évolutif n'est à signaler dans le périmètre rapproché de la zone d'étude, mais nous signalons que plusieurs puits sont exploités à des fins d'irrigation.

L'infiltration : pour les barrières étanches, nous signalons la présence de la zone urbaine à proximité immédiate de la palmeraie. Il faut mettre en considération qu'il y'a peut être d'éventuelles influences dues à la présence d'ouvrages urbains souterrains, susceptibles de modifier les écoulements souterrains.

IV.1.1.5. Structure et géométrie du réservoir et fonctionnement du système aquifère

Des formations alluviales et des remplissages alluviaux des fonds de vallée sont fréquents dans la région. Même en l'absence d'un réseau hydrographique pérenne, il existe souvent un écoulement souterrain à la base des alluvions. Lorsque l'épaisseur de ces alluvions est importante l'aquifère représente une ressource en eau importante pour l'hydraulique agricole de la région.

Les alluvions récentes du bassin sont le siège d'une nappe alluviale importante en relation dynamique avec le cours d'eau. Il existe une relation permanente entre la nappe alluviale contenue dans les alluvions et l'Oued Zegrir, qui se traduit par un équilibre dynamique.

Conclusion

Au terme de ce chapitre nous pouvons dire que l'écoulement souterrain se fait, en général, selon une direction Sud-ouest vers le Nord-est, Sud vers le Nord-est et Sud-ouest vers le Sud.

- L'évolution de la piézométrie dépend des conditions climatiques, qui influent sur la fluctuation de la nappe durant les deux compagnes. La lithologie de la nappe régit l'écoulement en influant sur la vitesse de circulation.
- Le niveau piézométrique présente un faible changement régulier. Il est caractérisé par une baisse durant la période de la deuxième compagne. Ceci peut être lié à l'effet de l'évaporation, et la faible recharge de la nappe. Il faut signaler l'évolution irrégulière de quelques puits, qui sont exploités à des fins d'irrigation.
- Les fluctuations saisonnières de la surface piézométrique connaissent une diminution qui peut atteindre 7 m. Au centre, elles oscillent entre 2 et 4 m et parfois elles sont presque nulles. Ces fluctuations sont soumises aux caractéristiques climatiques de la région (faible pluviométrie et forte évaporation) et au pompage.

IV.1.2. Etude hydrogéochimique des eaux de la nappe

La géochimie des eaux apporte des renseignements complémentaires sur la structure et le fonctionnement des systèmes aquifères à partir de l'étude hydro-chimique qui donne des informations à l'hydrogéologie. Elle complète les cartes piézométriques, permet de comparer les eaux entre elles et par fois trouver des solutions pour les besoins d'alimentation (DJEMMEL, 2009).

Il est évident que le chimisme des eaux souterraines dépend principalement de la composition lithologique des couches traversées et du temps de séjour des eaux.

Cette interaction influe sur la teneur en éléments majeurs (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-}). Les concentrations de ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs tels que les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface (GOUAIDIA, 2008).

Dans ce chapitre, nous cherchons à expliquer le comportement, l'origine et l'évolution des éléments chimiques décrits pour comprendre le fonctionnement hydraulique du système aquifère. L'étude se base principalement sur les informations des campagnes de prélèvement à partir des puits.

IV.1.2.1. Origine et signification géochimiques des éléments chimiques

a. Ions Ca^{2+} et Mg^{2+}

Ces ions ont toujours une origine interne au système. Ils proviennent surtout de la dissolution des roches calcaires et dolomitiques. Le calcium peut aussi provenir du gypse. Ils indiquent principalement le temps du séjour de l'eau dans l'aquifère (BAKALOWICZ, 1979 in CHABOUR, 2006)

b. Ions Cl^-, Na^+ et K^+

Ils sont d'origine principalement externe et peuvent provenir des formations salifères du Trias ou des formations marneuses et argileuses. Na^+ et K^+ peuvent provenir de l'altération des minéraux silicatés. En revanche, l'élément Cl^- peut avoir une origine météorique (lessivage des formations lithologiques par les apports pluviométriques). Ces ions sont généralement très peu abondants dans les terrains carbonatés, excepté dans des conditions particulières du gisement.

c. Les ions Sulfates

Les eaux naturelles contiennent pratiquement toujours des ions sulfates avec des proportions très variables. Leur présence résulte de la légère solubilité des sulfates de calcium dans les roches gypseuses et de l'oxydation des sulfures se trouvant dans les roches. Cependant, ils peuvent aussi provenir de l'oxydation dans l'atmosphère de l'anhydrite sulfureuse par combustion des hydrocarbures (BAKALOWICZ, 1979 in CHABOUR, 2006).

IV.1.2.2. Description des paramètres physicochimiques

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux de la nappe alluviale de Guerrara pendant la période d'observation sont présentés dans le tableau VI.

Tableau VI : Présentation Statistique des éléments chimiques de la nappe

		Période des hautes eaux (Octobre 2011)			Période des basses eaux (Avril 2012)		
Eléments	**Normes OMS**	**Max**	**Min**	**Moye.**	**Max**	**Min**	**Moye.**
HCO_3^-	250 mg/l	997,35	198,2	606,3	869,9	297	492,4
SO_4^{2-}	250 mg/l	1974	245	1043,1	3483	321	1242,2
Cl^-	259 mg/l	1650	219,8	829,5	1889,2	244,6	793,1
Ca^{2+}	100 mg/l	872,5	120	355,1	840	346,8	346,8
Mg^{2+}	50 mg/l	334	63	177,4	220	86	151,9
Na^+	150 mg/l	950	60	484,4	1826	100	588,5
K^+	12 mg/l	130	5,6	40,1	96	12	40,7
NO_3^-	50 mg/l	25	0	5	-	-	-
Ph	6,5 à 9,5	8,4	7,2	7,7	7,78	6,96	7,4
Conductivité (dS/m)	2,8	11,63	0,91	5,4	8,78	0,51	5,3

a- Echantillonnage

Un réseau d'échantillonnage a été choisi pour permettre d'acquérir des données représentatives sur la variabilité spatiale et temporelle de la qualité des eaux souterraines de la nappe étudiée. Ce réseau se compose de deux ensembles de points (coté Est et coté Ouest) d'eau et couvre la totalité de la palmeraie de l'amont vers l'aval.

b- Validité des résultats

La précision des analyses effectuées pour l'ensemble des échantillons dépend de la balance ionique avec des valeurs inférieures à 5% voir à 10%.

Les calculs de la balance ionique (BI) ont concerné les eaux de l'ensemble des 30 puits échantillonnés en touchant la majorité de la région d'étude. La plus part des résultats obtenus sont de bonne qualité (BI<5%) et d'autres sont acceptables.

IV.1.2.2.1. Etude des paramètres physiques

L'origine de l'eau ainsi que sa concentration ionique sont gérées par un certains paramètres qui sont: La température (T°), le potentiel hydrogène (pH), la conductivité (σ) et la minéralisation (Me).

a-Température

La température de l'eau est un élément qui permet de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment).

Les valeurs de températures de l'eau sont influencées par les conditions atmosphériques de la région d'étude lors des mesures.

b- Potentiel Hydrogène (pH)

Les mesures du pH montrent que l'ensemble des eaux des puits se trouvent dans l'intervalle des normes de potabilité (Fig. 19).

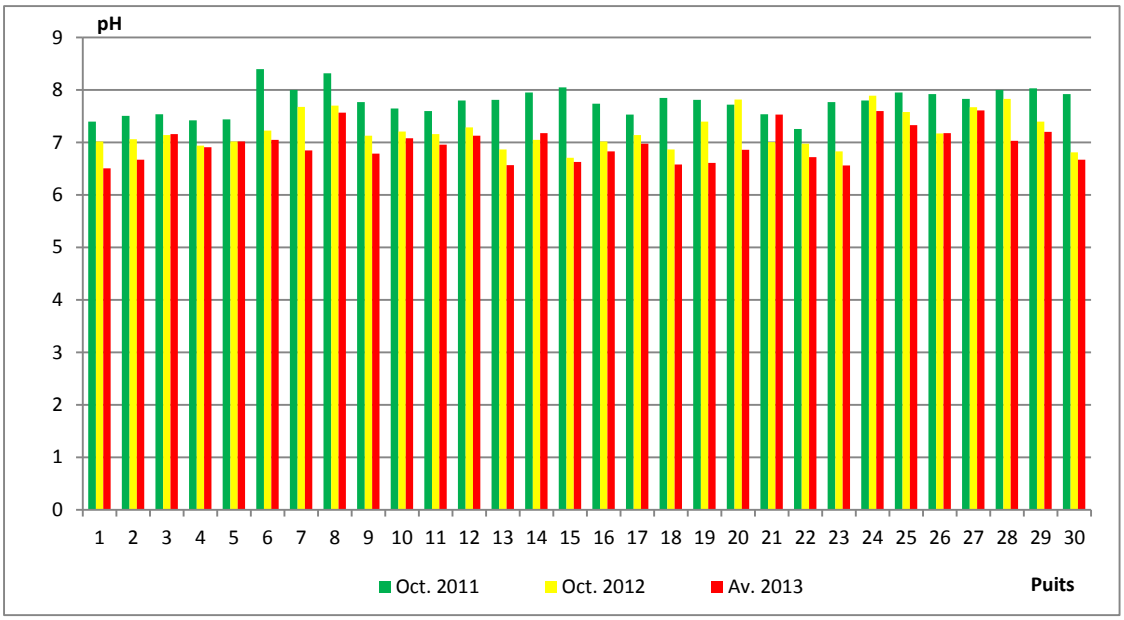

Figure 19 : Variation saisonnière du pH

Les valeurs du pH sont comprises entre 6,5 et 8,4 durant les trois compagnes d'échantillonnage. Nous avons remarqué une légère diminution des pH dans le temps pour la plus part des puits (Fig. 20).

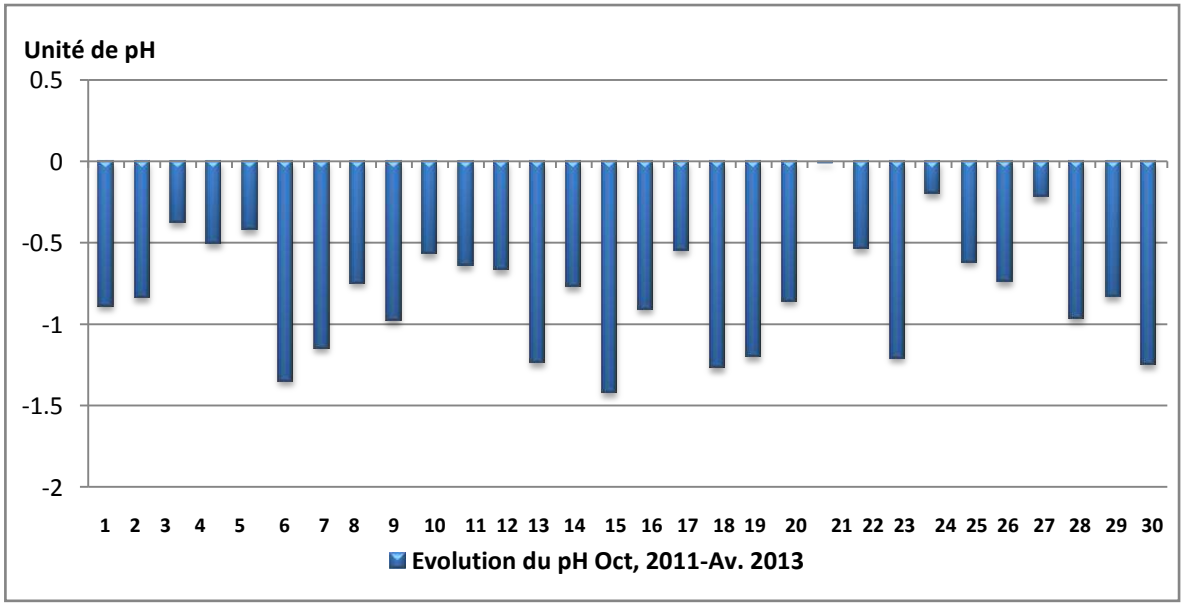

Figure 20 : Variation du pH de l'eau dans le temps

La diminution du pH des eaux de la nappe varie de 0,2 à 1,5 unité de pH. Ceci est probablement dû à la faiblesse de la recharge de la nappe durant cette période et à l'importance de certaines réactions chimiques dans l'eau. Ceci est favorisé par les conditions climatiques. A partir du pH nous pouvons connaitre les teneurs en CO_2 dissous ; d'où l'évaluation de l'agressivité chimique des eaux qui est estimée à 7 pour les eaux alluviales de la région de Guerrara.

. **C- Conductivité électrique**

La mesure de la conductivité électrique permet d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau et de donner une idée sur la minéralisation totale de l'eau (Fig. 21 et 22).

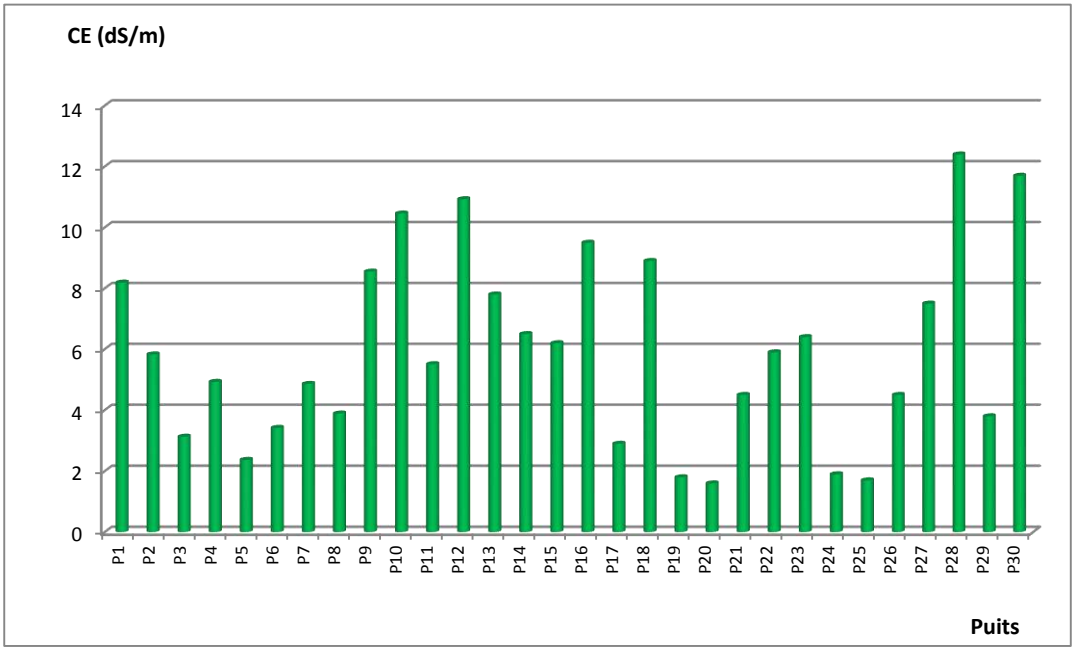

Fig.21 : Evolution de la CE de la 3ième compagne

Nous remarquons une variabilité de la CE dans les puits avec des valeurs de 1.6 à 12.4 dS/m. cette variabilité est sans doute liée une différence dans la minéralisation des eaux dans les puits.

La figure 22 montre les valeurs de la CE dans les 30 puits durant la quatrième compagne.

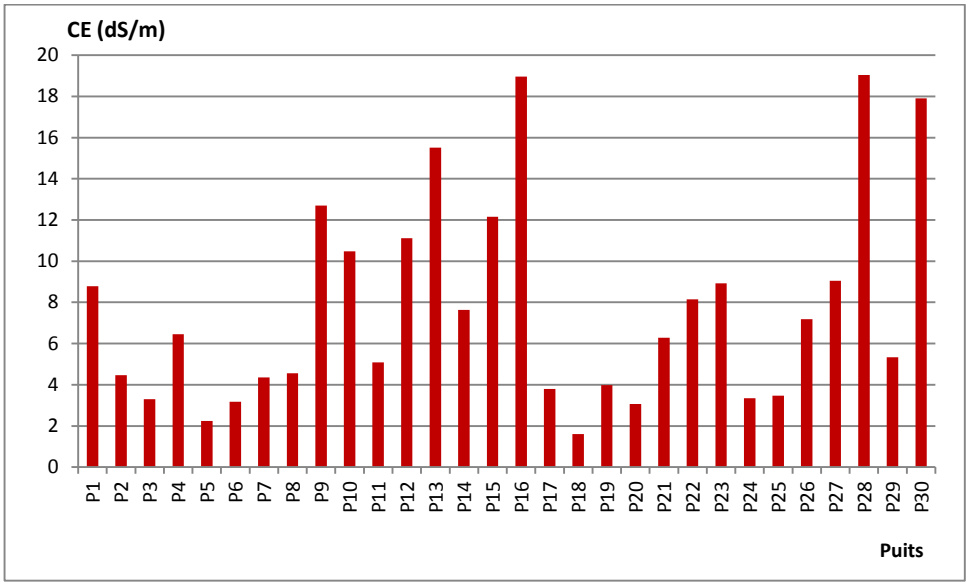

Fig.22 : Evolution de la CE de la 4ième compagne

Nous remarquons une augmentation des valeurs de CE de la 3ième à la 4ième compagne. Ceci est du à la minéralisation des eaux suite à la faible recharge de la nappe, le pompage et les fortes évaporations.

Les figures 23, 24 et 25 montrent les cartes iso-conductivité des eaux de puits des 1re, 3ième et 4ième compagnes.

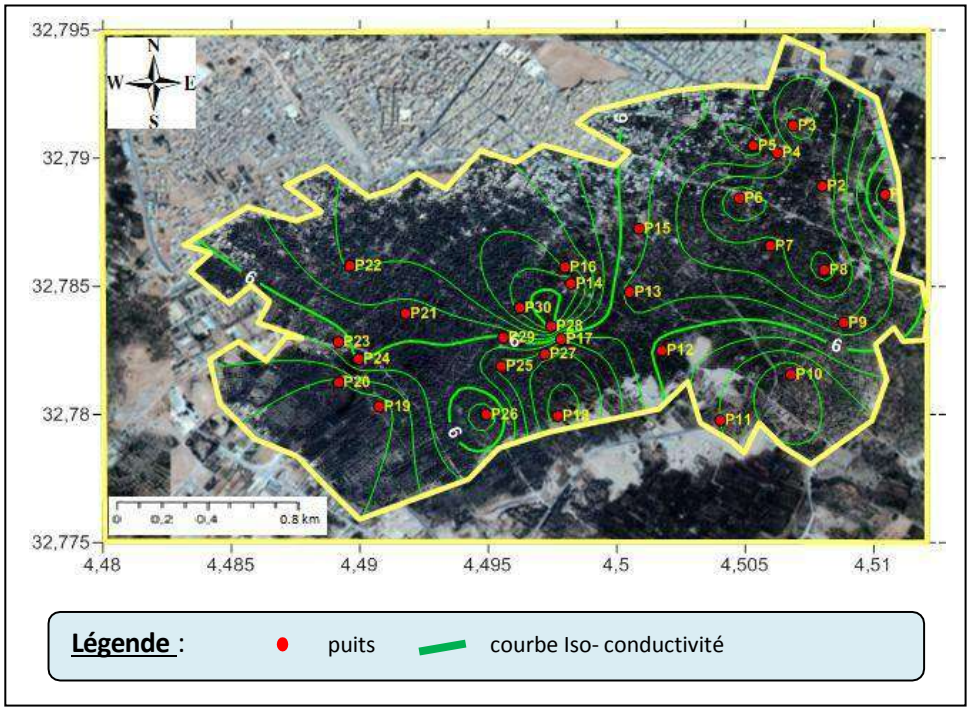

Figure 23 : Carte iso-conductivité de la 1re compagne

Les valeurs de la conductivité électrique montrent que la plupart des puits dépasse la norme recommandée relative à la potabilité des eaux, surtout pendant la période de la première compagne. Les valeurs minimales sont enregistrées à l'Ouest de la palmeraie. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 11,6 dS/m et sont rencontrées dans un axe vers la zone d'accumulation des eaux souterraines au Nord-est de la nappe.

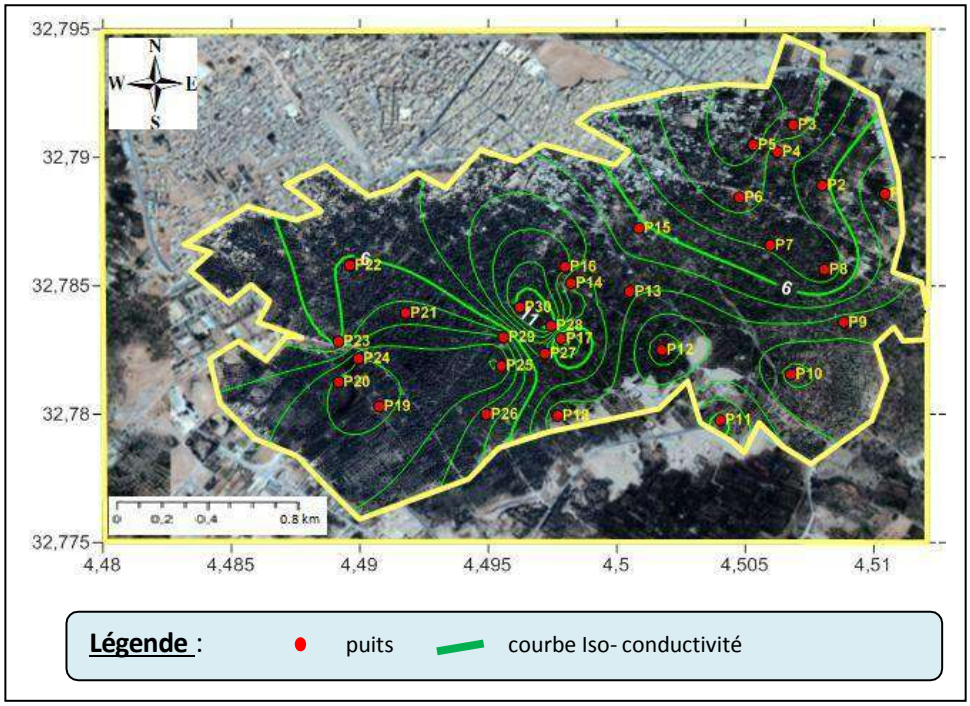

Figure 24 : Carte iso-conductivité des eaux de la 3ième compagne

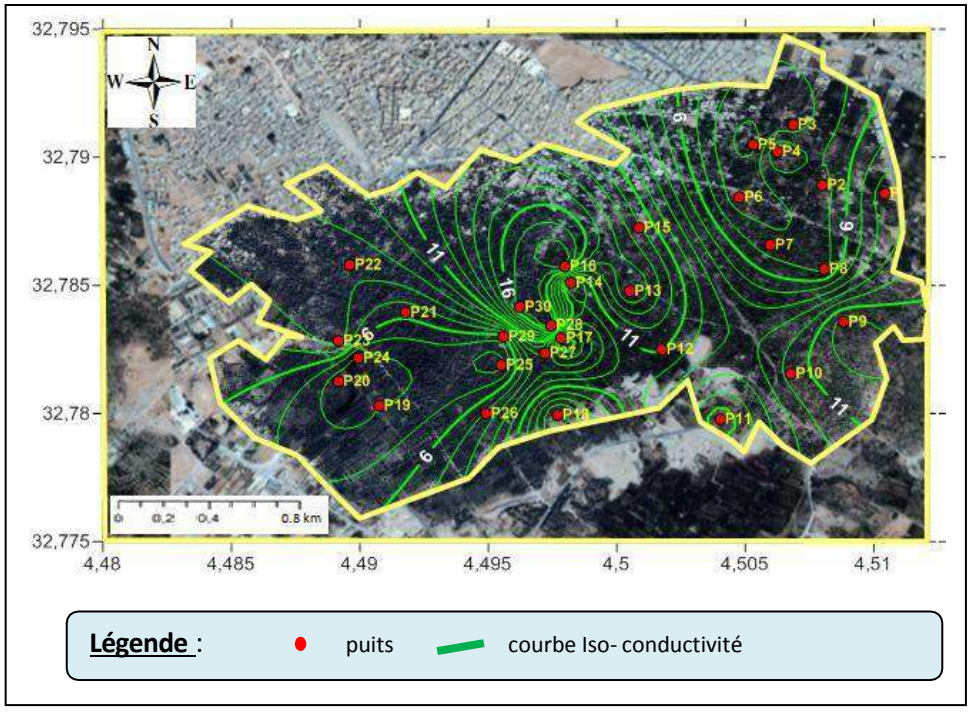

Figure 25 : Carte iso-conductivité des eaux durant la 4ième compagne

Les résultats obtenues représentent des variations assez importantes dans l'espace ; entre 0,91 et 11,63 dS/m au niveau des puits P6 et P28 respectivement durant la première compagne, et entre 0,15 et 8,87 dS/m pour les puits P6 et P1, durant la deuxième compagne. Alors que dans le temps, les valeurs de la conductivité pendant la première compagne sont relativement proches aux celles enregistrées dans la deuxième.

d- Minéralisation

La minéralisation d'une eau représente la totalité des substances et les matières en suspension quelles soient organiques ou minérales. Elle est exprimée en mg/l et peut être représentée par la teneur en résidus secs. (DJEMMEL, 2009)

Le résidu sec est obtenu par dessiccation à 110 ° C, il correspond à la totalité des sels dissous et donne une idée sur le degré de minéralisation des eaux. Les résultats obtenus pour l'année 2011/2012 (Fig. 26 et 27), montrent une certaine variabilité de la minéralisation des eaux dans l'espace et dans le temps.

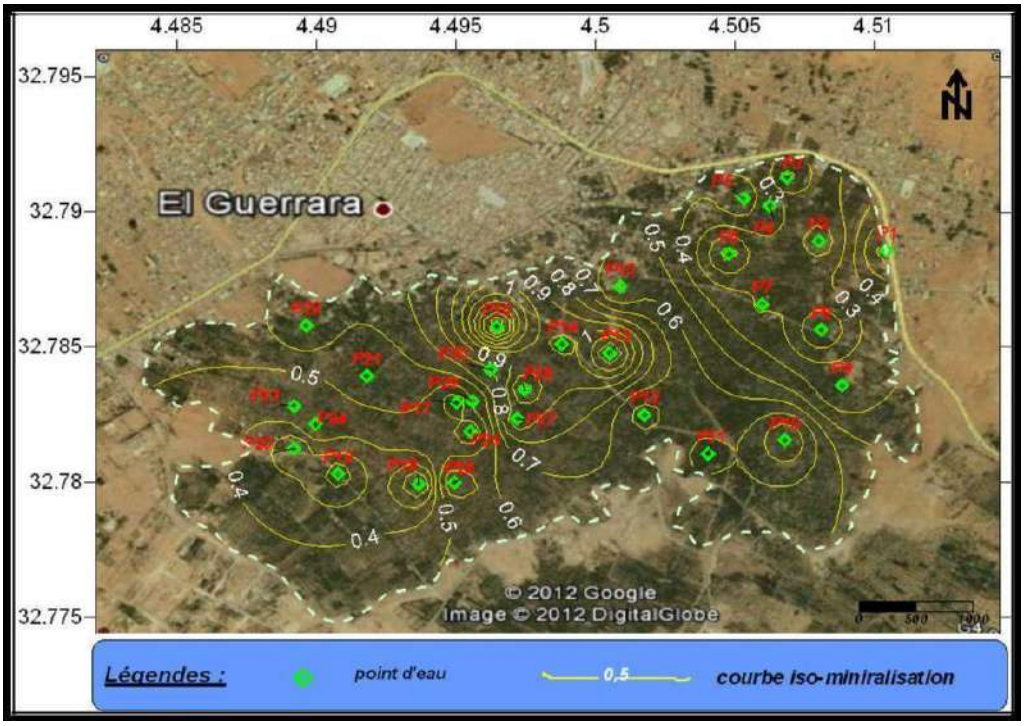

Figure 26 : Carte iso- minéralisation des eaux durant la 1re compagne

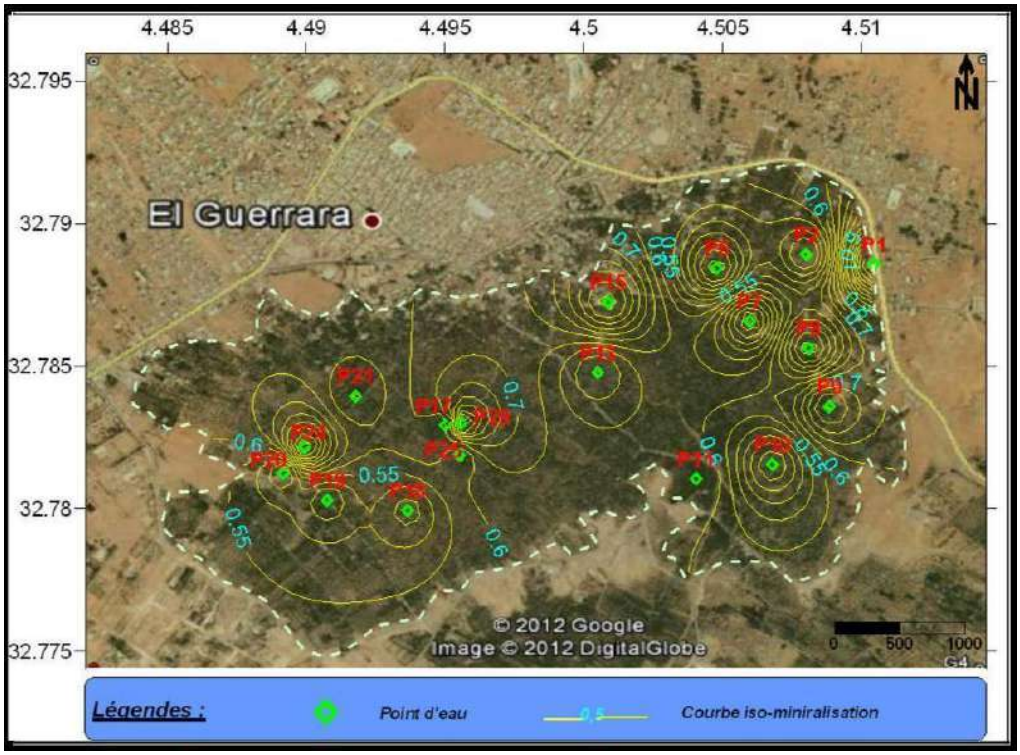

Figure 27 : Carte iso- minéralisation des eaux durant la 2ième compagne

Au cours de la première compagne, les courbes iso-minéralisation montrent des valeurs qui augmentent dans la partie centrale de la palmeraie dont les valeurs les plus élevées sont enregistrées au niveau des puits 22, 14, 28, 13 et 16. Ceci correspond à des valeurs de minéralisation totales de l'ordre de 0.98, 1.02, 1.1, 1.3 et 1.6 g/l respectivement. Pour la même compagne, les valeurs minimales sont observées au niveau des puits 6, 3, 18 et 8, avec des valeurs de l'ordre de 0.060, 0.073, 0.082, 0,095 g/l respectivement.

Pour la deuxième compagne, les valeurs les plus élevées sont remarquées au niveau des puits 04, 06, 12, 13 et 15, et sont de l'ordre de 0.94 ; 0.97 ; 1; 1.06 et 1.3g/l respectivement. Les valeurs minimales sont observées au niveau des puits 6, 8, 2 et 20 avec des valeurs de l'ordre de 0,22; 0,32 et 0,33 mg/l respectivement.

Selon la classification de la minéralisation, trois familles ont été identifiées :

- La première famille est axée autour d'une minéralisation normale de l'intervalle 500-1000 mg/l où la conductivité est comprise entre 1 et 2 dS/m, qui est attribuée à des puits dont la moyenne de profondeur est de 9,7m.
- La seconde est axée autour de 1000-1500 mg/l où elle est considérée comme non conforme aux normes de potabilité mais pouvant être utilisée pour l'irrigation et

l'abreuvement des animaux. Cette famille est présentée par les eaux des puits qui ont une conductivité comprise entre 2 et 3 dS/m et avec une moyenne de profondeur de 12m.

- La troisième est représentée par les eaux ayant une minéralisation >1500 mg/l. Elle est attribuée aux eaux des puits où la moyenne de profondeur est de l'ordre 6.6m. Pour cette dernière la conductivité est comprise entre 4 et 11.63 dS/m. Ces eaux sont très salées et impropres en dehors des usages souhaitables.

e- Relation résidu sec / conductivité

Les figures 28 et 29 expriment la relation entre le résidu sec et la conductivité électrique durant les deux compagnes de l'année 2011/2012.

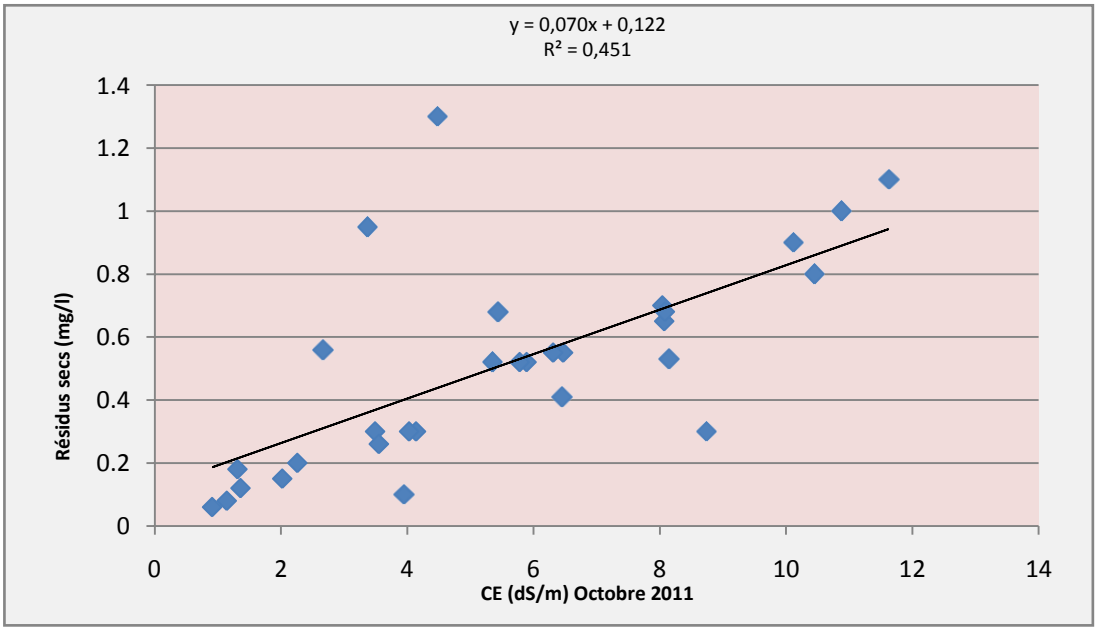

Figure 28 : Relation résidus sec /conductivité de la 1re compagne

La courbe de Résidu sec – Conductivité montre une relation de proportionnalité et une bonne corrélation positive avec r = 0,74.

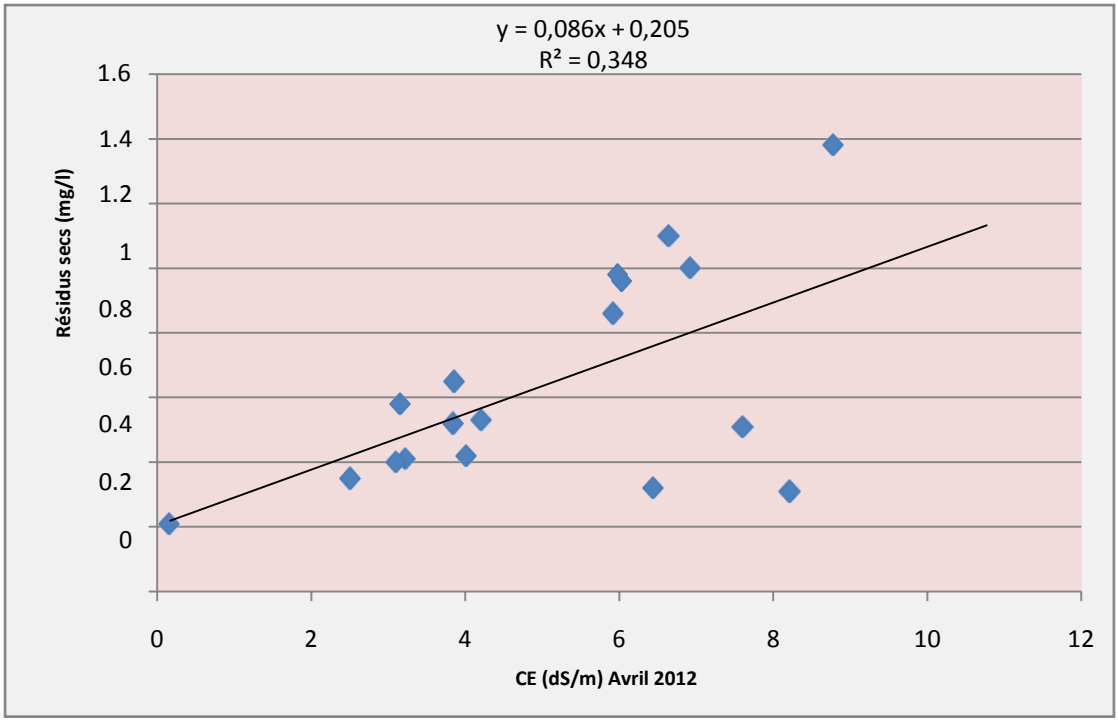

Figure 29 : Relation résidus sec /conductivité de la 2ième compagne

Les résultats obtenus pendant la période d'observation montrent que les zones de fortes valeurs de conductivité électrique se coïncident avec celles de fortes valeurs de minéralisation totale.

f-Relation résidu sec – profondeur

Sur la figure 32 nous avons présenté la relation entre la minéralisation et la profondeur de la nappe (niveau piézométrique) pour la période d'observation d'octobre 2011.

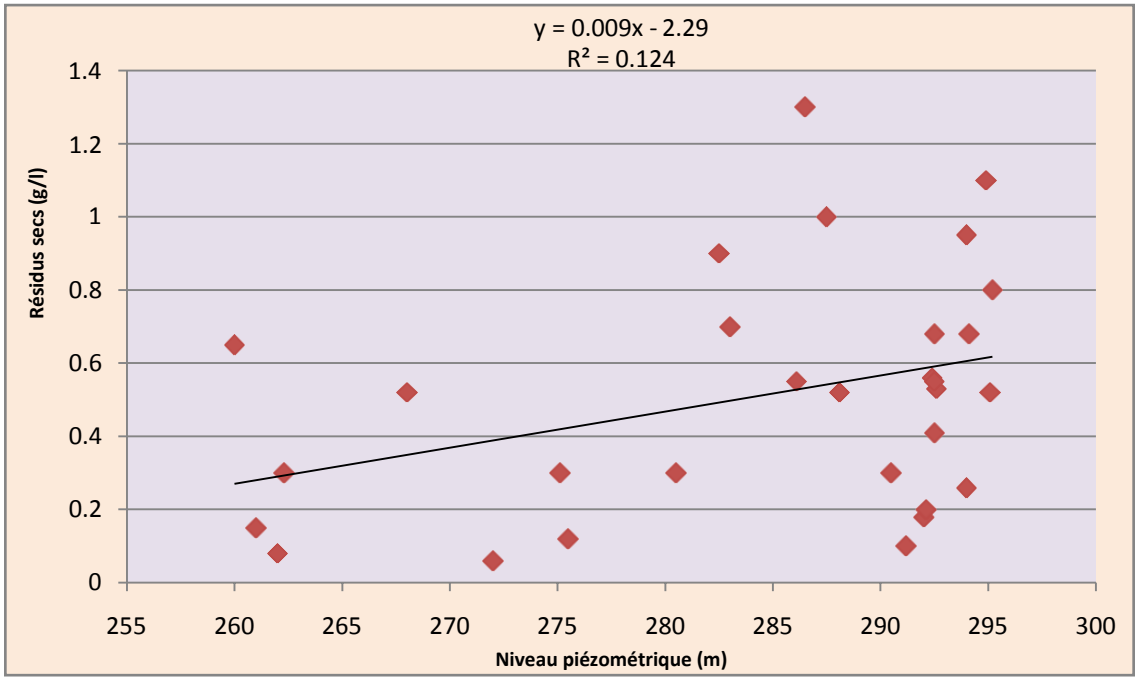

Figure 30 : Relation minéralisation – profondeur de la nappe durant la 1re compagne

Les eaux météoriques commencent à acquérir leur minéralisation dès les premières pluies où elles se chargent en une faible concentration d'éléments chimiques. Une fois interceptées par le sol, une partie des eaux de précipitation ruisselle à la surface et l'autre s'infiltre dans le sous sol pour atteindre la nappe. Ce qui explique l'accumulation de cette minéralisation à la surface de la nappe qu'en profondeur.

g-Dureté totale (Degré Hydrotimétrique Totale) (DHT)

Elle indique la teneur totale de l'eau en sel de Calcium (Ca^{2+}) et de Magnésium ($M^{2+}g$). Elle est exprimée en degré français (°F) et calculée selon la formule suivante :

$$DHT = 5\ (r\ Ca^{2+} + r\ Mg^{2+})\ °F$$

Où : $r\ Ca^{2+} + r\ Mg^{2+}$: désigne respectivement les quantités en réaction de Calcium et de Magnésium en méq/l.

Selon l'OMS les eaux potables de bonne qualité ont une dureté totale inférieure à 15°F, mais acceptable jusqu'à 50°F. Si elles dépassent cette valeur, leurs utilisations deviennent extrêmement difficiles et causent des problèmes pour la consommation et pour certains usages domestiques (DJEMMEL, 2009). La figure 33 représente la variation de la dureté totale des eaux d'un puits à l'autre au cours de la deuxième année de l'étude.

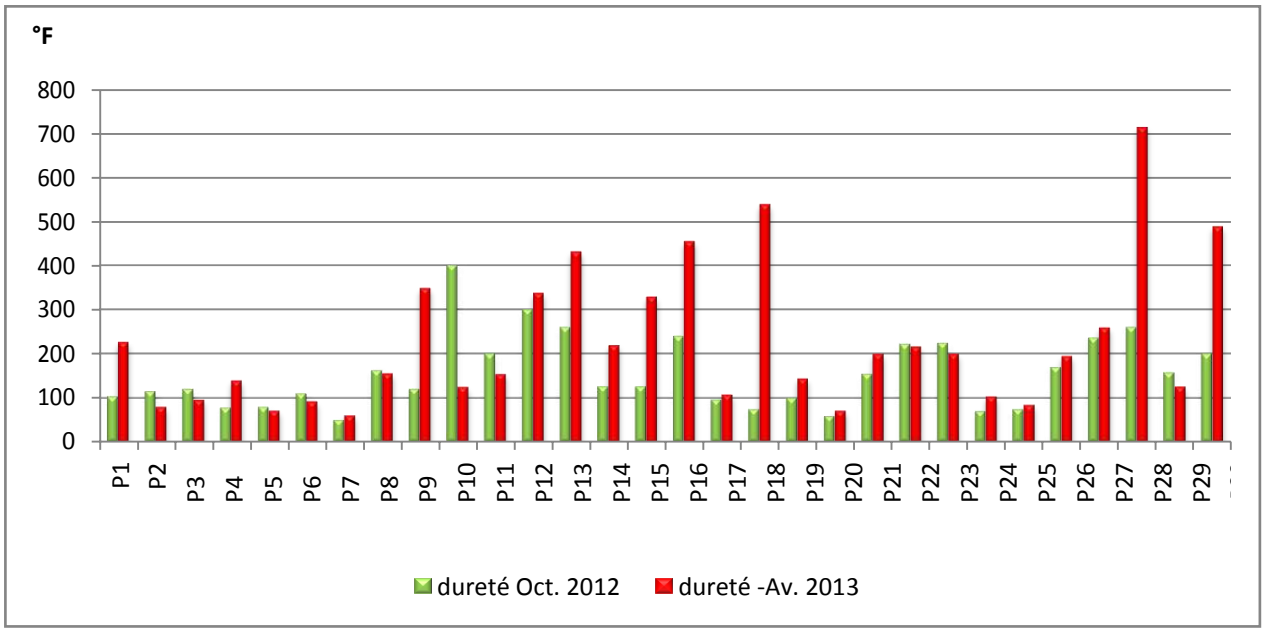

Fig. 31 : Variation de la dureté des eaux durant la deuxième année de l'étude

Les résultats obtenus montrent que les eaux de la nappe alluviale de Guerrara sont très dures avec des valeurs qui peuvent dépasser 500 °F (puits 18) et 700 °F (puits 28), durant la 4^{ième} compagne. On remarque une grande variation de la dureté des eaux étudiées avec des valeurs qui varient de 50 à 400 °F durant la 1^{ière} compagne et entre 60 à 700 pendant la 3^{ième} compagne. Cette variation serait liée à la nature lithologique de la formation aquifère et en particulier à sa composition en magnésium et en calcium.

IV.1.2.2.2. Etude des paramètres chimiques

La composition chimique des eaux souterraines est déterminée par les échanges de cations avec les couches géologiques environnantes, la dissolution et la précipitation de minéraux, les réactions d'évaporation et d'oxydoréduction. La composition chimique des eaux souterraines est déterminée par les échanges de cations avec les couches géologiques environnantes, la dissolution et la précipitation de minéraux, les réactions d'évaporation et d'oxydoréduction (Al-Omran et al, 2015).

Lors de son transit l'eau acquit une composition chimique liée à la nature lithologique du terrain traversé. L'analyse des eaux montre l'existence des principaux éléments chimiques suivants :

A. Cations

A1. Calcium

La plupart des puits présentent des eaux avec des teneurs supérieures à la norme de potabilité des eaux (250 mg/) (Fig. 32).

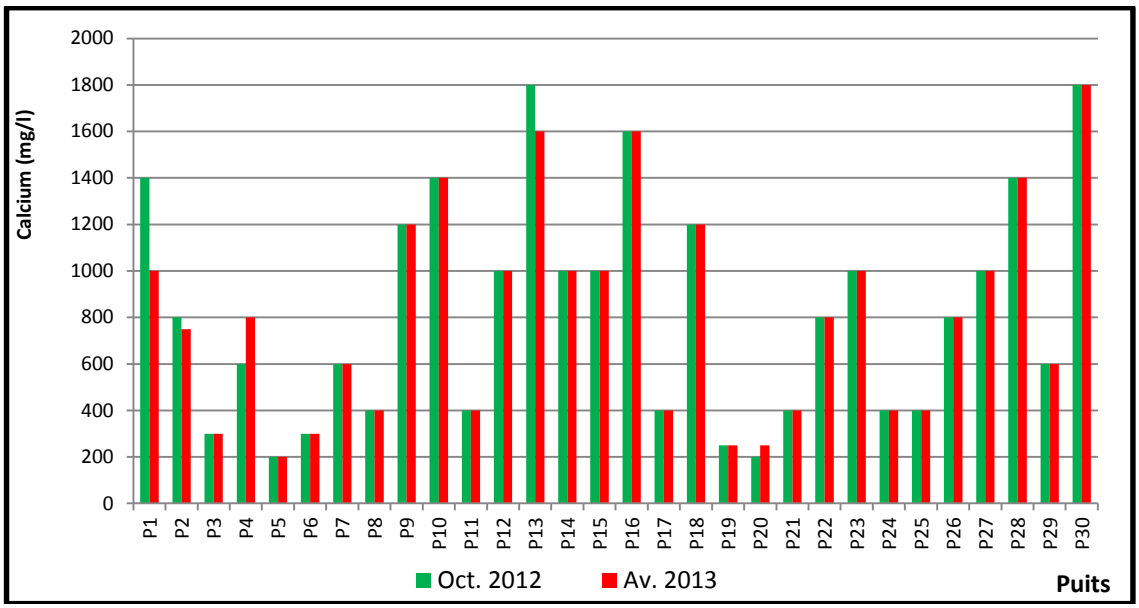

Fig. 32 : Variation des concentrations en calcium des eaux de la nappe de la 3ième et la 4ième compagne

Les valeurs les plus faibles avec un minimum de 134 mg/l sont observées au niveau des puits situés dans la partie Ouest de la palmeraie. Nous avons remarqué une certaine augmentation des valeurs de la deuxième compagne dans 53% (16 puits) des puits par rapport à celles de la première. Certains puits ont des teneurs élevées en calcium qui se rapprochent et parfois dépassent 1000 mg/l, ceci est du à la forte minéralisation des eaux dans certaines régions de la palmeraie.

A2. Magnésium

Les valeurs sont généralement inférieures à celles du calcium où la moyenne enregistrée 117.4 mg/l pendant la première compagne et 151.9 mg/l pour la deuxième compagne (Fig. 33).

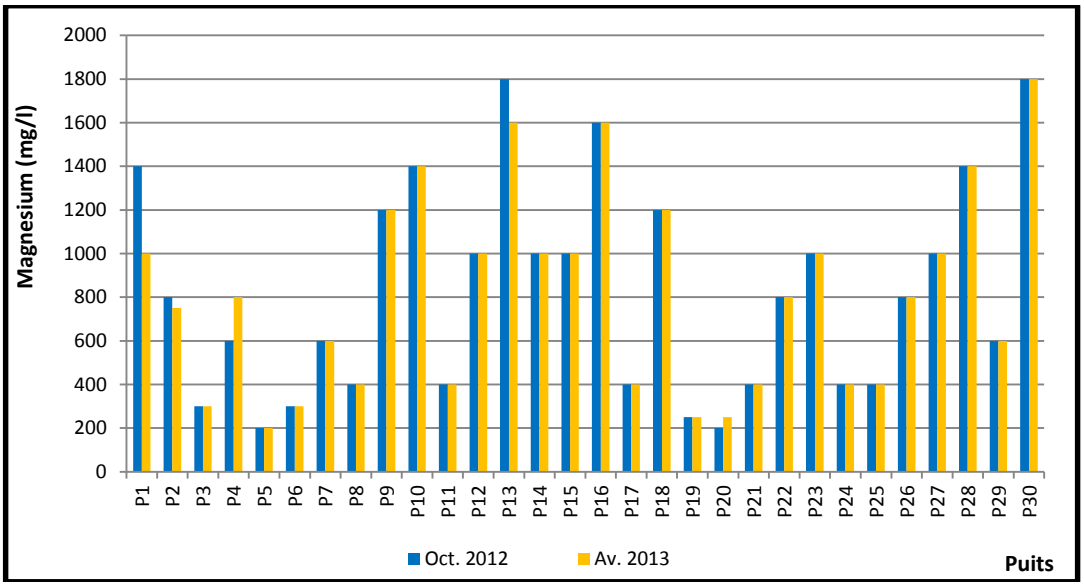

Fig. 33: Variation des concentrations en Magnésium des eaux de la nappe de la 3ième et la 4ième compagne

Des variations de concentration sont observées durant la période d'observation. Les concentrations les plus élevées sont observées au centre de la région. Nous notons que la plupart des puits (86,7 %) présentent des teneurs inférieures à la norme de potabilité des eaux de l'OMS.

A3. Sodium

Les concentrations de cet élément sont fortement remarquables dans les eaux. L'écoulement des eaux de la nappe du Sud-ouest vers le Nord-est a favorisé cette forte teneur en sodium, au fur et à mesure que l'on se déplace vers la zone d'accumulation (Fig. 34).

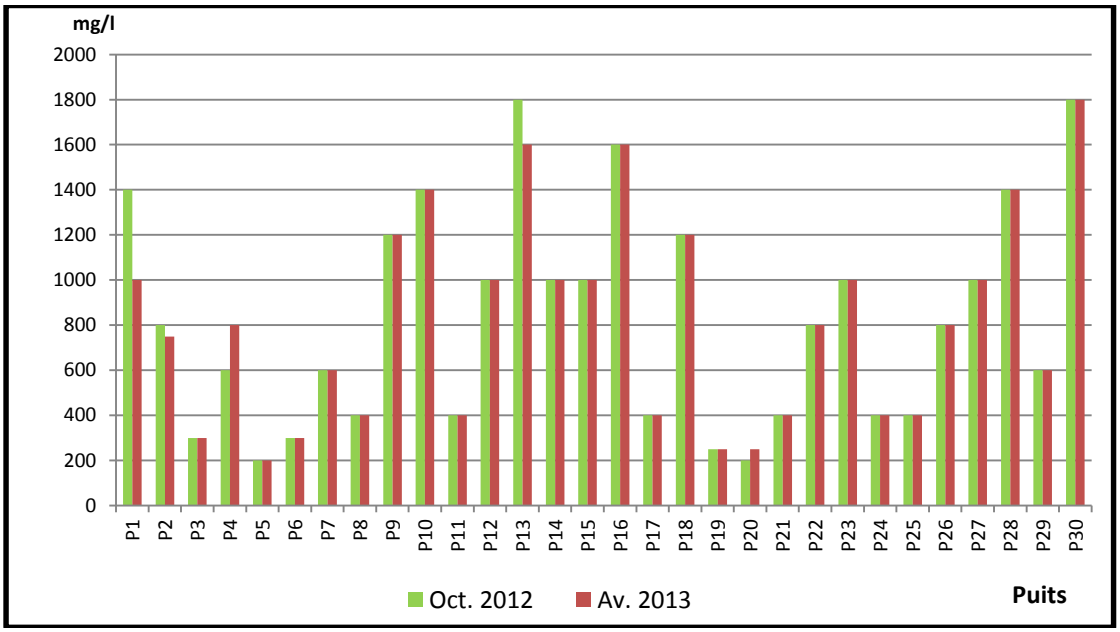

Figure 34 : Variation des concentrations en Sodium des eaux de la 3ième et la 4ième compagne

Les plus faibles teneurs en sodium sont de l'ordre de 200 mg/l et enregistrées dans le puits P5 pendant les deux compagnes. Nous signalons que presque la plupart des eaux dépassent les normes de potabilité des eaux. Les faibles concentrations se localisent à l'Est de la zone d'étude.

A4. Potassium

Les valeurs les plus élevées sont observées dans les puits 15, 16, 18, 21, 22, 23, 27, 28 et 30 avec une moyenne de 40,1 mg/l et un maximum d'environ 130 mg/l.

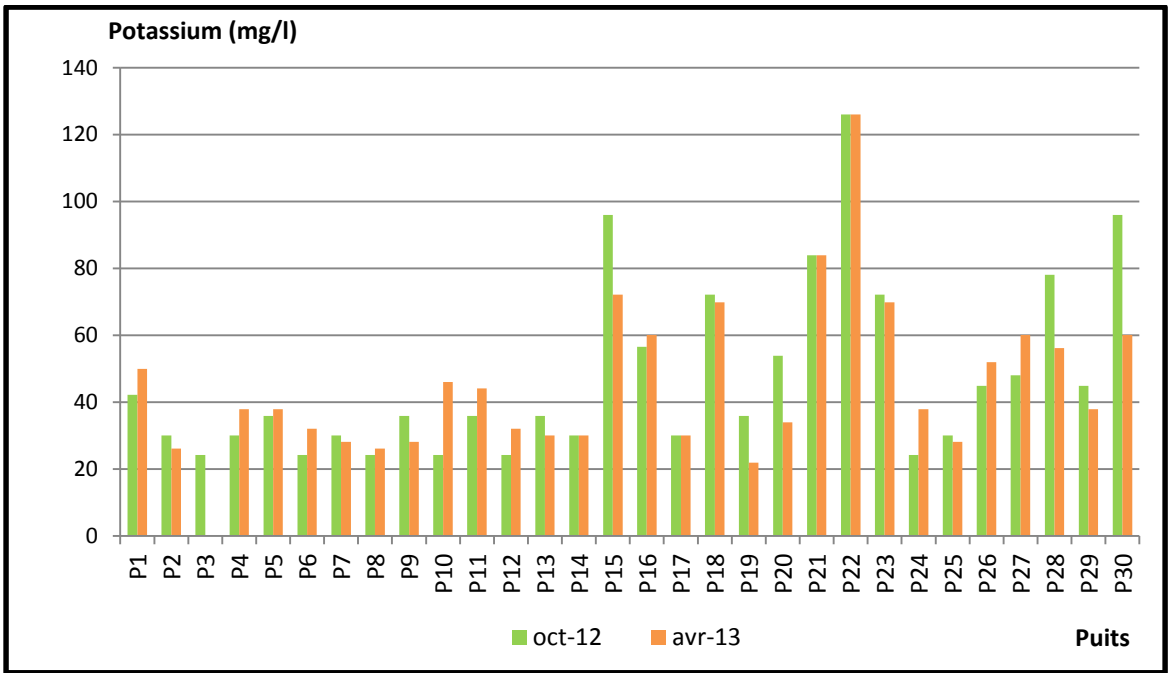

Figure 35 : Variation des concentrations en potassium des eaux de la nappe alluviale de Guerrara (2012/2013).

La totalité des valeurs enregistrées pendant les deux compagnes d'investigation ont indiqué des teneurs inférieures à la norme de potabilité des eaux (250 mg/l). Les valeurs les plus élevées sont observées dans la zone Est de la palmeraie pendant les deux compagnes. Les teneurs sont relativement faibles au coté Ouest de la zone d'étude (loin de la zone urbaine) par rapport aux autres endroits.

B. Anions

B1. Bicarbonates

Cet élément est faiblement réparti par rapport aux autres anions existants dans l'eau pendant la période d'observation (Fig.36).

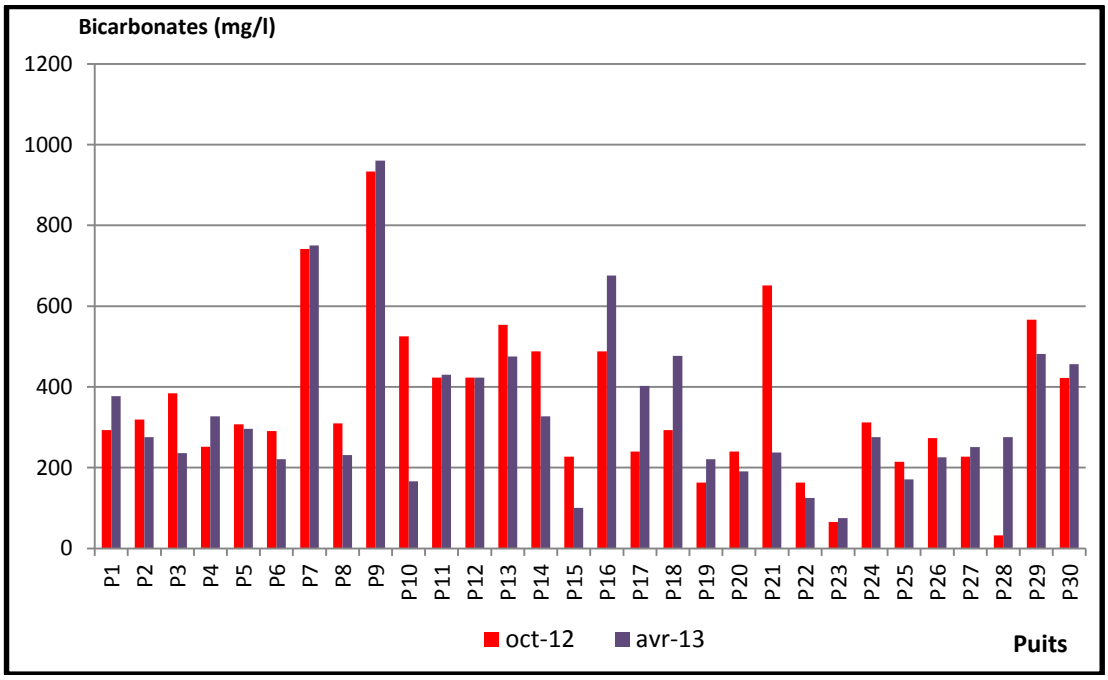

Figure 36 : Variation des concentrations en bicarbonates des eaux de la nappe alluviale de Guerrara (2012/2013).

Nous avons remarqué une augmentation des teneurs en bicarbonates dans la 4^{ième} compagne dans prés de 46% des puits étudiés(14). La plus part des eaux ont des teneurs inferieurs à 400 mg/l et les plus élevées sont celles des puits P7 et P9 (plus de 700mg/l) et les plus faibles concentrations se localisent à l'Est de la palmeraie Nous notons que la majorité des eaux dépassent les normes de potabilité ce qui est expliqué par la forte minéralisation des eaux de la plupart des puits.

B2. Sulfates

Cet élément est fortement présent dans les eaux de la nappe de notre zone d'étude (Fig. 37). Les plus fortes valeurs sont enregistrées pendant la 4^{ième} compagne avec une moyenne de 1242,2 mg/l et des teneurs qui dépassent 2500 mg/l dans les eaux des puits.10, 16, 28 et 30. Durant la 3^{ième} compagne nous avons noté une teneur moyenne de 1043 mg/l.

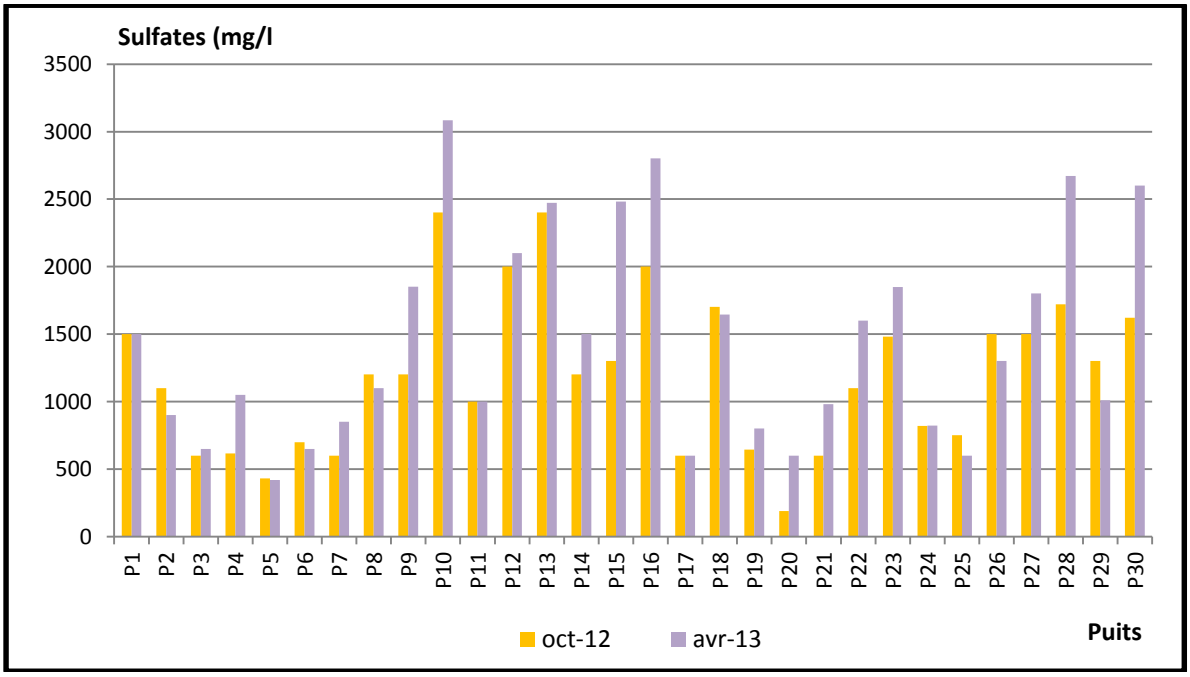

Figure 37 : Variation des concentrations en sulfates des eaux de la nappe alluviale de Guerrara (2012/2013).

En effet, presque la totalité des eaux dépassent la norme de potabilité qui est fixé à 250 mg/l. Ceci est en relation avec la forte minéralisation des eaux qui est liée aux fortes évaporations, au pompage et à la faible recharge de la nappe.

B3. Chlorures

L'ion chlorure possède des caractéristiques différentes à celles des autres éléments. Il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques et généralement reste très mobile. Il constitue un bon indicateur de la pollution.

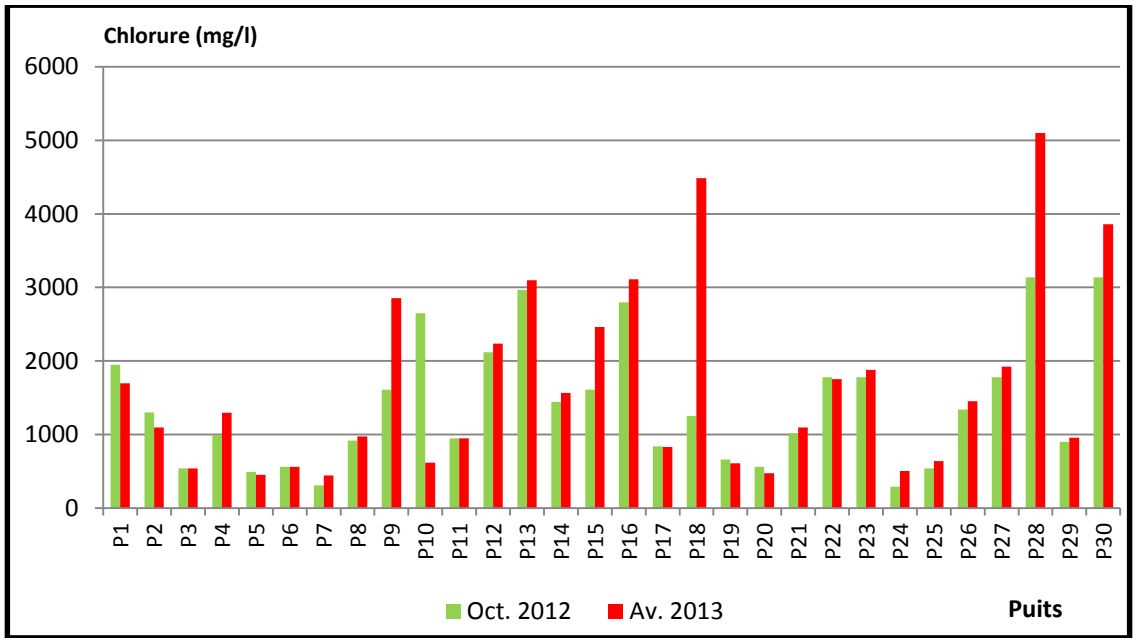

Figure 38 : Variation des concentrations en Chlorures des eaux de la nappe alluviale de Guerrara (2012/2013).

Les teneurs enregistrées pendant toute la période d'observation montrent des valeurs importantes qui dépassent la norme de potabilité de l'OMS fixée à 259 mg/l à l'exception du puits P6 à l'Est où les teneurs en chlore étaient de l'ordre de 219.8 mg/l durant la 3^{ième} compagne et 244.6 mg/l pour la 4^{ième} .

B4. Nitrates

Les nitrates constituent la forme azotée la plus dominante dans les cours d'eau et dans les nappes d'eau souterraines. Ils proviennent généralement de la décomposition de la matière organique par oxydation bactérienne des nitrites et constituent ainsi l'ultime produit de la nitrification. En milieu naturel sa concentration dépasse rarement 0,45 mg/l (CHAPMAN et al, 1996 in DERWICHE et al, 2010).

Des valeurs supérieures indiquent des rejets d'eaux usées dans les milieux aquatiques superficiels et souterrains et surtout une utilisation excessive de fertilisants utilisés en agriculture.

Nous signalons que cet élément a une répartition très remarquable dans notre zone d'étude avec une moyenne de 5 mg/l.

B4.1. Relation nitrate-profondeur

L'examen de la teneur en nitrates dans les eaux de la nappe superficielle de Guerrara a montré une répartition spatiale variable de cet élément à travers la zone d'étude (Fig. 39).

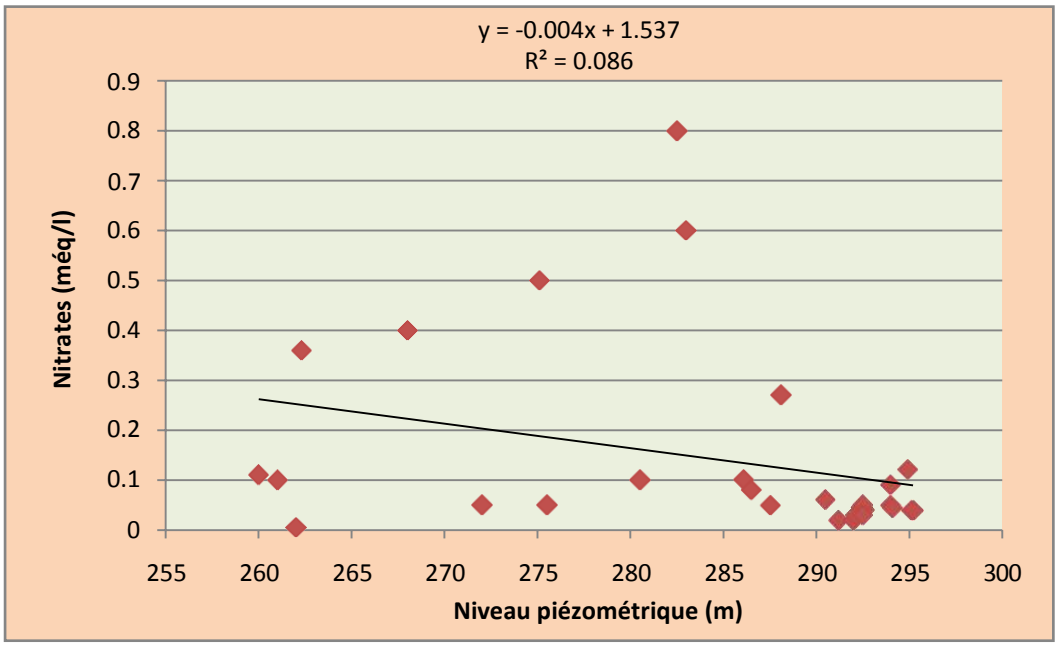

Fig. 39 : Evolution des nitrates avec la profondeur

La teneur en nitrates dans l'eau évolue d'une manière inverse avec la profondeur du niveau statique des puits marquée par une contamination superficielle. C'est le cas des puits se situant au Nord de la palmeraie qui sont proches de la zone urbaine.

Cet élément commence à prendre l'ampleur dans la zone d'étude en comparant nos résultats qui indiquent une moyenne de 5 mg/l avec celle mentionnées par ZEHRI (2010) qui a obtenu un maximum en nitrate de 3 mg/l.

IV.1.2.3. Rapports caractéristiques

Nous avons calculé des rapports caractéristiques r Ca^{2+}/ rMg^{2+}, r SO_4^{2-}/ r Cl^- et r(Na^++K^+)/rCl^- pour les quatre compagnes de l'étude (annexe 5 et 6). Nous allons présenter et discuter par la suite uniquement les résultats de la deuxième année d'investigation (3ième et 4ième compagne).

IV.1.2.3.1. Rapport r Ca^{2+}/ rMg^{2+}

Durant les quatre compagnes d'investigation la plus part des puits ont été marqués par des eaux ayant un rapport r Ca^{2+}/r Mg^{2+} > 1. C'est le cas de 76 et 63% des puits pour la 3ième et la 4ième compagne respectivement. Ceci montre la prédominance du Ca^{2+} dans ces eaux, suite à la dissolution des formations gypseuses et par attaque des roches carbonatées par le CO_2 dans l'eau.

IV.1.2.3.2. Rapport r SO_4^{2-}/ r Cl^-

Le rapport caractéristique entre les sulfates et le chlore (annexe 6) montre que peu de puits (16 à 10%) pendant la 3ième et 4ième compagne ayant des eaux avec un rapport **$rSO_4^{2-}/rCl^- > 1$**. Cela indique la prédominance des Sulfates dans les eaux de ces puits. Cette dominance est liée au lessivage des terrains gypsifères et marno-argileux ou peut être à l'utilisation des engrais chimiques. En effet, la plupart des eaux ont des rapports **$rSO_4^{2-}/r\ Cl^- < 1$** expriment la prédominance du Cl^- qui est lié au lessivage des terrains salifères.

IV.1.2.3.3. Rapport $r(Na^+ + K^+)/rCl^-$

L'étude de ce rapport permet de connaitre la dominance du sodium ou du chlore dans l'eau ainsi que leurs origines. Les résultats montrent que 30 et 23% des puits durant la 3ième et 4ième compagne respectivement ont des eaux avec un rapport **$r(Na^+ + K^+)/rCl^- > 1$.** Ceci indique la prédominance du Sodium et que son origine est les formations salifères (NaCl) et l'utilisation des engrais chimiques. Les autres eaux ont un rapport **$r(Na^+ + K^+)/rCl^- < 1$** traduisant la prédominance des Chlorures qui sont liés aux terrains salifères, aux argiles et aux rejets domestiques et industriels.

IV.1.2.4. Indice d'échange de base

L'indice d'échange de base, ou encore indice de déséquilibre chloro-alcalin défini par SCHOELLER (1934) s'exprime par la formule suivante :

$I.E.B = r\ Cl^- - (r\ Na^{2+} + K^+) / r\ Cl^-$ avec:

I.E.B = 0, pas d'échange. C'est le cas des puits 14 et 25 durant la 4ième compagne.

I.E.B < 0, Ca^{2+} et Mg^{2+} sont échangés par Na^+ et K^+. C'est le cas de des eaux des puits 1,7, 9, 14, 15, 18, 24 et 25 dans la 3ième compagne et les puits 2,7,10,20 et 24 pendant la 4ième compagne.

I.E.B > 0, Na^+ et K^+ sont échangés par Ca^{2+} et Mg^{2+}. C'est le cas des eaux de 60 à 63%% des puits pendant les deux compagnes respectivement Les résultats des calculs de l'indice d'échange de base sont donnés en annexe 7.

IV.1.2.5. Détermination des principaux faciès

Les faciès hydro chimiques sont fréquemment utilisés en hydrogéologie pour décrire grossièrement la composition des eaux naturelles. On les détermine par le calcul des quantités en réaction (conversion des concentrations en méq/l) et en tenant compte de la classification des ions par formule ionique. (GOUAIDIA, 2008).

Pendant toute la période d'observation nous avons remarqué que la répartition des différents faciès dépendait de la lithologie et de l'hydrodynamisme de la nappe aquifère et qui sont représentés ci-dessous dans le tableau VII.

Tableau VII : Faciès chimiques des eaux de la nappe alluviale de Guerrara

Faciès chimique	Octobre 2011	Avril 2012
Nombre d'échantillon	30	18
Chloruré Calcique (%)	20	11.1
Chloruré sodique (%)	30	16.6
Sulfaté calcique (%)	16.6	5.5
Sulfaté sodique (%)	33.3	55.5

La présence des faciès chimiques montre que les eaux de la palmeraie de Guerrara se regroupent en quatre familles :

- La famille des eaux sulfatées sodiques dominante avec 33%. Elle se localise sur l'axe Sud/Nord-est de la nappe. Elles sont très chargées en sels et comportent les valeurs extrêmes de la conductivité. Nous remarquons une stabilité de la répartition de ce faciès pour toute la période d'observation.
- La famille des eaux sulfatées calciques est moyennement fréquente (16,6%) et représentée par les puits 15, 16, 30. Ces eaux sont moins chargées que les premières.
- La famille des eaux chlorurées sodiques dominante avec 30%. Elle est présente dans les puits 11, 12, 14, 17, 18, 27, 28 et surtout au centre de la palmeraie.
- La famille des eaux chlorurées calciques dominante avec 20 %. Elle est bien présentée à l'Est de la palmeraie.

IV.1.2.5.1. Représentation graphique des faciès hydro chimiques

Dans le but de bien identifier les faciès hydro chimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil inévitable. Pour atteindre cet objectif nous avons

utilisé le diagramme de Piper et celui de Schoeller-Berkaloff. La réalisation de ces diagrammes a été faite en utilisant le logiciel Diagrammes.

Diagramme de PIPER

Le principe de cette méthode consiste à reporter les quantités en réaction exprimées en pourcentage de chaque anion et cation sur deux sous triangles ; un pour les cations et l'autre pour les anions. Ces points sont projetés sur un losange qui met en évidence les faciès chimiques.

Le diagramme de Piper permet de voir l'évolution d'une eau passant d'un faciès à un autre. Cela se fait grâce à des analyses espacées dans le temps ou des analyses d'échantillons pris à des endroits différents.

-La première compagne (Octobre 2011)

Pour la première compagne le diagramme (Fig.40) représente des nuages de points sans une vraie dominance anionique ou cationique.

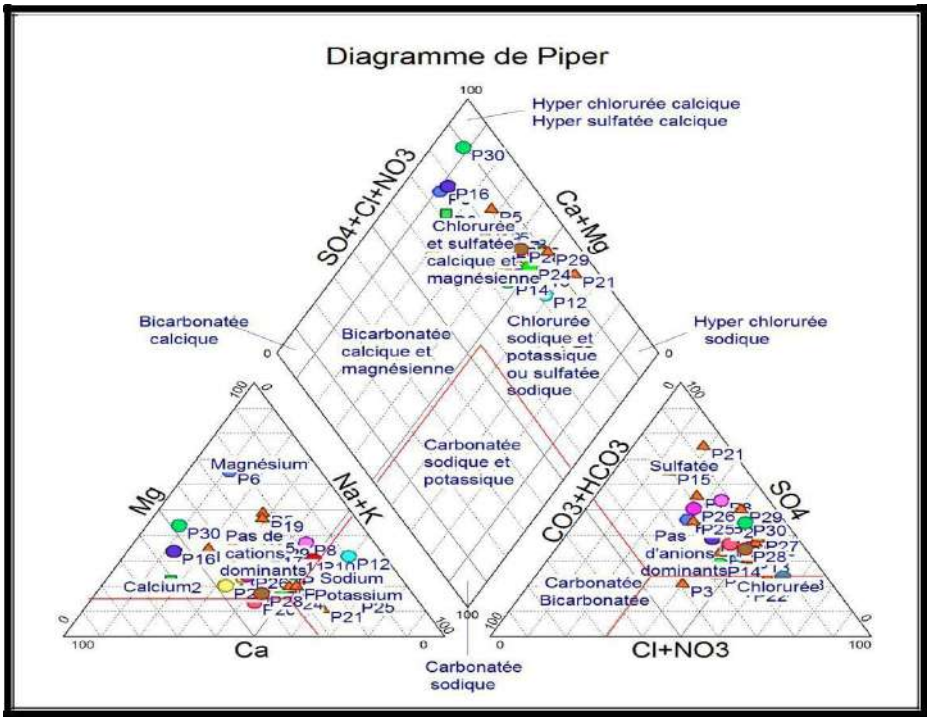

Figure 40 : Diagramme de Piper, campagne d'Octobre 2011

Nous remarquons une certaine concentration du coté des ions SO_4^{-2} pour les anions. Du coté cationique il ya la présence d'un faciès sulfaté sodique et un nombre de puits ayant acquis un faciès sulfaté calcique.

Le faciès chimique des eaux de la deuxième compagne est donné par le diagramme de Piper (Fig.41).

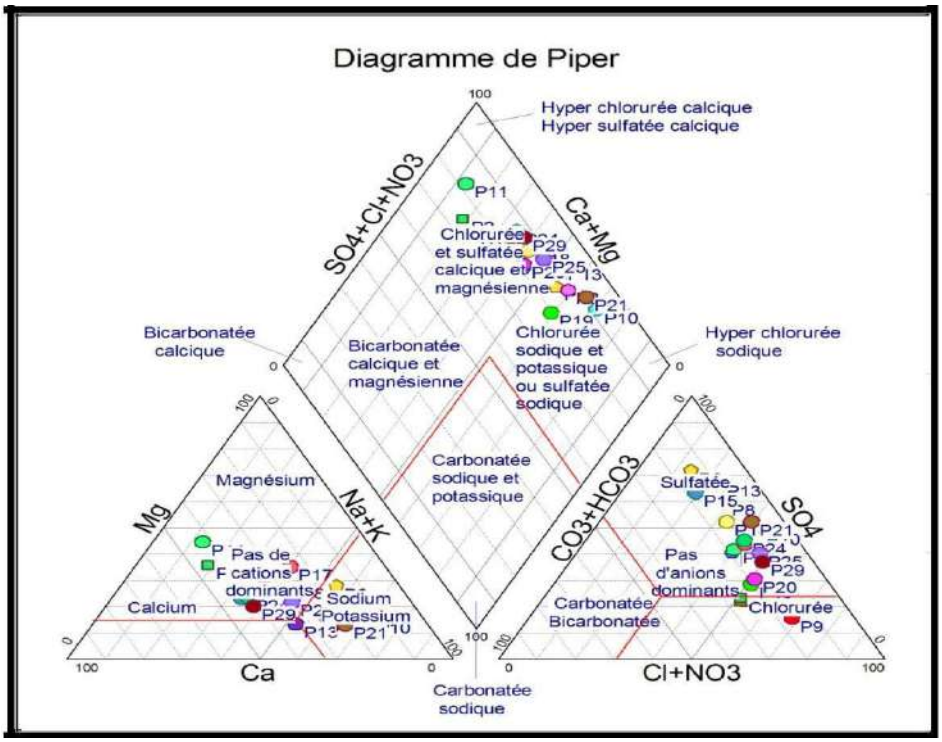

Figure 41 : Diagramme de Piper, campagne d'Avril 2012

Le diagramme de Piper pour les eaux de la deuxième compagne ressemble à celui de la première et les deux expriment la forte minéralisation et la prédominance des ions calcium, sodium et sulfate dans la plupart des eaux étudiées.

a. Diagramme de Schoeller - Berkaloff

C'est une représentation graphique semi logarithmique sur laquelle les différents ions sont représentés sur l'axe des abscisses et la teneur réelle en mg/l sur l'axe des ordonnées. Les points obtenus sont reliés par des droites. L'allure du graphique permet de visualiser le faciès des eaux analysées. Cette représentation permet aussi la détermination du faciès d'une eau.

En effet, le diagramme de Schöeller-Berkaloff indique pour chaque eau analysée la teneur moyenne (mg/l) en éléments majeurs de ces eaux et de comparer des éléments en traces et d'établir les faibles variations entre les éléments chimiques.

-La première compagne (Octobre 2011)

Le diagramme tracé pour cette période (Fig. 42) confirme la dominance du faciès sulfaté sodique permettant de dire que la minéralisation des eaux est presque liée aux ions SO_4^{2-}, Cl^-, Ca^{2+} et Na^+.

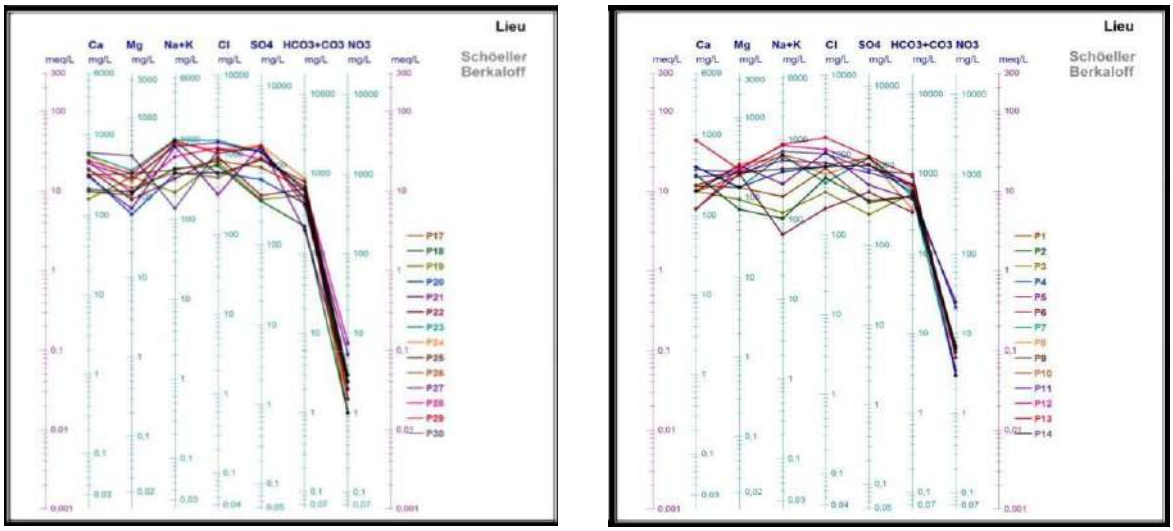

Figure 42 : Diagramme de Schoëller-Berkaloff, (Octobre 2011)

Le faciès sulfatés est très remarquable et la minéralisation des eaux est accentuée au niveau des puits qui se localisent au centre de la palmeraie. Nous remarquons un certain parallélisme entre les lignes représentant la majorité des éléments majeurs ce qui s'explique par une même évolution du chimisme.

-La deuxième compagne (Avril 2012)

Les fortes concentrations de SO_4^{-2}, Cl^- et Na^+ ont donné un faciès dominant qui est le sulfaté sodique suivi des faciès sulfaté calcique et chloruré sodique. Nous signalons que la teneur en bicarbonates est faible par rapport à celle des autres anions ce qui explique la très faible répartition du faciès bicarbonaté. Ces résultats ne représentent pas un grand changement par rapport à ceux de la première compagne.

IV.1.2.6. Origine du chimisme des eaux de la nappe

Dans cette étude nous allons représenter schématiquement les éléments chimiques dominants caractérisant les faciès chimiques des eaux de la 3^{ième} et la 4^{ième} compagne. Afin de montrer la répartition spatiale des éléments chimiques nous avons établi des schémas représentatifs des rapports caractéristiques.

IV.1.2.6.1. Rapports relatifs

L'étude de variation de ces rapports permet de :

-Voir l'évolution chimique des eaux pendant leur trajet souterrain ainsi que le contact avec le milieu géologique.

- Donner des indications sur la zone d'alimentation et sur la circulation des eaux souterraines.

a. Les éléments Ca^{2+} – HCO_3^- – SO_4^{2-}

Le calcium tire son origine essentiellement des carbonates et du gypse. La détermination de l'origine de chaque concentration en Ca^{2+} est nécessaire pour connaître les mécanismes du chimisme de la nappe (Fig. 43).

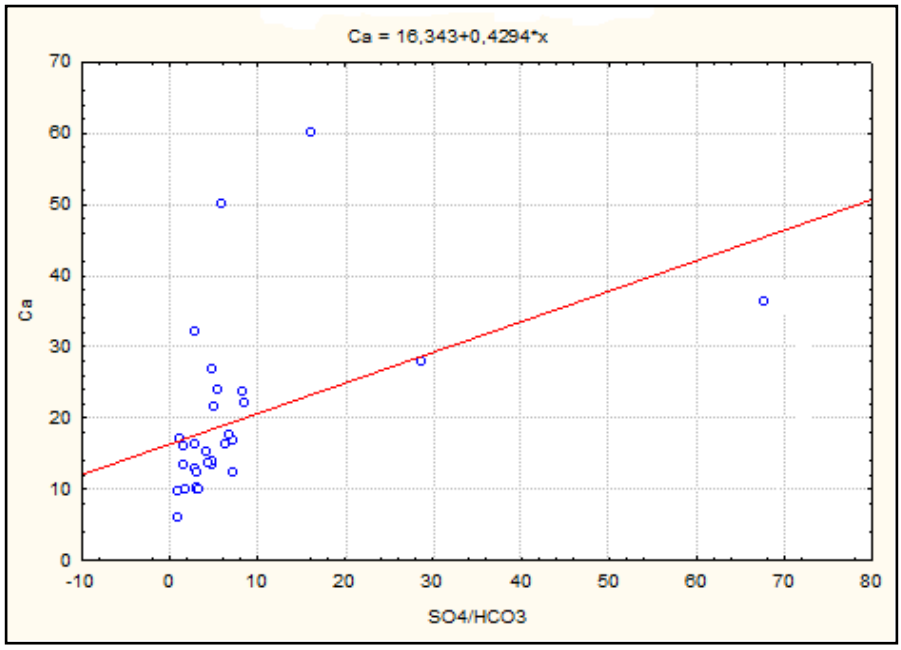

Figure 43 : Schéma représentatif de la détermination de l'origine du Calcium

L'analyse de la représentation du calcium en fonction des bicarbonates et des sulfates montre que 21 échantillons d'eau sur 30 ont une origine carbonatée soit 70 % de l'ensemble des échantillons. Ceci est en conformité avec les formations géologiques calcaires et gypseuses de la zone d'étude.

b. Ions Na^+ et Cl^-

La représentation graphique de l'évolution du Na^+ en fonction de Cl^- (Fig. 44) a montré un excès des teneurs en Na^+ qui s'explique par l'existence d'une autre origine pour les ions sodiques (autre que l'halite)

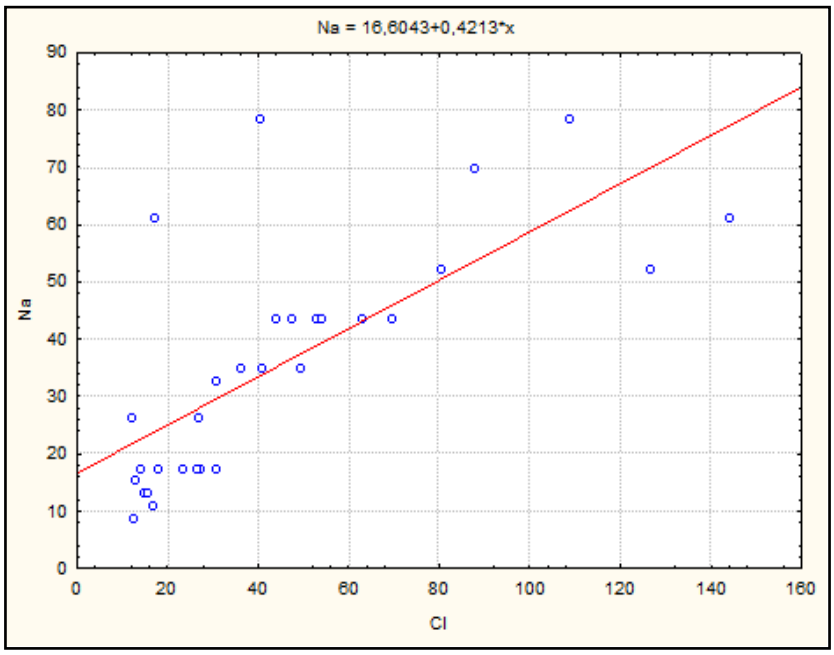

Figure 44 : Schéma représentatif de la détermination de l'origine du sodium

L'augmentation des teneurs en Na^+ qui a accompagné les faibles teneurs en Cl^- est due au phénomène d'échange de base car les argiles des formations géologiques peuvent libérer des ions Na^+ après avoir fixé le Ca^{2+}. Ce diagramme confirme un excès du Na^+ par rapport au Ca^{2+}.

- **c. Relation SO_4^{2-} / Ca^{2+}**

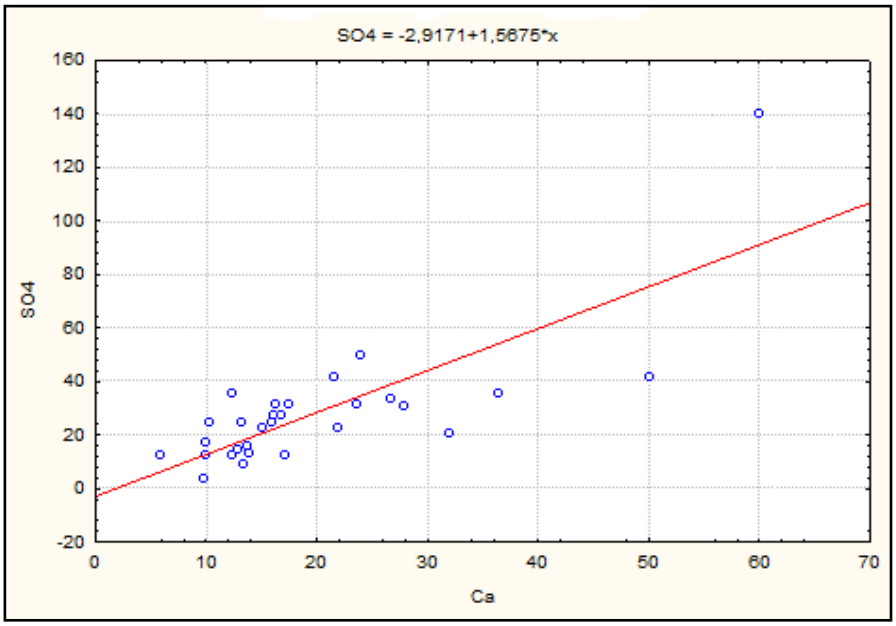

Figure 45 : Relation entre les concentrations en sulfate et en calcium

L'excès en Ca^{2+} par apport à SO_4^{2-} indique l'origine évaporitique de Ca^{2+} par le gypse et la dissolution des formations carbonatées.

d. Relation SO_4^{2-}/Mg^{2+}

.

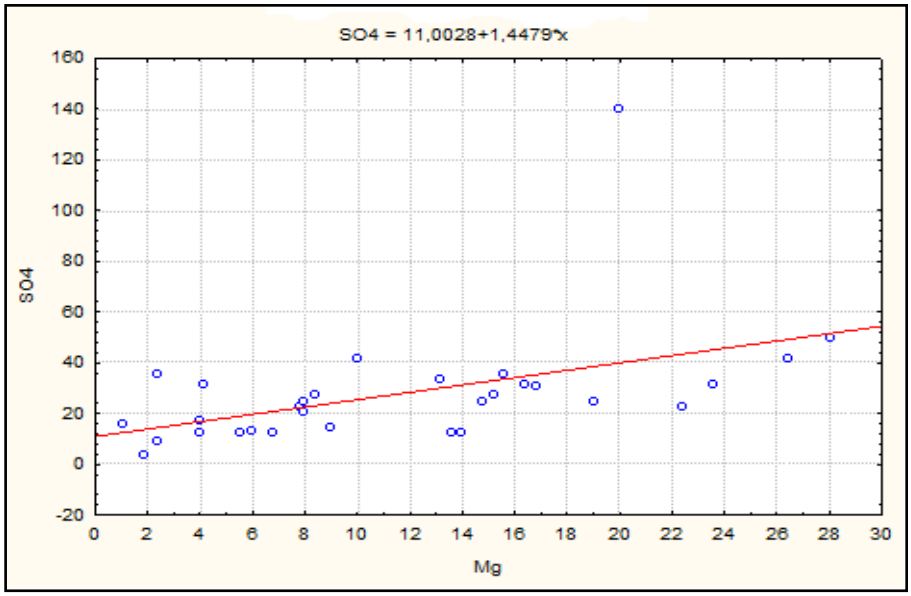

Figure 46 : Relation entre le sulfate et le magnésium

La représentation graphique de la relation entre les ions SO_4^{2-} et Mg^{2+} montre que la majorité des points se trouvent sous forme linéaire ce qui confirme la même origine qui est la dissolution du gypse ($CaSO_4$).

IV.1.2.7. Application d'analyses Statistiques des résultats à la classification chimique des eaux

Il s'agit d'un outil puissant d'aide à l'interprétation des données puisqu'il permet de prendre en considération simultanément tous les échantillons et toutes les variables, et leur interrelation (BAKALOWIEZ, 1994 in DJEMMEL, 2006).

L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique d'analyse statistique portant sur au moins deux variables. Elle permet une représentation graphique des liens entre variables *n* et des positions des individus par rapport aux vecteurs de ces variables. Les graphiques sont construits à partir de la matrice des corrélations et l'ACP représente graphiquement les liens entre les différentes variables et les facteurs choisis.

A. Principe

Chaque échantillon d'eau d'une campagne de prélèvement constitue une unité statistique. Les différents paramètres soumis à l'analyse constituent les variables qui caractérisent ces unités statistiques.

Notre étude porte sur les éléments majeurs qui influent sur l'évolution de la minéralisation en incluant la conductivité électrique dont l'évolution dépend de cette dernière.

B. Matrice de corrélation

L'examen du tableau ci-dessous relatif à la matrice de corrélation permet de voir que pratiquement toutes les variables sont corrélées entre elles. Il existe une forte corrélation entre la conductivité électrique d'une part et les sulfates, le sodium, le calcium et les bicarbonates. Le calcul de la matrice de corrélation inter-variable donne les résultats représentés dans le tableau VIII.

Tableau VIII: Matrice de corrélation entre les paramètres chimiques des eaux

Paramèt.	Ca^{2+}	Na^{+}	Mg^{2+}	K^{+}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	HCO_3^{-}	NO_3^{-}	R.S	NP	CE	pH
Ca^{2+}	1											
Na^{+}	0,23	1										
Mg^{2+}	0,26	0,01	1									
K^{+}	0,4	0,09	0,19	1								
Cl^{-}	**0,58**	**0,44**	0,33	0,26	1							
SO_4^{2-}	**0,53**	**0,62**	0,38	0,33	0,24	1						
HCO_3^{-}	**0,42**	0,18	0,27	0,38	0,37	0,18	1					
NO_3^{-}	-0,01	-0,11	0,2	0,14	0,07	0,04	0,09	1				
R.S	**0,65**	0,14	0,31	**0,69**	**0,56**	0,35	**0,56**	0,08	1			
NP	0,34	**0,47**	0,13	0,26	0,39	**0,52**	0,15	-0,38	0,34	1		
EC	0,33	0,08	0,24	**0,55**	0,36	0,31	**0,44**	0,11	**0,74**	0,32	1	
Ph	0,02	0,23	0,37	-0,14	-0,08	0,35	-0,06	-0,31	-0,07	0,28	-0,16	1

R.S :Résidu sec

**Les valeurs qui sont en gras sont les plus significatifs.*

Les anions ne sont pas en bonnes corrélations entre eux sauf le bicarbonate et le sulfate encore que ce soit faiblement. C'est-à-dire qu'ils ne sont pas tout à fait indépendants l'un de l'autre. Les cations sont corrélés positivement deux par deux d'un côté les alcalino terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) très faiblement et de l'autre les alcalins, (Na^{+} et K^{+}) de manière plus lâche. En outre, ils sont tous corrélés au bicarbonate et aux sulfates mais les alcalins moins que les alcalino-terreux.

Enfin, le chlorure et le sodium sont moyennement corrélés positivement. L'interprétation de ces corrélations est basée sur l'origine de la minéralisation et l'existence de terrains salifères et gypsifères expliquent ces associations.

C. Etude des cercles de corrélation

Le cercle de corrélation est un graphique représentant les corrélations des variables avec les composantes principales. La représentation est liée directement aux relations de proximité ou d'éloignement des variables du cercle. Plus une variable est proche du cercle plus sa qualité de représentation est bonne.

C.1. Corrélation entre variables et axes principaux

Le tableau IX exprime les résultats de la corrélation entre les variables et les axes principaux et qui sont classés de la manière suivante :

- Six variables sont corrélées avec le premier axe (F1) : Cl^- , SO_4^{2-}, Ca^{2+} , K^+, HCO^{3-}, résidus secs et CE ;

- Trois variables sont corrélées avec le deuxième axe (F2) : HCO^{3-}, Mg^{2+} et Cl^- ;
- Deux variables sont corrélées avec le troisième axe (F3) : Mg^{2+} et K^+ ;
- Une seule variable est corrélée avec le quatrième axe (F4) : SO^{4-}.

Tableau IX : Coefficient de corrélation entre les variables et les axes principaux

Paramètres	Fac. 1	Fac. 2	Fac. 3	Fac. 4
Ca^{2+}	**0,75**	0,036	-0,022	-0,25
Na^+	0,46	**0,65**	-0,27	-0,01
Mg^{2+}	0,45	-0,21	**-0,52**	0,0062
K^+	**0,67**	-0,3	0,25	0,38
Cl^-	**0,7**	0,078	-0,13	**-0,53**
SO_4^{2-}	**0,66**	0,38	-0,37	0,41
HCO_3^-	**0,61**	-0,28	0,095	-0,31
NO_3^-	0,061	**-0,62**	**-0,59**	0,13
Résidus sec mg/l	**0,86**	-0,29	0,24	-0,022
N. piézométrique m	**0,58**	**0,59**	0,2	0,13
CE dS/m	**0,701**	-0,31	0,28	0,23

*Les valeurs en gras sont les plus significatives

C.2. Le plan factoriel (F1-F2)

La représentation graphique du plan F1-F2 (Fig. 47) indique que l'axe F1 est corrélé positivement avec Ca^{2+}, K^{+}, SO_4^{2-}, HCO_3^{2-}, Cl^{-}, résidus sec et la conductivité. Aucun élément ne met en opposition, tandis que l'axe F2 met en opposition le Mg^{2+}, HCO_3^{-}, conductivité, K^{+}, résidus sec et peu avec NO_3^{-}. L'axe F2 caractérise la minéralisation.

C.3. Analyse en composantes principales

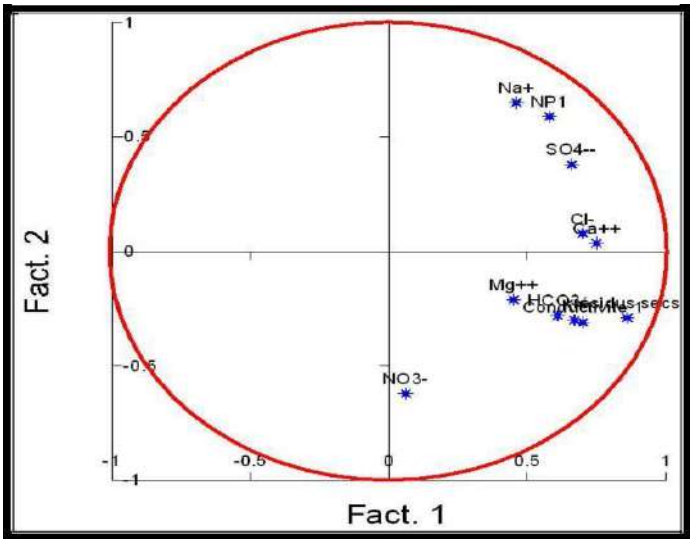

Figure 47 : Représentation graphique des variables sur le plan factoriel (F1-F2*)*

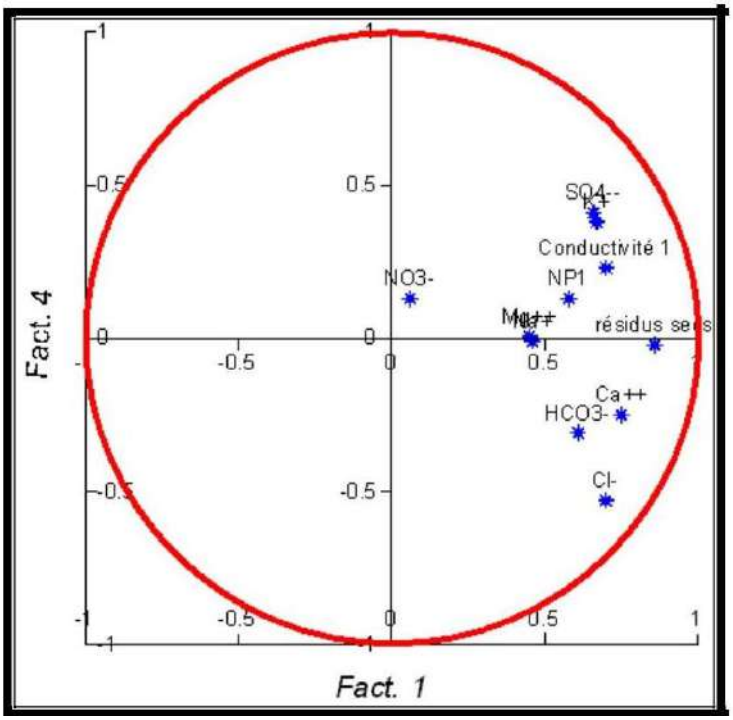

Figure 48 : Représentation graphique des variables sur le plan factoriel (F1-F4*)*

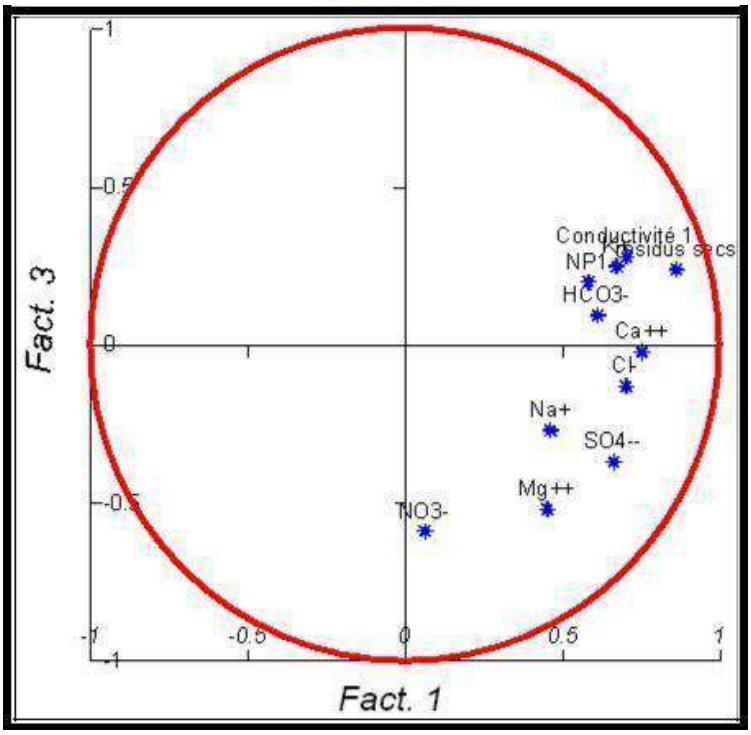

Figure 49 : Représentation graphique des variables sur le plan factoriel (F1-F3*)*

L'analyse des individus sur le plan factoriel (F1-F2) montre que le nuage des points reflète une certaine dispersion des échantillons. Ainsi la proximité entre eux indique une identité du chimisme. Les individus placés autour de l'origine indiquent des caractéristiques moyennes.

L'analyse en composantes principales des eaux de la nappe alluviale de la région de Guerrara nous a permis de confirmer les ensembles de faciès chimiques cités précédemment :

- Les faciès chlorurés calciques et sodiques qui ont pour origine le lessivage des formations encaissantes évaporitiques.

- Le faciès sulfaté sodique.

L'interprétation de ces corrélations peut se faire en se basant sur les origines possibles de la minéralisation des eaux. Il est maintenant reconnu que la plus grande partie des eaux sont d'origine météorique et que dans la plupart des cas l'ensemble des éléments de la minéralisation provient du lessivage des roches le long des canaux de circulation de l'eau. Dans un environnement sédimentaire, il est rare de ne pas pouvoir relier l'existence d'eaux chlorurées sodiques à la présence des terrains

salifères dans le sous-sol, les eaux sulfatées calciques à des terrains gypseux et les eaux bicarbonatées et carbonatées à des terrains calcaires.

IV.1.2.8. Qualité des eaux destinées aux activités agricoles

IV.1.2.8.1. Aptitude des eaux à l'irrigation

Pour évaluer l'aptitude des eaux de la nappe alluviale à l'irrigation, un coefficient appelé S.A.R (Sodium Absorption Ratio) sera calculé pour chaque échantillon d'eau. Le sodium est l'élément chimique le plus nocif pour les plantes et le sol en cas de concentrations élevées. Il est donc intéressant d'étudier son évolution afin de déterminer la qualité de l'eau destinée à l'irrigation.

La classification de RICHARD (1954) fait intervenir le taux d'absorbation du sodium (S.A.R) qui peut être estimé par la formule suivante :

$$S.A.R = [Na^{+}] / [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]^{1/2}$$

Les éléments Ca^{2+}, Na^{+} et Mg^{2+} sont exprimés en méq/l : Si $S.A.R \leq 10$ cette eau est convenable à l'irrigation. Les résultats des calculs sont représentés dans l'annexe 8 et les figures 52 et 53.

L'eau avec un SAR se situant entre 0 et 6 peut généralement être utilisée sur tout type de sol avec une faible accumulation de sodium. Quand le SAR se situe entre 6 et 9 les risques des problèmes liés à la perméabilité du sol augmentent. Dans ce cas le sol devrait être échantillonné tous les 1 ou 2 ans pour déterminer si l'eau augmente la teneur en sodium du sol (COUTURE, 2004).

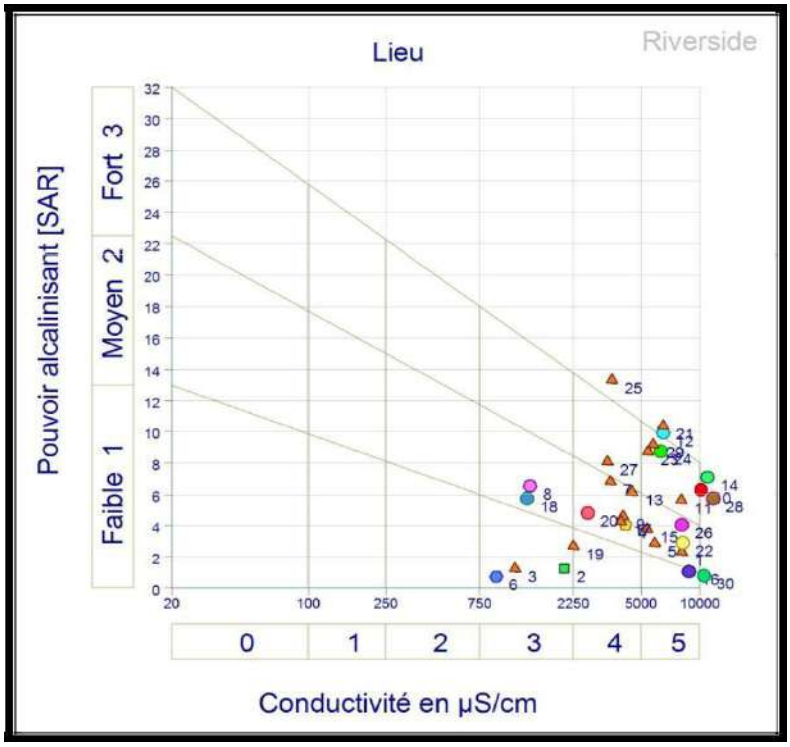

Figure 50: Diagramme de Richards des eaux de la nappe (octobre 2011)

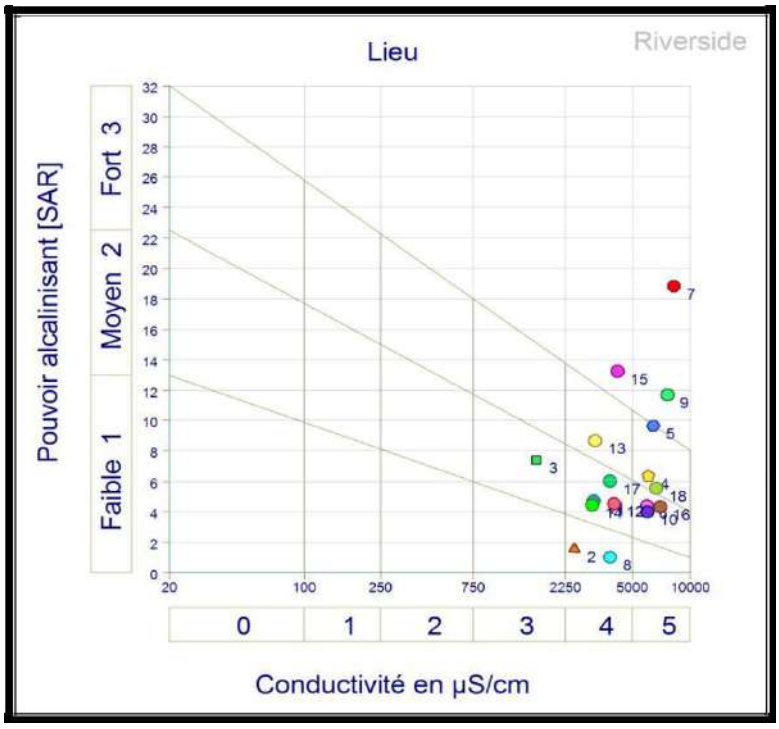

Figure 51: Diagramme de Richards des eaux de la nappe (avril 2012)

Les eaux de la nappe alluviale de Guerrara présentent en général des qualités différentes pour l'irrigation au cours de toute la période d'observation (tableau X). La dégradation de la qualité observée traduit l'effet de la lithologie (présence d'argiles et

des formations carbonatées) d'une part et l'effet de l'évaporation d'autre part (augmentation des concentrations).

Tableau X: Evolution des classes d'irrigation selon la méthode de Richards.

SAR/CE	Octobre 2011 (30 puits)	Avril 2012 (18 puits)	Indication
C3S1	10 %	0 %	-eau convenant aux plantes qui présentent une bonne tolérance aux sels. - sol bien aménagé (bon drainage). - contrôle périodique de l'évolution de la salinité.
C3S2	6.66 %	3.33 %	- eau convenant aux plantes qui présentent une bonne tolérance au sel. - sol grossier ou organique à bonne perméabilité, bon drainage. - contrôle périodique de l'évolution de la salinité
C4S1	3.33 %	11 %	- eau ne convient pas à l'irrigation dans des conditions normales. - peut être utilisée si les espèces ont une bonne tolérance à la salinité et le sol est particulièrement bien drainé.
C4S2	20 %	22 %	-eau ne convient pas l'irrigation dans des conditions normales. - peut être utilisée si les espèces ont une très bonne tolérance à la salinité et le sol est particulièrement bien drainé.
C 4S3	3.33 %	5 %	-eau ne convient pas à l'irrigation.

IV.1.2.9. Conclusion partielle

L'étude des effets de la nappe alluviale de l'Oued Zegrir sur la nappe alluviale de Guerrara nous a permis de déduire les conclusions suivantes :

- Effet sur le pH de l'eau, avec des valeurs de 6.96 à 8,4 pour la plupart des échantillons analysés. Ce qui reflète une faible alcalinité des eaux;
- Effet sur la dureté des eaux ; eaux classées dans les catégories dures et très dures, leur dureté varie de 34 à et 472 °F
- Effet sur la salinité des eaux ; eaux souvent fortement chargées en sel dissous et de qualité mauvaise à médiocre (0.060 à 1.6 g/l). Cependant, elles pourront être utilisées sur certains sols pour l'irrigation des plantes tolérantes.
- Effet sur le faciès chimique des eaux ; prédominance des faciès chlorurés et des faciès Sulfatés. Le faciès le plus représenté est le faciès Sulfaté sodique.

IV.1.3. Conclusion

Cette étude tend à présenter les principaux résultats d'analyses de la situation actuelle des eaux de la nappe alluviale de Guerrara de point de vue hydro chimique et qualité d'une part et hydrodynamique d'autre part.

A cause de sa situation, la région de Guerrara est soumise à un climat Saharien caractérisé par des températures élevées en été, des précipitations moyennes annuelles faibles, des vents violents et fortes évaporations.

L'aquifère quaternaire de la région de Guerrara est constitué des alluvions sableuses et argileuses en certains endroits, d'une épaisseur moyenne de 20 à 35m et contenant une nappe d'eau libre (alluviale). Les campagnes d'observation sur terrain réalisées sur deux années et en quatre compagnes nous ont permis de prélever de nombreux échantillons le long de l'ancienne palmeraie de Guerrara.

Ces campagnes d'échantillonnage nous ont permet d'établir une identification graphique des principales familles de la qualité chimique des eaux suite à des cartes piézométriques. Le suivi de la qualité des eaux a permis de déceler de nombreuses différences au niveau des valeurs de pH, de température ainsi qu'au niveau de la conductivité. Ce dernier paramètre a une représentation importante dans les eaux échantillonnées et qui peuvent atteindre 11.63 dS/m et elle est fortement corrélée à la minéralisation totale de l'eau.

La piézométrie indique que la nappe est drainée occasionnellement par l'Oued Zegrir vis à vis aux déclanchement des crues de cet Oued. La variation piézométrique entre les deux périodes d'échantillonnages a une moyenne de l'ordre 0.8 m et elle est généralement d'autant plus grande qu'on se situe loin des endroits où s'écoule l'Oued.

Les cartes piézométriques ont montré que la piézométrie représente un écoulement convergent vers le Nord-est en aval de la région. Egalement, les zones de drainage souterrain qui sont d'ailleurs les zones à forts gradients hydrauliques sont confondues avec la direction générale des cours de l'Oued Zegrir qui caractérise cette région.

Par rapport aux années récentes, le niveau de la nappe a baissé avec des fluctuations dépassent les 1 mètres. Cette situation est due à une exploitation des eaux de l'aquifère alluvial (pompage) et à la fréquence des crues en relation avec la sécheresse qui a marquée les dernières décennies.

Pour ce qui est du chimisme de la nappe, nous avons constaté que la minéralisation naturelle des eaux est déterminée par la lithologie de formations encaissantes et les conditions hydrodynamiques de la nappe suite aux facteurs climatiques. Les faciès chimiques prédominants restent surtout les faciès sulfaté sodique, le sulfaté calcique et le Chloruré sodique.

Les eaux de cette nappe sont dures à très dures et peuvent être utilisées pour l'irrigation avec un danger moyen d'alcalinisation pour les sols. Nous notons la présence de quelques indicateurs polluants tirant leurs origines des activités agricoles et des rejets urbains, notamment les teneurs élevées en nitrates.

IV.2. Etude des sols

IV.2.1. Introduction

L'étude des sols de la palmeraie de Guerrara consiste en une étude spatiale du terrain des quatre sites choisis pour cet but. Il s'agit d'une détermination et observation des horizons, ainsi qu'une description des profils et de leurs environnements.

IV.2.2. Description de l'environnement des profils

Toute étude approfondie de sol commence par une étude spatiale du terrain dirigée par un pédologue ou un agro-pédologue qui va localiser les sites des fosses pédologiques et la détermination des horizons (MATHIEU, 1998).

Pour présenter l'environnement de chaque profil d'observation nous avons retenu les critères suivants: La localisation (coordonnées géographique), la date de description, l'état de la surface, la topographie, les conditions climatiques, le temps et le couvert végétal. La figure 54 montre la localisation des quatre sites (profils) étudiés.

Figure 54 : Positionnement des profils dans la palmeraie

IV.2.3. Caractérisation morphologique et analytique des profils

La description morphologique des sols de chaque profil a concerné l'épaisseur (cm), l'humidité, la couleur (Munsell Soil Color Charts), la texture, la structure, la réaction à l'HCl, les éléments grossiers (dimension, nature, abondance), les racines (présence, taille, nature), et les tâches. L'étude des quatre profils de sol a révélé que le

sol de la palmeraie de Guerrara est constitué de deux horizons distincts après description des profils selon la méthode décrite par BAIZE et JABIOL (1995).

IV.2.3.1. Description morphologique des profils de sol

IV.2.3.1.1. Profil A

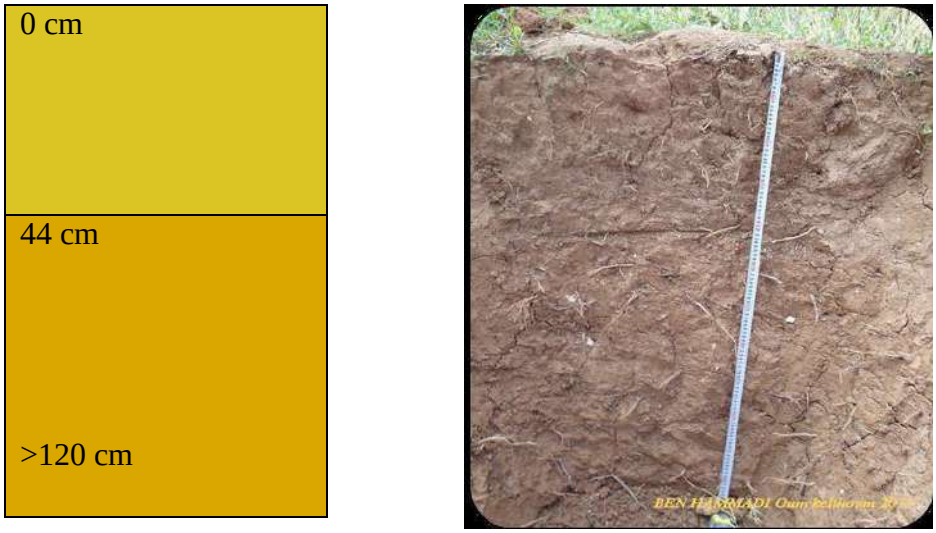

Photo 01 : Profil A

- **Localisation** : 32°47'0.95"N, 4°29'35.28"E
-**Temps** : ensoleillé.
- **Végétation** : *Phoenix dactylifera. En plus de Synodon Dactylon, Melilotus*
- **Topographie** : plane.
- **Date**: 30/03/2013 à 10h30 mn.

- **AP (0-44cm):** Couleur á l′état humide 7,5 YR 4/4 (Brun), texture à tendance limoneuse (ca colle entre les doitd), peu compact, structure massive a éclats anguleux, pas d'éléments grossiers, humide, activité racinaire moyenne de taille fine à moyenne, la transition est nette, et avec forte effervescence à l'HCl.
- **C (44-120):** La couleur á l′état humide est 7,5 YR 4/6 (Brun foncé), texture fine à tendance argileuse, compact, structure grumeleuse, activité racinaire moyenne, présence de quelques taches de couleur blanchâtre et noirâtre (traces de matière organique) et de quelques graviers de taille 2 à 3mm, et un fort effervescence à l'HCl.

IV.2.3.1.2. Profil B

Photo 02: Profil B

- **Localisation** : 32°47'26.49"N, 4°30'19.98"E
- **Temps** : nuageux.
- **Végétation** : *Phoenix dactylifera.*.
  Synodon Dactylon
- **Topographie** : plane.
- **Date**: 10/04/2013 à 10 h30 mn.

Ap (0-30cm): 7.5 YR 5/4(brun) à l'état humide, le contact du sol avec les doits permet de déterminer la texture du sol. Elle est à tendance limoneuse, riche en limon fin, structure massive à éclats anguleux, humide, activité racinaire faible (peu de racines de palmier), la transition est graduelle, présence de quelques taches de couleur blanche, noir (trace de matière organique), et de quelques graviers de taille 2 à 3 mm et moyenne effervescence à l'HCl.

-C1 (30-120cm) : 7.5 YR 4/4 (brun) à l'état humide, texture à tendance limoneuse, plus riche en limon fin que le premier horizon. La structure est massive, la transition est graduelle, forte activité racinaire et présence de quelques taches de couleur noir

(traces de matière organique) dans la partie supérieure de l'horizon, très humide et plastique, et effervescent moyenne à l'HCl.

IV.2.3.1.3. Profil C

Photo 03 : Profil C

-**Localisation** : 32°47'23.25"N 4°30'18.38"E
-**Temps** : nuageux.
-**Végétation** : Sol nu sous palmiers.
-**Topographie** : plane.
-**Date**: 30/03/2013 à 11h30mn.

Ap (0-20cm): 7.5 YR 5/3(brun) a l'état humide, la texture est à tendance limoneuse, structure massive, présence d'éléments grossiers de 2 à 3 mm de diamètre, sol sec, présence de quelques taches noires qui résultent de la décomposition des débris végétaux et de dates sur la surface du sol, l'activité racinaire est faible à moyenne, transition nette, et forte effervescence à l'HCl.

C (20-120cm): 7.5 YR 4/3 (brun) à l'état humide, texture à tendance limoneuse, structure massive, sol sec, présence des nodules de calcaire de 2 mm à 1cm de

diamètre, présence de quelques taches noires de matière organique, forte activité racinaire (racines de palmiers), et forte effervescence à l'HCl

IV.2.3.1.4. Profil D

Photo 04 : Profil D

-**Localisation** : 32°46'57.34"N, 4°29'25.70"E

-**Temps** : nuageux.

-**Végétation** : Sol nu (sous palmiers).

-**Topographie** : plane.

-**Date**: 10/04/2013 à 10h30 mn.

-Ap (0-65cm): 7.5 YR 5/3 (brun) à l'état humide, texture à tendance limoneuse avec présence d'argile, sol sec, structure massive, absence d'éléments grossiers, forte activité racinaire, transition graduelle, présence de quelques taches noires qui résultent de la décomposition des débris végétaux et de dates sur la surface du sol, et avec forte effervescence à l'HCl.

-C1 (65-120cm): 7.5 YR 4/3 (brun) à l'état humide, texture à tendance limoneuse, sol sec, structure massive, pas d'éléments grossiers, transition graduelle, activité racinaire moyenne, et très forte effervescence à l'HCl.

IV.2.4. Description analytique

Les sols de la palmeraie de Guerrara sont des sols alluviaux, caractérisés par une texture limoneuse à limono-argileuse.

Les tableaux XI et XII représentent les caractéristiques et les résultats des analyses physiques et chimiques des sols des profils étudiés.

Tableau XI : Caractéristiques physiques et chimiques des sols étudiés

Profils	Horizons	Profondeur en (cm)	Calcaire total	Gypse en (%)	M.O (%)
A	Ap	0 – 44	8.76	5.52	3.43
	C	44 - > 120	11.18	7.37	2.91
B	Ap	0 – 30	7.98	1.84	3.06
	C	30 - > 120	10.67	1.81	2.30
C	Ap	0 – 20	8.03	1.84	4.30
	C	20 - > 120	10.23	11.05	3.17
D	Ap	0 – 65	8.70	3.68	3.33
	C	65 - > 120	8.22	1.84	4.44

Tableau X1I : Résultats des analyses physiques et chimiques des sols étudiés

Profi	Hz	Prof. (cm)	pH	CE (dS/m)	Anions (méq/l)				Cations (méq/l)			
					Cl^-	SO_4^-	HCO_3^{2-}	CO_3^{--}	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
A	AP	0 –44	7.71	0.61	3	51.36	7	0	1.66	0.10	14.60	11.8
	C	44-120	7.64	0.72	4	51.34	7	0	2.28	0.11	11.20	9
B	AP	0-30	7.36	0.49	2	51.36	6	0	1.45	0.11	4.20	3.6
	C	30-120	7.45	0.52	1	51.36	3	0	1.24	0.12	2.20	2.5
C	AP	0-20	7.63	0.27	4	51.36	5	0	1.66	0.15	12	6.4
	C	20-120	7.6	0.45	13	8.56	6	0	0.62	0.10	7.20	4.8
D	AP	0-65	7.8	0.66	2	47.08	11	0	1.66	0.12	6.80	7.6
	C	65-120	7.74	0.67	4	12.84	4	0	1.66	0.17	4.80	2.4

IV.2.5. Discussion des résultats

Selon les normes d'interprétation du taux de calcaire du sol BAIZE (Annexe 14), les sols étudiés sont modérément calcaire dans touts les horizons, avec des valeurs qui varient entre 7,98 et 11,18.

Comme tous les sols des régions arides, le taux de matière organique est faible et diminue progressivement et graduellement avec la profondeur. C'est le cas des profils A, B et C avec des teneurs en matière organique de 3.43 à 2.91 % dans A, 3.06 à 2.30 % dans B, et 4.30 à 3.17% dans C.
Alors que la teneur en matière organique augmente avec la profondeur dans le profil D (3.33 à 4.44%).

Selon MORAND (2001), la teneur du sol en matière organique est moyenne à élevée (annexe 17). L'origine de cette matière organique est les débris de cultures précédentes et les apports du fumier, ainsi que le carbone transporté avec les alluvions. Selon BARZANJI (1973) en annexe 13, le sol est légèrement gypseux car le taux de gypse ne dépasse pas 10%, sauf pour l'horizon de profondeur du profil C qui est moyennement gypseux avec une teneur en gypse de 11.05 %.

D'après SERVANT ,1971 in YOUCEFI, 2011 (Annexe 15), en classant la salinité en fonction de la CE de l'extrait saturé du sol, le sol dans le profil C est faiblement salé ($0.25 \leq CE \leq 0.5$ dS/m), et moyennement salé dans le reste des profils ($0,5 \leq CE \leq 1$ ds/m). Le profil salin est de type (D).

Selon AUBERT (1978), le pH du sol est très légèrement alcalin dans le profil C (7.1 à 7.5) et légèrement alcalin (7,6 à 7,8) dans les autres profils, et varie avec la profondeur.

Pour le bilan anionique (tableau XII), le sol est chargé en sulfates avec des valeurs respectives de 51,34 à 51,36 méq/l. Pour le HCO_3^-, les teneurs sont de 3 méq/l (dans le deuxième horizon du profil B) à 11 méq/l (dans le premier horizon du profil D). Les teneurs en chlore sont faibles dans l'ensemble des profils (1 à 4 méq/l), sauf pour l'horizon de profondeur du profil C (13 méq/l).

Le faciès cationique du complexe adsorbant du sol est dominé par le calcium avec des teneurs les plus faibles dans B (2.20 à 4.20 méq/l) et les teneurs les plus élevées sont enregistrées dans le profil A (11,20 à 14,60 méq/l), puis par le magnésium (2,4 à 11,8 méq/l), le sodium (0,62 à 2,28 méq/l) et en fin par le potassium (0,10 à 0,17 méq/l).

IV.2.6. Qualité des eaux d'irrigation dans les quatre sites

Tableau XIII: Résultats des analyses des eaux d'irrigation

Ech.	T (c)	CE (dS/m)	pH	SAR	Anions (méq/l)				Cations (méq/l)			
					Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^{2-}	CO_3^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}
A	20.4	4.7	6.8	5.21	39.86	21.67	5.33	0	26.09	1.23	24	20
B	22.1	6.33	6.5	3.61	40.03	20.83	4.52	0	23.91	1.28	28.9	11.6
C	22.4	5.55	6.9	4.89	29.75	42.79	5.77	0	19.75	1.08	30.8	28.95
D	20.5	2.6	7.4	4.66	20.51	11.46	6.41	0	17.39	1.54	10.4	5.6

IV.2.6.1. Caractères physiques des eaux irrigation

IV.2.6.1.1. Température

La température de l'eau est un facteur important dans l'environnement aquatique du fait qu'elle régit la presque totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques (CHAPMAN et KIMSTACH, 1996).

Dans la zone d'étude, nous avons remarqué que la température de l'eau ne présente pas de grandes variations d'un puits à l'autre et reste toutefois voisine avec un minimum de 20,5 °C (puits A) et un maximum de 22,4 °C (puits C).

IV.2.6.1.2. pH

Ce paramètre mesure la concentration des protons H^+ contenus dans l'eau et donc l'acidité ou l'alcalinité de l'eau sur une échelle logarithmique de 0 à 14. Il influence la plupart des mécanismes chimiques et biologiques dans les eaux. Habituellement, les valeurs du pH se situent entre 6 et 8,5 dans les eaux naturelles (CHAPMAN et KIMSTACH, 1996).

Les valeurs du pH des eaux d'irrigation ne montrent pas de variations notables et elles sont proches de la neutralité avec un minimum de 6,49 dans le puits B et un maximum de 7,39 dans le puits D.

IV.2.6.1.3. Conductivité électrique

La conductivité électrique désigne la capacité de l'eau à conduire un courant électrique et elle est déterminée par la teneur en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau. Par conséquent, elle renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau. (DERWICHE et al, 2010).

D'après DURAND (1958), l'eau d'irrigation est marquée par une forte salinité (puits D et A) à salinité excessive (puits B et C), car 2,250 < C.E < 5 (dS/m) et C.E > 5 (dS/m). Cette eau présente un risque très élevé de salinisation des sols irrigués.

IV.2.6.2. Chimie et qualité de l'eau d'irrigation

IV.2.6.2.1. Bilan ionique

L'eau d'irrigation dans les sites de l'étude est marquée par la dominance du sodium et le calcium par rapport aux autres cations, avec des teneurs en Ca^{2+} de 10,4 à 30,8 méq/l. Les teneurs en Na^{+} varient de 17,39 à 26.09 méq/l, le Mg^{2+} 5,6 à 28,95 méq/l, et enfin k^{+} de 1,08 à 1,54 méq/l.

Pour le bilan anionique, on remarque une dominance des chlorures et des sulfates respectivement et des teneurs faibles en HCO_3^{-}.(tableau XII). Cl^{-} est dominant dans les puits A, B et D avec des valeurs qui varient de 20,51 méq/l dans le puits D à 40,03 méq/l dans le puits B. Les teneurs en SO_4^{-} varient de 11,46 méq/l dans le puits D à 42,79 méq/l dans le puits C.

IV.2.6.2.2. Faciès chimique.

En s'appuyant sur le diagramme de Piper pour déterminer le facies minéral de l'eau d'irrigation (figure 55), Il s'avère que son facies chimique est de type chloruré et sulfaté calcique et magnésien.

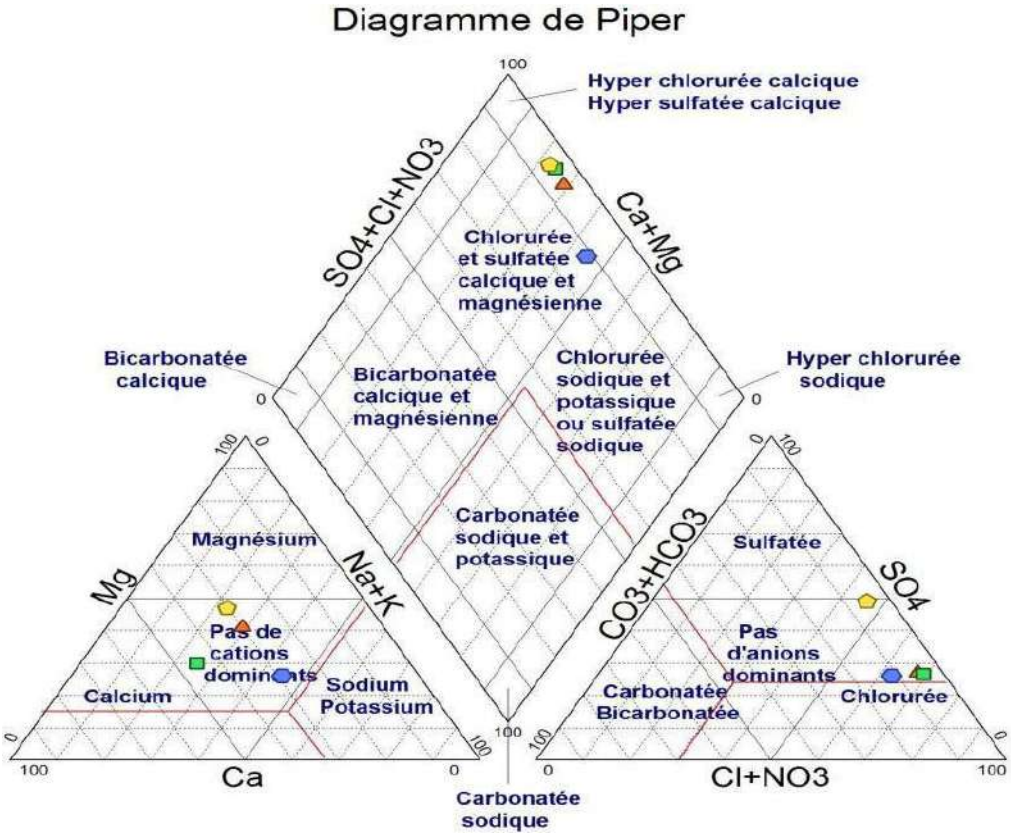

Figure 55 : Diagramme de piper des eaux d'irrigation

IV.2.6.2.3. Degré d'aptitude à l'irrigation

Le diagramme de RIVERSIDE (Fig. 56) nous a permis de déterminer l'aptitude des eaux d'irrigation dans les quatre sites.

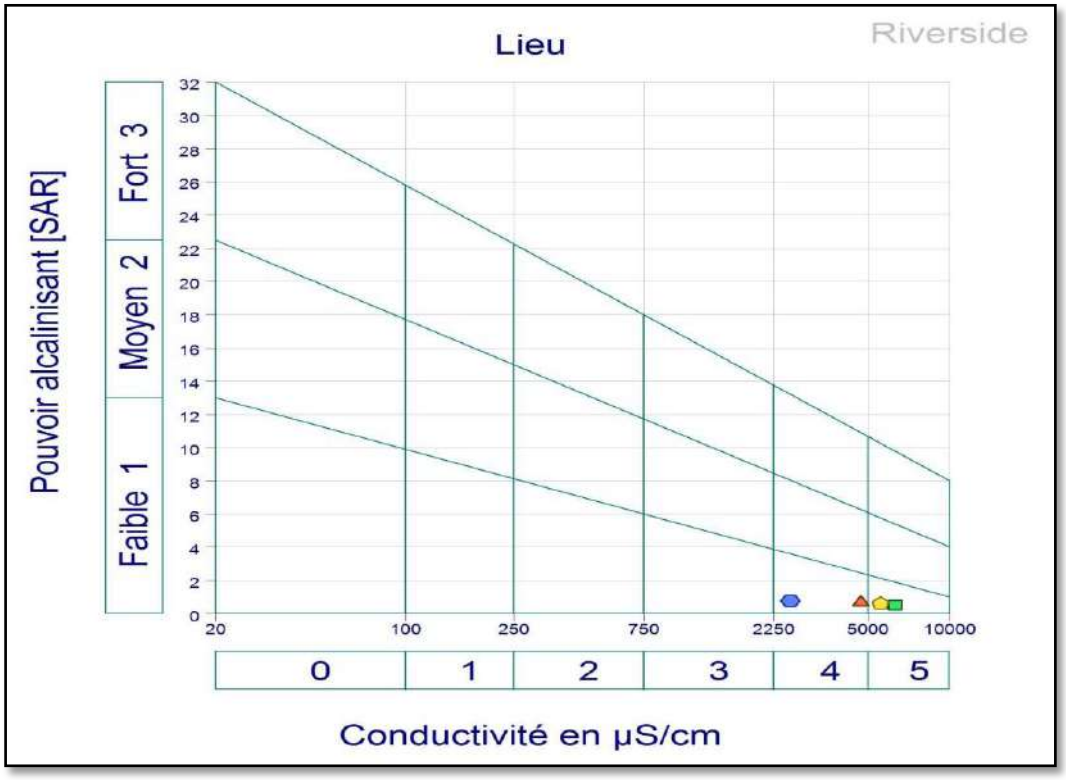

Figure 56 : diagramme de RIVERSIDE des eaux des quatre sites étudiés

L'observation du diagramme précédent montre que les eaux utilisées en irrigation dans les quatre sites étudiés se situent en général dans deux classes principales:

C4-S1: Qualité médiocre à mauvaise, fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés. Dans les puits A et D

C5-S1: Très déconseillé pour l'irrigation et pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces très tolérantes comme le palmier dattier. Dans les puits B et C.

IV.2.6.3. Conclusion

Les sols étudiés sont de type alluvionnaire de texture fine, généralement riches en limon et en sable fin. L'analyse granulométrique montre que la texture des sols est limono sableuse à limono argileuse.

D'une manière générale, les sols sont modérément calcaires dans la plupart des profils, avec des teneurs qui varient de 1 à 15 %.

La teneur en gypse est généralement faible avec un minimum de 1,84% et un maximum de 11% dans sol témoin (sol nu) et 7,36 % pour le sol cultivé. Ceci pourrait être expliqué par la lixiviation en profondeur du gypse par l'eau d'irrigation.

Les résultats révèlent des taux de matière organique faibles à moyens, qui diminuent progressivement et graduellement avec la profondeur, avec des valeurs légèrement plus élevées dans les profils témoins par rapport aux sols étudiés. Ceci est peut être dû à la décomposition rapide de la matière organique et son prélèvement par les cultures dans les sols irrigués par rapport au sol non irrigué.

Le pH est très légèrement à légèrement alcalin dans tous les sols étudiés.

L'eau utilisée pour l'irrigation provient de la nappe alluviale et elle est très salée (2,250 < C.E < 5 (dS/m), faiblement sodique (S.A.R<6) et le faciès globale est chloruré et sulfaté calcique et magnésien. L'eau est donc toxique du fait des taux élevés en sulfates et en chlorures. Elle présente des fortes teneurs en calcium, magnésium et sodium. Ceci peut être expliqué par la contamination par l'eau des forages profonds utilisés en irrigation dans d'autres endroits de la palmeraie et la diminution du niveau piézomètre (pompage et évaporation) qui favorise l'augmentation de la concentration en sels solubles dans l'eau.

IV.3. Etude de l'effet des irrigations sur le sol (salinisation)

En vue de tester la qualité des eaux de la nappe alluviale utilisées en irrigation dans une partie de la palmeraie, nous avons essayé de voir l'impact de ces eaux sur le sol notamment le problème de salinisation. Pour ce, on a choisis quatre sites à l'intérieur de la palmerai en se basant sur deux critères ; la qualité des eaux qui est médiocre dans ces points de la palmerais, vu leurs situation face à une éventuelle contamination par les eaux urbaines et les eaux des nappes profondes, ainsi que l'utilisation de l'eau de la nappe en irrigation.

Le protocole tracé pour cette étude consiste à faire un suivi de l'évolution de la CE et du pH des sols irrigués par une eau de la nappe alluviale de qualité médiocre (de point de vu CE et SAR) dans les quatre sites de l'étude. Il s'agit d'un suivi de l'évolution de ces deux paramètres dans le temps et à plusieurs profondeurs du sol.

En Algérie, les pratiques d'irrigation et la qualité de l'eau d'irrigation accroissent le risque de salinisation, au point que plus de 20 % des sols irrigués sont affectés par un problème de salinité (DOUAOUI et HARTANI, 2007; BOUHLASSA et al., 2008; ROUBHIA et DJABRI, 2010 ; GOUAIDIA et al., 2012 ; in BRADAI A., 2017).

IV.3.1. Evolution de la conductivité électrique avec la profondeur des sols

Les résultats de l'évolution de la CE des sols en rapport aux irrigations et avec la profondeur, dans les quatre sites étudiés sont représentés sous forme de profils salins (Figures 57, 58, 59 et 60). En suivant la classification de SERVENT (1973), on a pu identifier les types de profils salins des sols étudiés.

IV.3.1.1. Site A

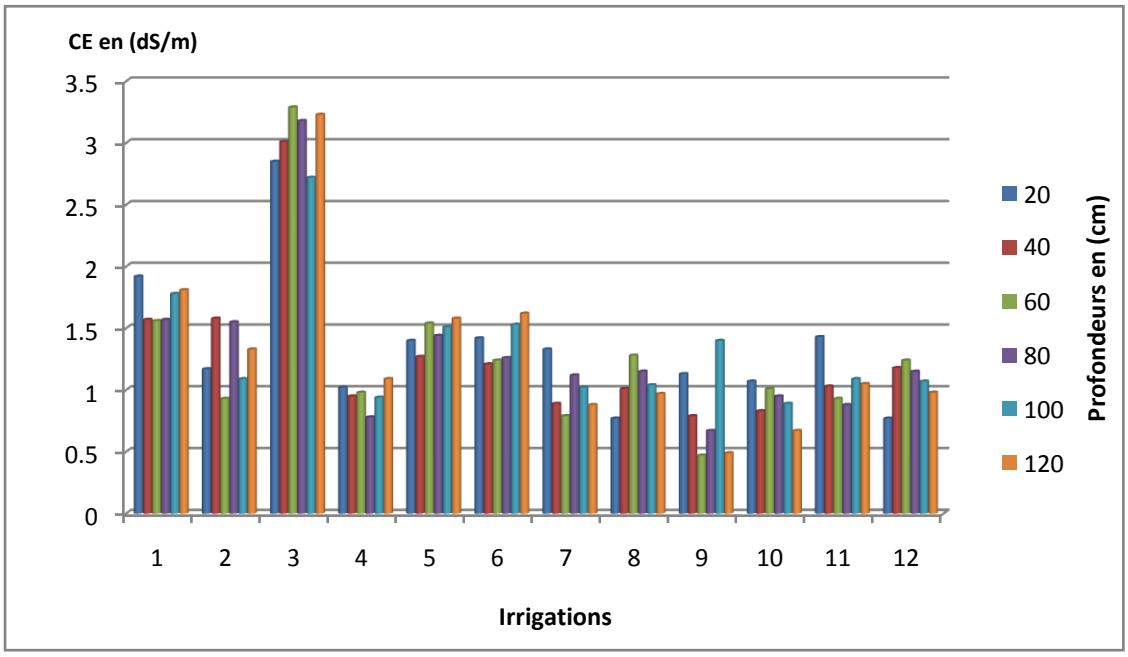

Figure 57:Evolution de la CE moyenne (dS/m) en fonction de la profondeur des profils (site A)

D'après la figure ci-dessus, le sol irrigué du site A est salé à fortement salé car les valeurs de CE varient entre 0,83 à 1,70 dS/m. D'une maniérée générale on a deux type de profils salins pour le sol irrigué ; Le premier est de type C et concerne les périodes après la 1ère, 4ième, 6ième, 7ième, 9ième et 11ièmeirrigations. L'accumulation des sels est ascendante (accumulation dans la zone superficielle du sol), sous l'effet de la micro capillarité.

Le deuxième profil est de type B et concerne les autres irrigations avec une distribution moyennement profonde des sels; c'est-à-dire déplacement des sels vers le bas du profil sous l'influence des irrigations.

IV.3.1.2. Site B

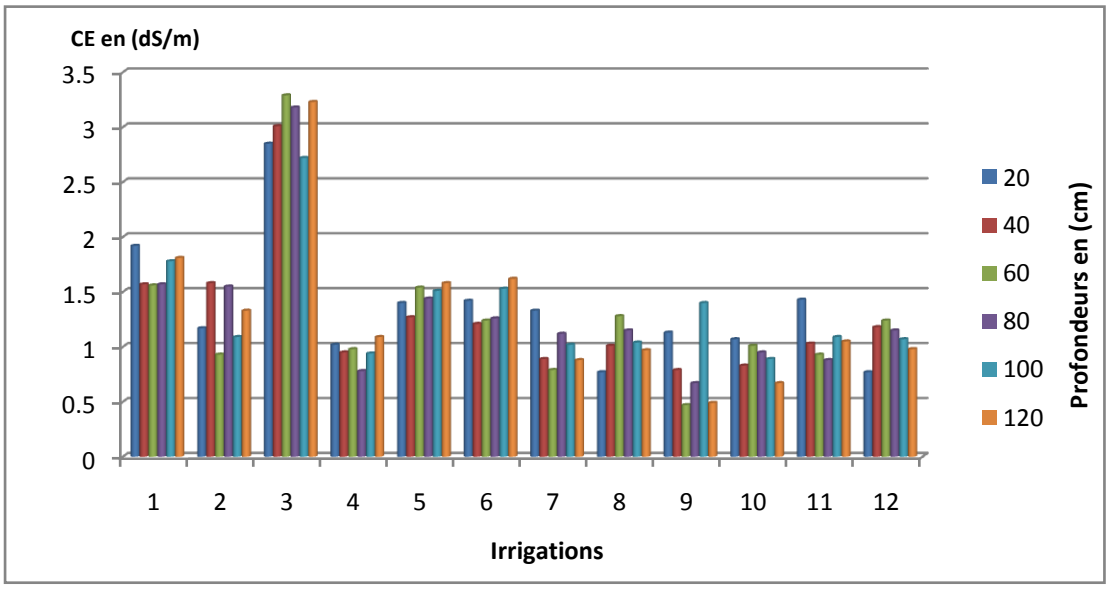

Figure 58 : Evolution de la CE moyenne (dS/m) en fonction de la profondeur des profils (site B)

Les sols irrigués sont salés à fortement salés avec des valeurs de CE qui se situent entre 1,05 à 2,08 dS/m. Ceci exprime l'effet de l'eau d'irrigation sur le sol car 2,250 < C.E < 5 dS/m.

Le profil salin est de type B avec un maximum de CE de l'ordre de 2,10 dS/m qui apparaît à moins d'un mètre de profondeur. Ceci indique un déplacement des sels vers le bas du profil sous l'influence des eaux d'irrigation, sauf à la troisième irrigation où nous avons noté une valeur élevée de CE en surface et que peut être expliquée par le manque de dose de lessivage).

IV.3.1.3. Site C

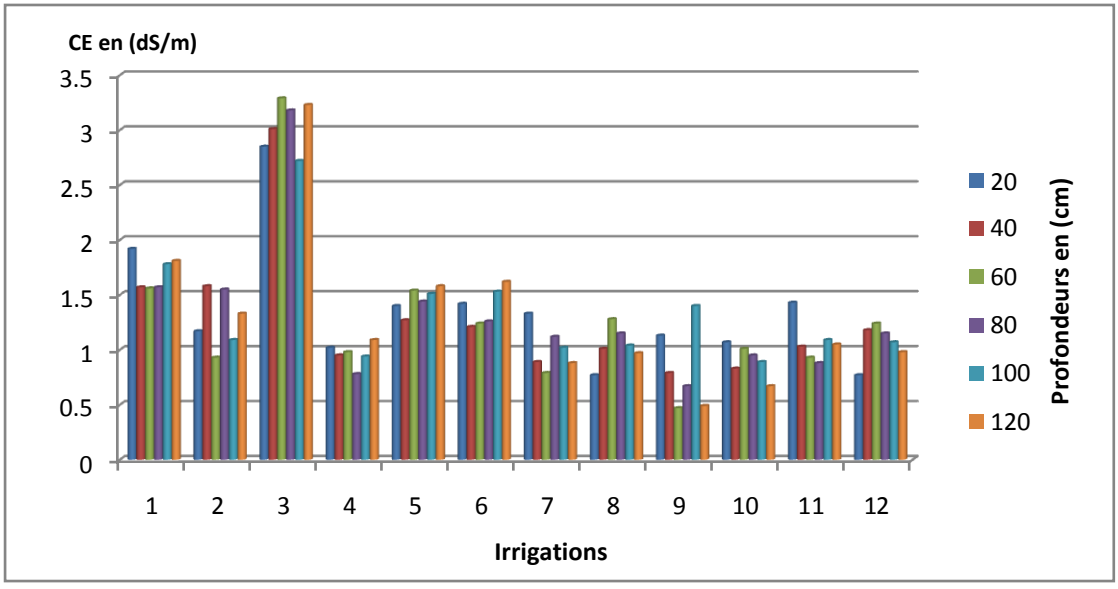

Figure 59: Evolution de la CE moyenne (dS/m) en fonction de la profondeur des profils (site C)

D'après SERVANT (Annexe 10), Le sol irrigué est salé à fortement salé avec des valeurs de CE entre 1,03 et 2,10 dS/m. Ceci montre l'effet des eaux d'irrigation sur le sol avec les mêmes risques enregistrés dans le sol B.

En générale, au niveau du site C il y'a trois types de profils salins: Profil de type C qui marque la deuxième, troisième quatrième, cinquième, sixième, et la douzaine irrigation avec une accumulation de sels en surface sous l'effet de la capillarité (accumulation ascendante). Cette accumulation est moins importante (ascendance lente des sels) vu la texture du sol (présence d'argile).

Le deuxième type de profil salin est de type B et caractérisant la première et la dixième irrigation. L'accumulation des sels se situe en profondeur dans la zone racinaire sous l'effet des irrigations, avec des valeurs qui varient entre 1,18 et 2,01 dS/m.

Le troisième profil est de type D et concerne le reste des irrigations. L'accumulation des sels se fait en profondeur avec des CE de l'ordre de 0,57 à 2,34 dS/m. Ceci montre que le sol a subit à un bon lessivage durant ces périodes d'irrigation.

IV.3.1.4. Site D

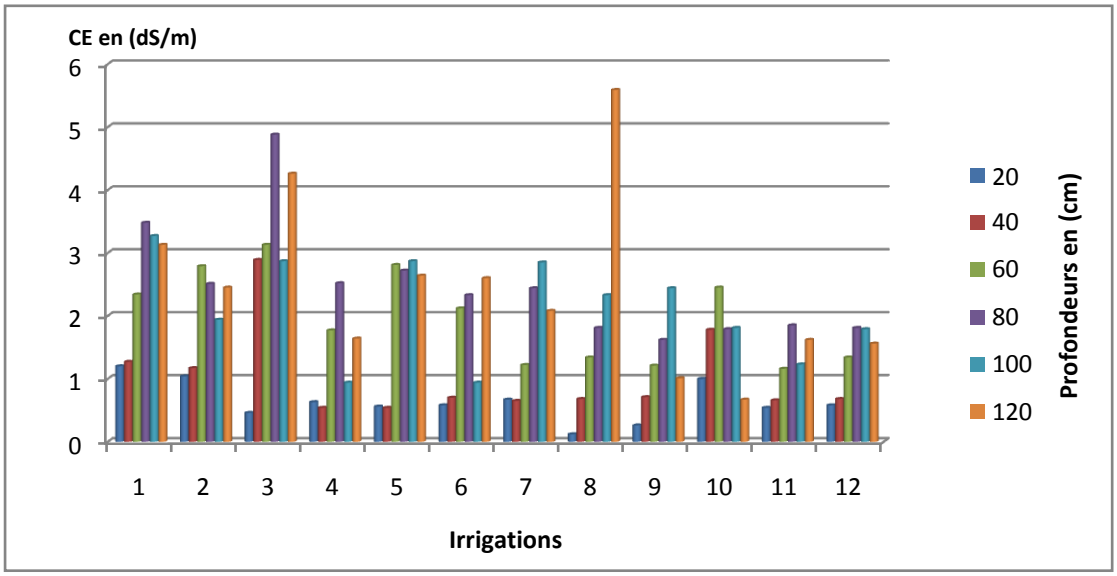

Figure 60 : variation de CE moyenne (dS/m) en fonction de la profondeur des profils (site D)

En ce qui concerne le site D, nous remarquons que les profils salins sont de type D où l'accumulation des sels se situe en profondeur avec des valeurs de CE de l'ordre de 0,60 à 3,43 dS/m. Ceci peut être expliqué par une bonne gestion des irrigations avec l'application de doses de lessivage. D'une manière générale le sol irrigué est salé à très

fortement salé avec des valeurs entre 1,27 et 2,45 dS/m. Le sol témoin est généralement moyennement salé.

IV.3.2. Evolution de la salinité (CE dS/m) dans le temps

Les résultats de l'évolution de la salinité sont exprimés par l'évolution de la CE moyenne des sols par irrigation et dans chaque point étudié (Figure 61).

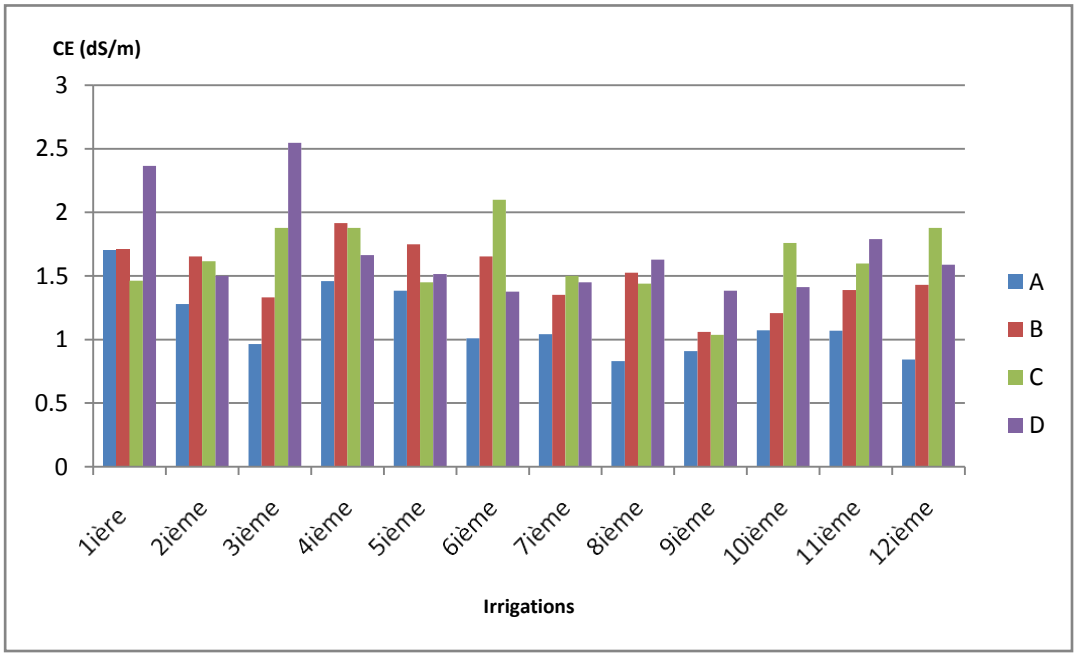

Figure 61: Evolutions de la CE moyenne (dS/m) dans le temps

Les résultats nous permettent de suivre l'évolution quantitative de la salinité globale après chaque irrigation et dans les quatre sites étudiés. D'une manière générale nous avons constaté un abaissement de la salinité (CE) du sol dans les sites A, B et D dans le temps, avec un changement des profils salins durant la période d'investigation. Ceci est dû parfois au non respect d'une bonne gestion des irrigations. En effet, l'application des doses d'eau faibles ne permet pas un bon lessivage des sels et enduit une accumulation en surface (profil salin de type C). L'apport des doses d'eau suffisantes permet le déplacement des sels vers la profondeur (dose de lessivage). Ceci se traduit par des profils salins de type B et D.

Concernant le point C, nous remarquons une légère salinisation du sol avec le temps qui est probablement due à l'insuffisance des doses d'irrigation appliquées. Ceci ne favorise pas le lessivage des sels. Nous notons une variation de la CE en relation des irrigations avec des valeurs de conductivité électrique qui diminuent jusqu'à la quatrième irrigation pour atteindre une valeur de 1,03dS/m. La CE

augmente après la quatrième jusqu'à la huitième irrigation pour atteindre une valeur maximale de 2,10 dS/m. Après la huitième irrigation les valeurs de la conductivité électrique diminuent pour augmenter ensuite à partir de la neuvième irrigation avec une valeur de 1,87 dS/m.

IV.3.3. Évolution du pH

IV.3.3.1. Évolution du pH en fonction de la profondeur

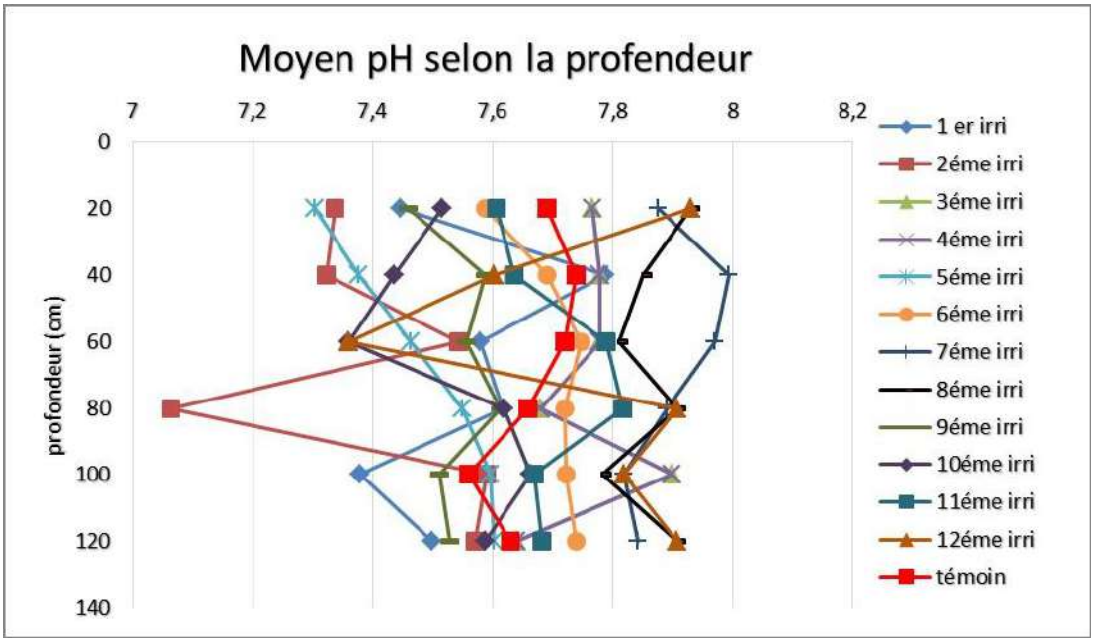

Figure 62: Variation du pH moyen en fonction de la profondeur des profils du site A

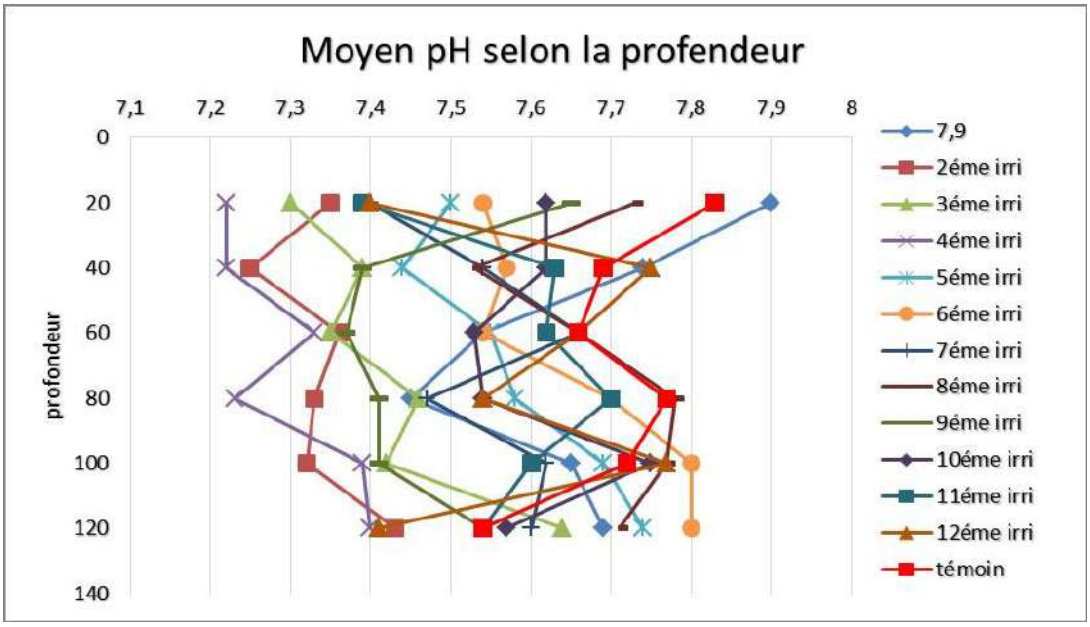

Figure 63: Variation du pH moyen en fonction de la profondeur des profils du site B

A partir de la figure précédente nous constatons que les valeurs du pH varient entre 7,3 à 8 durant toute la période d'observation, sauf pour la deuxième irrigation où nous avons enregistré une diminution du pH à la profondeur 80 cm par rapport au reste du profil. D'après la classification de DENIS (2000)(annexe 16), le sol du site A a un pH neutre à basique.

Au niveau du site B, le pH du sol n'a pas trop changé dans le temps et varie entre 7,2 à 7,9 dans le profil du sol et le pH est neutre à basique.

La figure 66 montre l'évolution du pH du sol dans les quatre sites durant toute la période d'investigation.

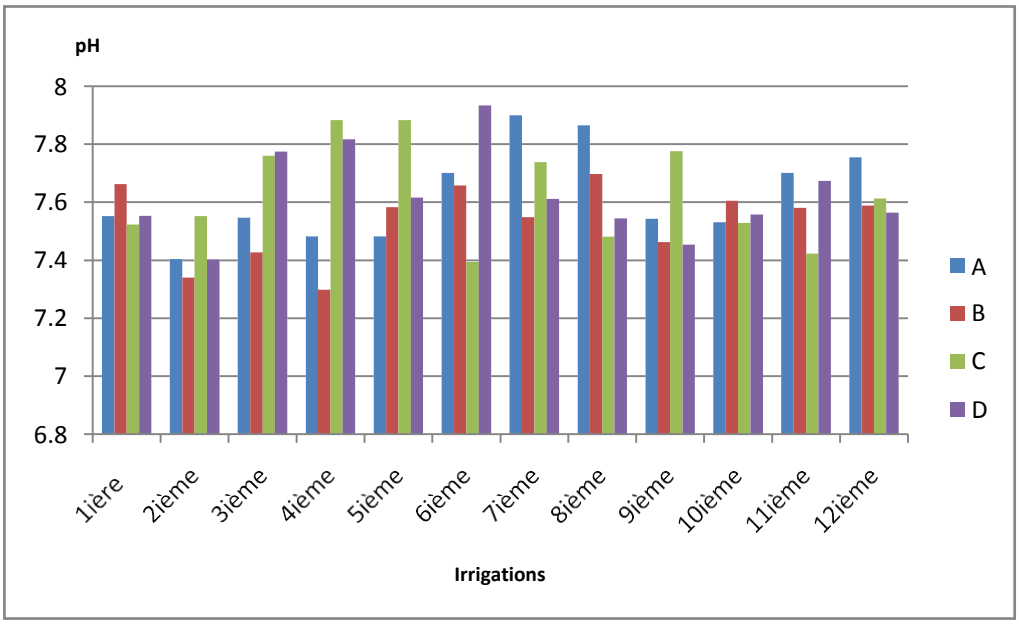

Figure 64 : Variation du pH moyen des sols des quatre sites dans le temps

De la figure précédente nous remarquons une faible variation du pH des sols des sites étudiés avec le temps. Les valeurs du pH se situent entre 7 et 8 d'une manière générale. Ceci est probablement dû à la forte activité biologique qui assure une bonne et rapide décomposition de la matière organique en relation avec la température et l'humidité du sol.

IV.3.4. Discussions

Les sols étudiés sont de type alluvionnaire de texture fine et ils sont riches en limon, en sable fin et en argile. L'analyse granulométrique montre que la texture des sols est limono sableuse à limono argileuse.

L'étude qualitative des eaux d'irrigation indique que la qualité de ces eaux est généralement non acceptable pour l'irrigation.

Les eaux d'irrigation des sites A et D sont de qualité médiocre et fortement minéralisées par rapport aux eaux des sites B et C. Cette eau est déconseillée pour l'irrigation et pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces très tolérantes comme le palmier dattier.

D'une manière générale les sols sont modérément calcaires dans la plupart des profils avec des teneurs qui varient de 1 à 15 %.

La teneur en gypse est généralement faible avec un minimum de 1,84% et un maximum de 11% dans sol témoin (sol non irrigué) et 7,36 % pour le sol irrigué. Ceci pourrait être expliqué par la lixiviation en profondeur du gypse par l'eau d'irrigation.

Les résultats révèlent des taux de matière organique faibles à moyens et qui diminuent graduellement avec la profondeur. Les valeurs du sol témoin sont légèrement plus élevées par rapport aux sols irrigués. Ceci est peut être dû à la décomposition rapide de la matière organique et son prélèvement par les cultures dans les sols irrigués par rapport au sol non irrigué. Le pH est très légèrement à légèrement alcalin dans tous les sols étudiés.

Suite à l'étude de la variation de la conductivité électrique durant les 12 irrigations et dans les 4 sites de l'étude, nous pouvons dire que l'irrigation par l'eau alluviale dans la palmeraie de Guerrara provoque une augmentation de la salinité du sol. Mais, cette salinisation a tendance à diminuer avec le temps ce qui peut être expliqué par l'effet des irrigations sur le lessivage des sels solubles dans le sol.

Cette diminution de la salure des sols est peut être due à la gestion acceptable des irrigations par des doses et des fréquences respectées.

Dans les sols témoins nous avons remarqué des teneurs en sels solubles qui sont plus élevées dans la couche superficielle puis il y'a une diminution progressive avec la profondeur. Par contre pour les sols irrigués les teneurs sont faibles en surface et augmentent en profondeur et diminuent de nouveau plus bas (sauf dans les sites A et C) où il y'a eu une légère perturbation des irrigations. Ceci montre le rôle très important des irrigations sur le profil salin des sols.

L'étude des corrélations sol-eau (Annexe 23) nous a permit de dire que l'irrigation par une eau de qualité médiocre exprime un effet général sur le sol, mais de façon plus lente en présence des doses de lessivage. D'une manière générale, le Cl^-, SO_4^{2-}, Ca^{2+} et Mg^{2+} favorisent la diminution des valeurs de CE (corrélation positive pour les sols).

En fin, il est à dire que l'irrigation des sols par cette eau ne constitue pas un grand problème pour les sols, mais à condition d'avoir une bonne gestion des irrigations avec des doses et des fréquences d'arrosage acceptables. Ceci permet de diminuer le taux des sels solubles dans la couche superficielle ou zone racinaire et de garder une salinité en deçà du seuil de tolérance, sans oublier le rôle majeur des inondations par les eaux des crues de l'Oued Zegrir dans le lessivage des sels.

IV.3.5. Conclusion

L'étude de l'effet de l'irrigation par les eaux de la nappe alluviale sur les sols de Guerrara nous a permit de mettre en évidence certaines caractéristiques morphologiques et analytiques des eaux et des sols, par un suivi de l'évolution de la salure des sols irrigués par cette eau.

Les sols sont généralement modérément calcaires avec moyennes à fortes teneurs en matière organique et moyennes teneurs en gypse. Ils sont faiblement à moyennement salés pour les sols témoins et moyennement à très fortement salés pour les sols irrigués.

Les résultats des analyse physico-chimiques de l'eau d'irrigation au laboratoire montrent qu'elle est dans l'ensemble fortement à excessivement salée et le pH est neutre.

La concentration en éléments solubles des extraits dilués des sols est faible et elle suit d'une manière générale la variation de la conductivité électrique. Elle décroit progressivement avec la profondeur pour les sols témoins, par contre pour les profils irrigués les teneurs en sels solubles augmentent avec la profondeur.

Les résultats de l'étude de la variation de la conductivité électrique durant la période d'observation montre que si une bonne conduite des irrigations (doses et fréquences d'arrosage respectées) est assurée, cette eau de qualité médiocre aura un faible effet sur le sol.

Pour mettre en évidence l'interaction eau/sol témoin et eau/sol irrigué nous avons fait appel à quelques analyses statistiques représentées par des tests de corrélation. Ces testes ont montré qu'il y'a une influence de l'irrigation par l'eau de la nappe alluviale sur les sols en générale, mais l'influence reste faible et plus lente.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de notre travail de recherche sur les effets de la nappe alluviale de l'Oued Zegrir sur la qualité des eaux et la salinisation des sols de l'Oasis de Guerrara, nous avons essayé de faire une approche sur le fonctionnement sol/nappe alluviale dans cette région. C'est une caractérisation de la nappe superficielle ou alluviale et des sols et de voir l'effet de l'utilisation de l'eau de cette nappe en irrigation sur le sol, en particulier le phénomène de salinisation dans cette région.

En effet, l'aquifère quaternaire de la région de Guerrara est constitué des alluvions sableuses et argileuses d'une épaisseur moyenne de 20 à 35m et contenant une nappe d'eau libre (alluviale). La présence de cette nappe dans les alluvions de l'Oued Zegrir a permet la création d'un système oasien particulier. Ce système est fragile face à une forte anthropisation qui est le résultat d'une croissance démographique rapide. Cette nouvelle conjoncture a été marquée par un accroissement de l'urbanisation et des activités agricoles et industrielles dans la région ce qui a fortement influencé cet écosystème, en particulier la qualité de l'eau de la nappe alluviale et les sols agricoles.

Les campagnes d'échantillonnage d'eau de la nappe alluviale nous ont permet d'établir une identification graphique de la piézométrie et des principaux familles de la qualité chimique de l'eau.

L'étude piézométrique de la nappe alluviale sur deux années et quatre compagnes d'investigation, nous a permis d'avoir des informations sur les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe. Les cartes piézométriques ont montré que la piézométrie représente un écoulement convergent vers le Nord-est en aval de la région et que les zones de drainage souterrain qui sont d'ailleurs les zones à forts gradients hydrauliques sont confondues avec la direction générale des crues de l'Oued Zegrir dans la palmeraie. La piézométrie indique aussi que la nappe est drainée par cet Oued. La lithologie de la nappe régit l'écoulement en influant sur la vitesse de circulation

La fluctuation piézométrique de la nappe est fonction des conditions climatiques, en particulier les précipitations et les fortes évaporations et aussi du pompage de l'eau. Les précipitations en amont de l'Oued Zegrir, une fois en quantités suffisantes permettent la formation et l'arrivée des crues dans la palmeraie de Guerrara (en aval) et l'alimentation de sa nappe alluviale (période des hautes eaux). Alors que le pompage d'eau pour l'irrigation et

les fortes évaporations font que le niveau piézométrique de la nappe baisse (période des basses eaux). Les mesures de la piézométrie indiquent que le niveau piézométrique présente une fluctuation caractérisée par une baisse durant les périodes des deuxièmes compagnes (période des basses eaux). Ceci est lié à l'effet de l'évaporation et à la faible recharge de la nappe. La baisse de la surface piézométrique varie de l'ordre de 0.3 à prés de 8 m durant toute la période d'observation.

L'étude hydro-chimique des eaux de la nappe a montré des différences concernant la conductivité électrique et du pH d'un puits à l'autre. La CE de l'eau varie de 0.16 à 11.63 dS/m durant la première année de l'étude et entre 1.60 et 19.04 dS/m durant la deuxième année et elle est fortement corrélée à la minéralisation totale de l'eau. La minéralisation des eaux est déterminée par la lithologie des formations encaissantes et les conditions hydrodynamiques de la nappe suite aux facteurs climatiques. Les faciès chimiques prédominants sont les faciès sulfaté sodique, le sulfaté calcique et chloruré sodique.

Les eaux de cette nappe sont dures à très dures et le plus souvent incrustantes et peuvent être utilisées en irrigation avec un danger moyen d'alcalinisation pour les sols.

Suite à l'étude de l'effet de l'irrigation par les eaux de cette nappe sur le sol nous pouvons dire que ces eaux peuvent enduire la salinisation des sols en absence d'une bonne gestion des irrigations et en absence de l'arrivée des crues de l'Oued Zegrir.

Pour conclure, nous pouvons dire que la nappe alluviale de l'Oued Zegrir a une influence sur la qualité des eaux et les sols dans l'écosystème oasien de Guerrara. Cette situation exige une réflexion de la part de tout le monde afin d'assurer le bon fonctionnement de cet écosystème.

En fait, le passage des crues de l'Oued Zegrir dans la palmeraie a une grande importance pour la continuité du fonctionnement et la pérennité de cet agro-système oasien. Les eaux de crues apportent des éléments nutritifs avec les alluvions, donc un amendement et permettent la recharge de la nappe et aussi le lessivage des sels déposés dans le sol.

Ce travail de recherche sur la relation entre la nappe alluviale de l'Oued Zegrir avec la qualité des eaux et les sols dans la région de Guerrara nécessite d'être poursuivi par d'autres travaux, en entamant d'autres aspects en relation avec la thématique de la thèse:

- Des travaux de recherches sur l'aspect microbiologique des sols ;

- Poursuivre les études sur l'évolution de la qualité hydrodynimique et hydrochimique de la nappe alluviale de Guerrara ;

- Des travaux sur la conduite des irrigations en utilisant différentes sources d'eaux ;

-Etudes sur d'autres sources de contamination de la nappe ;

-Suivi de l'évolution de la salinisation des sols irrigués ;

-Etude de l'évolution de la contamination des sols de la zone d'étude en nitrates.

Références bibliographiques

Al-OMRAN A. M., ALY A. A., ALWABELL M., SALLAM A. S., ALSHAYAA M. S., 2015. Hydrochemical characterization of groundwater under agricultural land in arid environment: a case study of Al-Kharj, Saudi Arabia. Arab J Geosci (2016) 9:68. DOI 10.1007/s12517-015-2136-5.

ANRH., 2007 : Rapport constitue une synthèse des résultats de l'inventaire des forages et enquête sur les débits extraits, réalisé en 2004/2005 à travers la wilaya de Ghardaïa.

AOUAM H., 2007. Etude minéralogique et micromorphologique des sols alluviaux de la région de Guerrara (W. Ghardaïa).

AUBERT J., 1978. Méthodes d'analyses des sols. Centre régional de documentation pédagogique de Marseille, service d'impression 55, rue Sylvabelle 13006 Marseille, P123.

BAIZE D.et JABIOL B., 1995. Guide de description des sols. Ed. AFES-INRA, Paris, 388 p.

BAIZE D., 2000. Guide des analyses en pédologie: choix, expression, présentation, interprétation. Edition INRA, Paris, 257p.

BALLAIS J.L., 2010. Des Oueds mythiques aux rivières artificielles. Hydrographie du bas Sahara Algérien. Physico-géo. Vol 4. 2010. p 107-127.

BANTON D et BANGOY L.M., 1999. Hydrogéologie- Multi-sciences environnementale des eaux souterraines. Ed. Presses de l'université de Québec. AUPLEF, 460 P.

BARZANJI A F., 1973. Gypsiferours soils of Iraq. Phd thesis. Univ. Gent, 199p.

BECHICHI-KHADRAOUI M., 2011. Les indicateurs paléo-écologiques dans les sols alluviaux (cas du daya EL M'rara). Mémoire. Mag. Agro. Université de Ouargla. p 4, 5.

BRADAI A., 2017. Evolution de la qualité géochimique des eaux souterraines utilisées dans l'irrigation et leur impact sur la dégradation des sols de la plaine du bas- Cheliff. Thèse de doctorat. Département d'Hydraulique, faculté de Géni Civil et d'Architecture, Université Hassiba Benbouali Chlef. 114 p.

CHAPMAN D., KIMSTACH V., 1996. Selection of water quality variables. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring,

CHABOUR N., 2006. Hydrogéologie des domaines de transition entre l'Atlas saharien et la plateforme saharienne à l'Est de l'Algérie. Faculté des Sciences de la Terre, de la Géographie et de l'Aménagement du Territoire.

CHELLAT S., 2015. Géologie des dépôts continental néogène du Sahara Algérien – Reconstitution paléo-environnementale des formations miopléocènes du nord central et nord est du Sahara. Thèse Doc. Université de Constantine. Pp 3-15.

C.P.C.S, 1967. Classification des sols. Laboratoire de géologie, pédologie de l'E.N.S.A, Paris, Grignon, 87p.

COUTURE I., 2004. Analyse d'eau pour fin d'irrigation MAPAQ. Montérégie-Est AGRI-VISION 2003-2004, 8 p.

DAJOZ R., 2006. Précis d'écologie. Ed. Dunod, Paris, 631p.

DERWICH E, BENAABIDATE L, ZIAN A, SADKI O, et BELGHITY D., 2010. Caractérisation physico-chimique des eaux de la nappe alluviale du haut Sebou en aval de sa confluence avec oued Fès. *In* Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 08, Juin 2010, p. 101-112.

DJEMMAL S., 2009. L'effet de la Sebkha sur la qualité des eaux souterraines dans la partie Sud-Est de setif - cas du Guidjal. Mémoire de Magister En géologie. Université Mentouri-Constantine.

DJILI B., 2004. Etude des sols alluviaux en zones arides : cas de la Daya d'El-Amied (région de Guerrara), essai morphologique et analytique. Mémoire Mag. Agro. Université de Ouargla, pp 8, 11, 15, 5.

DOUFENE S., 2012. Caractérisation micromorphologique et minéralogique des matériaux pédo-sédimentaires des systèmes des Dayas: cas de Dayet El-Amied, Guerrara. Mémoire Mag.Agro. Université de Ouargla, p 4, 8.

DUCHAUFOUR P., 1977. Pédologie. Pédogenèse et classification. Tome I. Ed. Masson, 477 p.

DUCHAUFOUR, P., 1997. Abrégé de pédologie. Sol, végétation, environnement. Ed Masson. 491p.

DUCHAUFOUR P., 2001. Introduction à la science du sol. Ed. Dunod. Paris, 331 p.

DURAND J.H., 1983. Les sols irrigables. Etude pédologique. Ed. Imprimerie Boudin, Paris, Hydrogeology science journal. Ed: IAHS press. Vol. 38. n°3. (pp 173-186).

DUTIL P., 1971. Contribution à l'étude des sols et des paléosols du Sahara. Thèse doc. d'état, faculté des sciences de l'université de Strasbourg, 346 p.

FAO., 1998. World Reference Base for Soil Resource.World Soil Resource Report N° 84. ISSS, ISRIC and F.A.O., Rome, 88p.

GOUAIDIA L., 2008. Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana, Nord-Est algérien. Thèse de Doctorat en sciences, Université d'Annaba, Algérie, 129 p.

HABBAD M., 1992. Contribution à la connaissance de la dynamique des sels des sols de la région de Ain Bennaoui (Biskra). Mémoire Ing. Université de Ouargla, 30p.

HADJ-SAID S., HAMDI-AISSA B., TOUIL Y., 2007. Qualité et ressources en eaux souterraines dans un agrosysteme oasien au Sahara d'Algerie (cas de l'oasis de Guerrara, M'Zab). Bull. du Groupe Francophone Humidimètrie et Transferts en Milieux Poreux, 54, 195-198.

HADJ-SAID S., ZEDDOURI A., DJABRI L., HAMDI-AISSA B., 2013. Determination of the aquifers geometry in arid zones by using geoelectrical method. Arab journal of geosciences (2013) G: 1081-1089. Doit 10.1007/5 12517-011-0413-5.

HALITIM A., (1988). Sols des régions arides d'Algérie. Ed. O.P.U., Alger.384p.

HAMDI AISSA B., 2008. Rapport sur l'ancienne oasis de Guerrara M'Zab. Association pour la sauvegarde du patrimoine/Guerrara3,4,6.

HAROUNA-SONLEY I., 2001. Etude de l'impact de la remonté de la nappe phréatique sur la salinisation des sols sous palmeraie à Ouargla (cas de l'ITAS. Université de Ouargla). Mémoire. Ing. Agro. Université de Ouargla.93p

JEGO G., 2008. Influence des activités agricoles sur la pollution nitrique des eaux souterraines. Analyse par modélisation des impacts des écosystèmes des grandes cultures sur les fuites de nitrate dans les plaines alluviales. Thèse Doc., Paul Sabatier, Univ. Toulouze III, 221p.

KHADRAOUI, A (a)., 2007. Sols et hydraulique agricole dans les Oasis Algériennes. 305P.

LENOBLE J.A., 1995. Géologique et hydrogéologie des Pyrénées orientales-relation rivière-nappe. L'exemple du fleuve Têt et de la nappe alluviale de la Salanique.

LOZET J et MATHIEU C.2002. Dictionnaire des sciences du sol, Ed., Tec., Doc., Lavoisur, 575 P.

MATHIEU C. et PIELTAIN F., 1998. Analyse physique des sols, méthodes choisies. Ed. Tech et Doc. Lavoisier, Paris, 275p.

MELOUAH O et ZEDDOURI A., 2016. Use of geophysical method for the demonstration of karstic phenomena in southern Algeria, Guerrara (district of Ghardaïa, Algeria). Journal of Fundamental and Applied Sciences- ISSN 1112-9867.

MENSOUS M., 2010. Etude du système de gestion des eaux usées dans l'oasis de Ouargla. Mag. Agro. Université de Ouargla. 67 P.

MORAND D T., 2001. Soil landscape of the wood burn. 1:100000 sheet. Department of land and water conserv**ation,** Sydney. Pp 271-273.

O.N.M., 2012: Données climatiques de la station de Ghardaïa, période 1998 -2012, rapport de l'Office National de la Météorologie O.N.M. Ouargla.

OULED SIDI AMOR T., 2016. Vulnérabilité à la pollution des eaux de la nappe superficielle de la vallée du M'zab. Master en Géologie. Université de Ouargla. P 13.
s
OZENDA P., 1983 : Flore de Sahara. Ed. C.N.R.S. Paris.

POUGET., 1980. Les relations sol-végétation dans les steppes sud Algéroises : végétation et matière organique dans les sols, travaux et documents de l'O.R.S T.O.M n°= 116-paris pp 323-362.

SERVANT J M., 1971. Le profil salin des sols, méthodes d'études et signification.

SORMAN A.V. et ABDULRAZZAK M.J., 1993. Recharge through wadi beds in arid regions.

U.S.D.A., (1998). Keys to soil Taxonomy. U.S.D.A-N.R.C.S. Washington D.C, 326p.

YOUCEF F., 2006. Contribution à la reconstitution du paléoenvironnement au sahara septentrional dans les sols de bassins endoréiques : cas de la région de Ouargla. Thèse de doctorat en sciences biologiques, université de Ouargla.

YOUCEFI M., 2011. Étude de l'impact de l'hydro-halomorphie des sols sur la biogéographie des hydro-halophytes danas la cuvette de Ouargla. Mémoire Mag.Agro. Université de Ouargla, 110p.

Annexes

Annexe 1 : Coordonnées géographiques des puits

Nom	X	Y	Alt.
P1	32,7885833	4,51044444	284
P2	32,7889167	4,508	281
P3	32,7912778	4,50686111	280
P4	32,7902222	4,50625	280
P5	32,7905	4,50530556	285
P6	32,7884444	4,50477778	281
P7	32,7865833	4,50597222	283
P8	32,7856389	4,50808333	284
P9	32,7835833	4,50883333	187
P10	32,7815556	4,50677778	288
P11	32,7977222	4,50402778	290
P12	32,7825	4,50175	291
P13	32,7847778	4,5005	291
P14	32,7851111	4,48211111	291
P15	32,78725	4,50086111	294
P16	32,78575	4,47977778	296
P17	32,7829444	4,47833333	298
P18	32,7799444	4,47697222	295
P19	32,7803056	4,49075	295
P20	32,78125	4,48916667	298
P21	32,7839444	4,49177778	300
P22	32,7858056	4,48961111	300
P23	32,7828333	4,48916667	299
P24	32,7821667	4,48994444	299
P25	32,7818889	4,4955	298
P26	32,78	4,49491667	296
P27	32,7823611	4,49719444	296
P28	32,7834444	4,49744444	296
P29	32,783	4,49558333	296
P30	32,7841667	4,49622222	294

Annexe 2 : Fluctuation saisonnière du niveau piézométrique de la nappe

Puits	Niveau piézométrique (NP) en m.			
	Octobre 2011	**Avril 2012**	**Octobre 2012**	**Avril 2013**
P1	260,2	258,6	258,4	256,7
P2	261,3	260	260,6	260
P3	262	-	260,4	265,7
P4	262,2	-	270	268,5
P5	267,86	-	268,5	268,05
P6	272	271,7	267	266,2
P7	275,3	274,8	272,1	271,1
P8	275,6	275,9	272,25	270,7
P9	280,5	279,9	178,1	173,37
P10	282,6	282,7	280,55	280,3
P11	283	287,8	286,25	287,3
P12	286,1	-	284,74	284,82
P13	296,6	287	284,8	284,95
P14	287,6	-	286,2	286,48
P15	288,3	288	286,4	284,9
P16	289,2	-	291,58	291,4
P17	290,6	295,6	293,5	292,75
P18	291,3	292,7	290,5	290
P19	292	288,9	286,25	285,5
P20	292,15	290,9	289	288,14
P21	292,3	296,7	294,3	293,85
P22	292,4	-	296,75	291,5
P23	292,5	-	287,64	292,62
P24	292,6	291,4	291,9	291,46
P25	294	287,4	293,65	291,7
P26	294	-	292,64	291,7
P27	294,2	-	291,7	291,5
P28	294,8	-	291,3	291,2
P29	295,1	293,7	292,2	291,74
P30	295,3	-	289,55	289,42

Annexe 3 : Evolution saisonnière de la CE de l'eau

Puits	CE (dS/m)			
	Oct. 2011	Av. 2012	Oct. 2012	Av. 2013
P1	8.07	8.78	8.19	8.79
P2	2.02	2.51	5.83	4.47
P3	1.14	-	3.13	3.30
P4	4.14	-	4.93	6.45
P5	5.89	-	2.37	2.25
P6	0.91	0.16	3.42	3.18
P7	3.49	6.03	4.86	4.36
P8	1.36	6.44	3.89	4.56
P9	4.03	5.92	8.55	12.70
P10	10.12	8.21	10.46	10.48
P11	8.04	3.85	5.51	5.08
P12	6.47	-	10.93	11.12
P13	4.48	7.6	7.80	15.51
P14	10.88	-	6.50	7.64
P15	5.35	5.98	6.20	12.16
P16	8.74	-	9.50	18.96
P17	3.95	3.15	2.90	3.79
P18	1.31	4.01	8.90	16.04
P19	2.26	3.22	1.80	3.99
P20	2.67	3.1	1.60	3.07
P21	6.45	4.2	4.50	6.28
P22	8.14	-	5.90	8.14
P23	5.44	-	6.40	8.92
P24	6.31	6.92	1.90	3.34
P25	3.55	3.84	1.70	3.47
P26	8.08	-	4.50	7.18
P27	3.37	-	7.50	9.05
P28	11.63	-	12.40	19.04
P29	5.78	6.64	3.80	5.34
P30	10.45	-	11.70	17.91

Annexe 4 : Evolution saisonnière du pH de l'eau

Puits	pH			
	Oct. 2011	Av. 2012	Oct. 2012	Av. 2013
P1	7,4	6,96	7,02	6,51
P2	7,51	7,43	7,06	6,67
P3	7,54	-	7,14	7,16
P4	7,42	-	6,94	6,91
P5	7,44	-	7,02	7,02
P6	8,4	7,8	7,23	7,05
P7	8	7,22	7,68	6,85
P8	8,32	7,71	7,7	7,57
P9	7,77	7,56	7,13	6,79
P10	7,65	7,01	7,21	7,08
P11	7,6	7,36	7,16	6,96
P12	7,8	-	7,29	7,13
P13	7,81	7,09	6,87	6,57
P14	7,95	-	7,05	7,18
P15	8,05	7,7	6,71	6,63
P16	7,74	-	7,02	6,83
P17	7,53	7,56	7,14	6,98
P18	7,85	7,84	6,87	6,58
P19	7,81	7,42	7,4	6,61
P20	7,72	7,87	7,82	6,86
P21	7,54	7,65	7,01	7,53
P22	7,26	-	6,98	6,72
P23	7,77	-	6,83	6,56
P24	7,8	7,54	7,89	7,6
P25	7,95	7,56	7,58	7,33
P26	7,92	-	7,17	7,18
P27	7,83	-	7,67	7,61
P28	8	-	7,83	7,03
P29	8,03	7,33	7,4	7,2
P30	7,92	-	6,81	6,67

Annexe 5 : Les rapports caractéristiques des éléments chimiques de l'eau (2011/2012)

Puits	1ère compagne			2ième		
	Ca^{2+}/Mg^{2+}	SO_4^{2-}/Cl^-	$(Na^+ + K^+)/Cl^-$	Ca^{2+}/Mg^{2+}	SO_4^{2-}/Cl^-	$(Na^+ + K^+)/Cl^-$
P1	1,04	0,37	0,43	0,80	0,41	0,41
P2	2,69	0,52	0,30	1,28	0,42	0,45
P3	1,29	0,52	0,47	-	-	-
P4	1,76	1,05	0,84	-	-	-
P5	0,47	0,38	0,38	-	-	-
P6	0,36	1,60	0,44	0,58	3,32	5,07
P7	1,80	2,08	2,16	1,58	0,93	1,01
P8	0,47	1,59	1,65	1,38	2,30	2,09
P9	0,70	1,03	0,89	1,24	0,46	0,22
P10	0,63	1,26	1,25	0,96	1,58	1,13
P11	0,88	0,76	1,04	0,95	0,28	1,04
P12	0,30	0,63	1,09	-	-	-
P13	2,35	0,58	0,79	2,55	2,54	2,84
P14	1,06	0,62	1,05	-	-	-
P15	0,81	4,65	2,28	1,87	1,98	3,24
P16	1,61	1	0,30	-	-	-
P17	0,96	0,83	0,75	0,69	0,81	1,04
P18	1,09	0,36	0,91	1,08	1,45	1,57
P19	0,52	0,34	0,41	1,55	1,22	0,55
P20	3,11	0,81	0,94	1,49	0,86	0,59
P21	2,48	4,05	3,82	1,64	1,84	1,31
P22	2,37	0,33	0,48	-	-	-
P23	1,55	0,72	1,01	-	-	-
P24	2,16	1,13	1,20	1,77	0,84	1,09
P25	1,11	1,48	2,51	1,41	1,04	0,84
P26	1,63	1,79	1,10	-	-	-
P27	1,55	0,76	0,89	-	-	-
P28	2,3	0,69	0,72	-	-	-
P29	1,45	1,23	1,42	2,07	0,75	0,74
P30	1,09	1,01	0,16	-	-	-

Annexe 6 : Les rapports caractéristiques des éléments chimiques de l'eau (2012/2013)

Puits	Octobre 2012			Avril 2013		
	Ca^{2+}/Mg^{2+}	SO_4^{2-}/Cl^-	$(Na^+ + K^+)/Cl^-$	Ca^{2+}/Mg^{2+}	SO_4^{2-}/Cl^-	$(Na^+ + K^+)/Cl^-$
P1	3,90	0,56	1,12	1,72	0,65	0,93
P2	1,94	0,62	0,97	1,85	0,60	1,07
P3	0,71	0,82	0,89	1,18	0,89	0,90
P4	1,78	0,46	0,96	2,35	0,59	0,97
P5	5,58	0,65	0,69	1,95	0,69	0,76
P6	1,44	0,92	0,86	1,00	0,85	0,87
P7	1,49	1,43	3,09	1,43	1,42	2,15
P8	0,70	0,96	0,69	0,66	0,83	0,65
P9	2	0,55	1,17	0,52	0,47	0,65
P10	3	0,66	0,82	1,5	3,69	3,57
P11	4	0,77	0,68	2,07	0,77	0,69
P12	5	0,69	0,73	2,87	0,69	0,70
P13	0,85	0,59	0,94	0,3	0,58	0,80
P14	0,70	0,61	1,08	0,71	0,70	0,99
P15	1,99	0,59	1,01	2,59	0,74	0,65
P16	0,81	0,52	0,90	1,20	0,66	0,80
P17	1,82	0,53	0,77	1,64	0,53	0,77
P18	5,16	1,00	1,52	0,40	0,27	0,42
P19	2,33	0,72	0,63	0,43	0,96	0,66
P20	5,15	0,25	0,63	1,29	0,93	1,20
P21	1,26	0,43	0,68	0,72	0,65	0,63
P22	0,98	0,45	0,75	1,89	0,67	0,76
P23	1,66	0,61	0,90	0,69	0,72	0,85
P24	2,50	2,10	2,27	2,81	1,20	1,28
P25	12,71	1,03	1,19	2,15	0,69	1,00
P26	1,07	0,82	0,95	0,47	0,65	0,88
P27	0,99	0,62	0,89	0,66	0,69	0,82
P28	2,33	0,40	0,71	0,68	0,38	0,43
P29	1,06	1,07	1,07	3,48	0,77	1,00
P30	2,03	0,38	0,91	1,45	0,49	0,73

Annexe 7 : Indice d'échange de base (IEB)

Puits	IEB			
	Oct. 2011	**Av. 2012**	**Oct. 2012**	**Av. 2013**
P1	0,56	0,47	-0,13	0,06
P2	0,69	0,05	0,03	-0,07
P3	0,52	-	0,1	0,1
P4	0,15	-	0,04	0,02
P5	0,61	-	0,3	0,24
P6	0,55	0,09	0,13	0,12
P7	-1,16	-1,39	-2,09	-1,15
P8	-0,65	-6,40	0,3	0,34
P9	0,10	0,08	-0,17	0,34
P10	-0,25	-2,14	0,17	-2,57
P11	-0,04	-1,11	0,31	0,31
P12	-0,09	-	0,26	0,3
P13	0,20	-1,28	0,05	0,2
P14	-0,05	-	-0,09	0
P15	-1,28	-0,11	-0,01	0,35
P16	0,69	-	0,1	0,19
P17	0,24	-1,55	0,23	0,23
P18	0,09	0,575	-0,53	0,57
P19	0,58	0,26	0,37	0,34
P20	0,05	-5,09	0,36	-0,2
P21	-2,82	-0,27	0,32	0,37
P22	0,51	-	0,24	0,23
P23	-0,00	-	0,1	0,15
P24	-0,20	-0,41	-1,27	-0,29
P25	-1,51	0,46	-0,2	0
P26	-0,10	-	0,05	0,12
P27	0,10	-	0,11	0,17
P28	0,27	-	0,29	0,57
P29	-0,42	-1,00	-0,08	0
P30	0,83	-	0,09	0,27

Annexe 8 : SAR

Puits	SAR			
	Oct. 2011	**Av. 2012**	**Oct. 2012**	**Av. 2013**
P1	2,4	2,08	**18,97**	9,12
P2	1,3	1,6	**10,26**	**11,53**
P3	1,5	-	3,77	4,21
P4	4,2	-	9,34	9,31
P5	3,0	-	3,09	3,26
P6	0,81	7,5	3,93	4,30
P7	6,9	6,5	**11,67**	**10,67**
P8	6,5	9,8	4,32	4,40
P9	4,8	4,6	15,06	8,82
P10	7,2	**20,0**	9,62	**17,22**
P11	5,8	1,1	3,89	4,43
P12	**10,2**	-	7,94	7,46
P13	6,6	**12,0**	**15,35**	**10,57**
P14	7,3	-	**12,25**	9,27
P15	4,2	4,5	**12,25**	7,56
P16	1,4	-	**14,20**	**10,30**
P17	4,4	4,9	5,61	5,29
P18	5,9	4,7	**19,18**	7,10
P19	2,7	8,8	3,44	2,86
P20	4,9	4,6	3,58	5,71
P21	**10,7**	**13,4**	4,43	3,89
P22	3,5	-	7,38	7,47
P23	8,9	-	9,19	9,72
P24	8,8	4,6	6,57	5,42
P25	**13,4**	6,1	6,38	6,00
P26	4,3	-	8,44	7,88
P27	8,3	-	8,95	8,53
P28	6,2	-	**11,94**	7,20
P29	9,3	5,7	6,58	7,36
P30	0,9	-	**17,50**	**11,18**

Les valeurs en gras représentent les eaux dont le S.A.R dépasse 10

Annexe 9 : La dureté totale de l'eau

Puits	Dureté	
	Oct. 2012	Av. 2013
P1	103	227
P2	115	80
P3	120	96
P4	78	140
P5	79	71
P6	110	92
P7	50	60
P8	162	156
P9	120	350
P10	400	125
P11	200	154
P12	300	339
P13	260	433
P14	126	220
P15	126	330
P16	240	456
P17	96	108
P18	74	540
P19	100	144
P20	59	71
P21	154	200
P22	222	217
P23	224	200
P24	70	103
P25	74	84
P26	170	195
P27	236	260
P28	260	715
P29	157	126
P30	200	490

Annexe 10 : Classe de salinité en fonction de la CE de l'extrait saturé et de la somme des Anions (SERVANT, 1971)

Classes	Désignation	CE (mmhos/cm à 25°c)	Somme des anions (méq/l)
0	Non salé	< 2.5	< 25
1	Faiblement salé	2.5 – 5	23 – 50
2	Moyennement salé	5 – 10	50 – 105
3	Salé	10 – 15	105 – 165
4	Fortement salé	15 – 20	165 – 225
5	Très fortement salé	20 – 27.5	225 – 315
6	Excessivement salé	27.5 – 40	315 – 620
7	Hyper salé	>40	>620

Annexe 11 : Classification des eaux phréatique

Résidus sec en g/l	**Déférents types d'eau de nappe**
$\leq 0,5$	Eau douce
$0,5 < R.S \leq 4,5$	Eau très faiblement salée
$4,5 < R.S \leq 10$	Eau faiblement salée
$10 < R.S \leq 25$	Eau moyennement salée
$25 < R.S \leq 45$	Eau fortement salée
$45 < R.S \leq 100$	Eau très fortement salée
>100	Eau excessivement salée

Annexe 12 : Indice croisé SAR/conductivité

Indice croisé SAR/conductivité	Indication
C1-S1	- eau utilisable pour la plupart des espèces cultivées et des sols
C1-S2	- eau utilisable pour la plupart des espèces cultivées - le sol doit être bien drainé et lessivé
C1S3	- le sol doit être bien préparé, bien drainé et lessivé, ajout de matières organiques - la teneur relative en Na peut être améliorée par l'ajonction de Gypse
C1-S4	- eau difficilement utilisable dans les sols peu perméables - le sol doit être bien préparé, très bien drainé et lessivé, ajout de matières organiques - la teneur relative en Na peut être améliorée par l'ajonction de Gypse
C2-S1	- eau convenant aux plantes qui présentent une légère tolérence au sel
C2-S2	- eau convenant aux plantes qui présentent une légère tolérence au sel - sol grossier ou organique à bonne perméabilité
C2-S3	- eau convenant aux plantes qui présentent une certaine tolérence au sel - sol grossier et bien préparé (bon drainage, bon lessivage, addition de matières organiques) - l'ajonction périodique de Gypse peu être bénéfique
C2-S4	- eau ne convient généralement pas pour l'irrigation
C3-S1	- eau convenant aux plantes qui présentent une bonne tolérance au sel - sol bien aménagé (bon drainage) - contrôle périodique de l'évolution de la salinité
C3-S2	- eau convenant aux plantes qui présentent une bonne tolérance au sel - sol grossier ou organique à bonne perméabilité, bon drainage - contrôle périodique de l'évolution de la salinité - la jonction périodique de Gypse peu être bénéfique
C3-S3	- espèces tolérantes au sel - sol très perméable et bien drainé
C3-S4	- eau ne convient pas à l'irrigation
C4-S1	- eau ne convient pas à l'irrigation dans des conditions normales - peut être utilisée si les espèces ont une bonne tolérance à la salinité et le sol est particulièrement bien drainé
C4-S2	- eau ne convient pas à l'irrigation dans des conditions normales - peut être utilisée si les espèces ont une très bonne tolérance à la salinité et le sol est particulièrement bien drainé
C4-S3	- eau ne convient pas à l'irrigation
C4-S4	- eau ne convient pas à l'irrigation

Annexe 13 : Classe des sols gypseux (BARZANJI, 1973)

Gypse (%)	**Nom de classe**
< 0.3	Non gypseux
0.3 à 10	Légèrement gypseux
10 à 15	Modérément gypseux
15 à 25	Extrêmement gypseux

Annexe 14 : Echelle de calcaire totale (BAIZE, 2000)

CaCO3 total	**Horizon**	**Nom de classe**
CaCO3 < 1	Horizon non calcaire	Non gypseux
1 < CaCO3 <5	Horizon peu calcaire	Légèrement gypseux
5 <CaCO3 < 25	Horizon modérément calcaire	Modérément gypseux
25 < CaCO3 <50	Horizon fortement calcaire	Extrêmement gypseux
50 < CaCO3 <80	Horizon très calcaire	
CaCO3 > 80	Horizon excessivement calcaire	

Annexe 15: Echelle de salinité -extrait 1/5- (SERVANT, 1975)

CE (dS/m) à 25 °C	Degré de salinité
≤ 0.25	non salé
0.25 < CE ≤ 0,5	Faiblement salé
0,5 < CE ≤ 1	Sol moyennement salé
1 < CE ≤ 1,5	Sol salé
1,5 < CE < 2	Sol Fortement salé
2 < CE < 2,75	Sol fortement salé
2,75 < CE< 4	Excessivement salé
> 4	Hyper salé

Annexe 16 : Echelle d'interprétation de pH -extrait 1/2.5- (BAIZE, 2000).

Valeur de pH	**Classe d'interprétation**
<3.5	Hyper acide
3.5 – 4.2	Très acide
4.2 – 5.0	Acide
6.5 – 7.5	Neutre
7.5 – 8.7	Basique
>8.7	Très basique

Annexe 17 : Echelle d'interprétation de la matière organique % (MORAND, 2001).

M O %	**Nom de classe**
0.5 à 1 %	Très faible en M O
1 à 2 %	Faible en M O
2 à 3 %	Moyenne en M O
3 à5 %	Elevée en M O
> 5 %	Très élevée en M O

Annexe 18 : **Classe d'eau selon l'U.S.S.L (1954)**

Classe	Qualité	Interprétation
C1-S1	Bonne qualité	Précaution avec les plantes sensibles
C1-S2 C2-S1	Qualité moyen à bonne	A utilisé avec précaution dans les sols lourds mal drainés et pour les plantes sensibles (arbre fruitières)
C2-S2 C1-S3 C3-S1	Qualité moyenne à médiocre	A utilisé avec précaution. Nécessite de drainage avec dose de lessivage et/ou apport de gypse
C4-S1	Qualité à médiocre à mauvaise	Exclure les plantes sensibles et les sols lourds. Utilisable avec beaucoup de précautions dans les sols légers, bien drainés avec dose de lessivage et /ou apports des gypses.
C2-S1 S2-C4 C3-S3	Qualité mauvaise	A utiliser, avec beaucoup de précaution que dans les sols légers et bien drainé et pour des plantes résistantes. Risque élevés. Lessivage et apport de gypses indispensables
C3-S4 C4-S3	Qualité mauvaise	A utilisé que dans des circonstances Exceptionnelles
C4-S4	Déconseiller pour l'irrigation	
C5-S1 C5-S2 C5-S3 C5-S4	Très Déconseillé pour l'irrigation	

Annexe 19 : Le bilan ionique de la 3ième compagne(en méq/l).

Puits	Na+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3
1	60,87	1,08	16,4	4,2	54,89	31,25	4,8
2	34,78	0,77	15,2	7,8	36,56	22,92	5,23
3	13,04	0,62	10	14	15,18	12,5	6,29
4	26,09	0,77	10	5,6	27,88	12,84	4,13
5	8,7	0,92	13,4	2,4	13,78	8,96	5,04
6	13,04	0,62	13	9	15,75	14,58	4,76
7	26,09	0,77	6	4	8,68	12,5	12,16
8	17,39	0,62	13,37	19	25,78	25	5,07
9	52,17	0,92	16	8	45,35	25	15,3
10	60,87	1,08	60	20	74,65	50	8,61
11	17,39	0,92	32	8	26,73	20,83	6,93
12	43,48	0,62	50	10	59,67	41,67	6,93
13	78,26	0,92	24	28	83,53	50	9,07
14	43,48	0,77	10,4	14,8	40,69	25	8
15	43,48	2,46	16,8	8,4	45,35	27,08	3,72
16	69,57	1,54	21,6	26,4	78,76	41,67	8
17	17,39	0,77	12,4	6,8	23,58	12,5	3,93
18	52,17	1,85	12,4	2,4	35,32	35,42	4,8
19	10,87	0,92	14	6	18,59	13,44	2,67
20	8,7	1,38	9,88	1,9	15,83	3,96	3,93
21	17,39	2,15	17,2	13,6	28,64	12,5	10,67
22	34,78	3,23	22	22,4	50,12	22,92	2,67
23	43,48	1,85	28	16,8	50,12	30,83	1,07
24	17,39	1,08	10	4	8,13	17,08	5,11
25	17,39	0,77	13,77	1,1	15,15	15,63	3,51
26	34,78	1,15	17,6	16,4	37,69	31,25	4,48
27	43,48	1,23	23,6	23,6	50,12	31,25	3,72
28	60,87	2	36,4	15,6	88,31	35,83	0,53
29	26,09	1,15	16,2	15,2	25,3	27,08	9,28
30	78,26	2,46	26,8	13,2	88,31	33,75	6,92

Annexe 20: Le bilan ionique de la 4ième compagne(en méq/l).

Puits	Na+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2}-	HCO_3^-
1	43,48	1,28	28,8	16,7	47,86	31,25	6,18
2	32,61	0,67	10,4	5,6	30,99	18,75	4,52
3	13,04	0,72	10,4	8,8	15,21	13,54	3,87
4	34,78	0,97	19,6	8,3	36,62	21,88	5,36
5	8,7	0,97	9,4	4,8	12,68	8,75	4,85
6	13,04	0,82	9,2	9,2	15,79	13,54	3,62
7	26,09	0,72	7,03	4,9	12,45	17,71	12,3
8	17,39	0,67	12,48	18,8	27,49	22,92	3,79
9	52,17	0,72	24	46,0	80,56	38,54	15,74
10	60,87	1,18	15	10,0	17,38	64,2	2,72
11	17,39	1,13	20,8	10,0	26,76	20,83	7,05
12	43,48	0,82	50,4	17,5	63,15	43,75	6,93
13	69,57	0,77	20	66,7	87,46	51,46	7,79
14	43,48	0,77	18,4	25,6	44,25	31,25	5,36
15	43,48	1,85	47,7	18,4	69,58	51,67	1,64
16	69,57	1,54	49,83	41,3	87,89	58,33	11,08
17	17,39	0,77	13,46	8,2	23,49	12,5	6,59
18	52,17	1,79	31	77,0	126,7	34,24	7,82
19	10,87	0,56	8,8	20,0	17,21	16,67	3,62
20	15,22	0,87	8	6,2	13,35	12,5	3,13
21	17,39	2,15	16,8	23,2	30,99	20,42	3,89
22	34,78	3,23	28,4	15,0	49,46	33,33	2,05
23	43,48	1,79	16,4	23,6	53,11	38,52	1,23
24	17,39	0,97	15,2	5,4	14,24	17,12	4,52
25	17,39	0,72	11,48	5,3	18,05	12,5	2,8
26	34,78	1,33	12,53	26,4	41,04	27,08	3,7
27	43,48	1,54	20,8	31,2	54,31	37,5	4,11
28	60,87	1,44	58	85,0	144,03	55,64	4,52
29	26,09	0,97	19,51	5,6	27,04	21,04	7,9
30	78,26	1,54	58	40,0	108,99	54,17	7,48

Annexe 21 : Résultats des analyses physicochimiques du sol

Point A

Prof (cm)	Anions (meq/l)			Cations (meq/l)				$Caco_3$ (%)	Gypse (%)	MO (%)
	Cl^-	So_4^{2-}	Hco_3^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}			
20	5	43.2	11	2.28	0.21	23	10.2	10.21	5.53	1.16
40	4	29.96	3	2.97	0.16	12.4	4.4	12.82	1.84	2.17
60	2	8.56	7	2.64	0.13	11.2	4.8	8.95	1.84	1.43
80	3	12.84	6	2.64	0.12	7.6	8.4	14.32	7.37	-
100	1	8.56	2	2.31	0.16	9	11.8	10.4	1.84	-
120	2	17.2	9	2.31	0.22	9.4	12	10.89	5.53	-

Point B

Prof (cm)	Anions (meq/l)			Cations (meq/l)				$Caco_3$ (%)	Gypse (%)	MO (%)
	Cl^-	So_4^{2-}	Hco_3^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}			
20	2	17	4	2.64	0.12	13.8	4	6.77	5.53	0.53
40	4	12.84	8	2.28	0.19	28	6	10.4	5.53	0.11
60	4	17.12	4	2.64	0.19	11.8	12	9.68	7.37	0.26
80	5	42.8	3	1.66	0.13	12	57.5	8.71	7.37	-
100	4	21.4	4	2.64	0.13	9	7.4	9.19	5.53	-
120	3	11	5	2.64	0.17	11.8	8.6	9.19	3.68	-

Point C

Prof (cm)	Anions (meq/l)			Cations (meq/l)				$Caco_3$ (%)	Gypse (%)	MO (%)
	Cl^-	So_4^{2-}	Hco_3^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}			
20	2	41.36	4	2.07	0.14	25.6	14.4	10.4	1.84	2.22
40	7	38.52	9	2.07	0.13	21.6	11.6	10.66	1.84	1.48
60	3	17.12	6	2.64	0.23	9.4	24.6	10.89	1.84	0.11
80	2	29.96	8	2.97	0.14	20.8	12.8	12.34	5.53	-
100	5	47	8	3.3	0.17	44.6	15.2	10.43	3.68	-
120	5	47.08	7	2.7	0.12	66.6	2.6	12.1	7.37	-

Point D

Prof (cm)	Anions (meq/l)			Cations (meq/l)				$Caco_3$ (%)	Gypse (%)	MO (%)
	Cl^-	So_4^{2-}	Hco_3^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}			
20	1	16.5	7	1.65	0.12	17.8	10.2	10.21	3.68	1.34
40	2	21.4	6	2.97	0.16	20.4	3.6	12.82	3.68	1.34
60	5	55.64	16	3.3	0.19	51.8	15.4	8.95	5.53	0.51
80	4	38.52	1	2.97	0.14	41.8	1.2	14.32	3.68	-
100	11	25.68	4	2.31	0.13	55.2.2	13.8	10.4	7.37	-
120	2	4.28	6	3.3	0.14	3.2	5.8	10.89	5.53	-

Annexe 22: Paramètres avec valeurs limites (Normes de l'OMS 2006) (lenntech).

Groupe de paramètre	Paramètres	Unités	VALEURS LIMITES (CMA)
Eléments toxiques	Arsenic (As)	mg/l	0.01
	Cadmium(Cd)	mg/l	0,003
	Chrome Cr^{+3}, Cr^{+6}	mg/l	chrome total : 0,05
	Cyanure (CN^-)	mg/l	0,07
	Mercure (Hg)	mg/l	inorganique : 0,006
	Sélénium(Se)	mg/l	0,01
	Plomb(Pb)	mg/l	0,01
	Antimoine(Sb)	mg/l	0.02
	Fer(Fe)		Pas de valeur guide
	Manganèse(Mn)	mg/l	0 ,4
Eléments indésirables	Aluminium(Al)	mg/l	0,2
	Cuivre (Cu^{2+})	mg/l	2
	Ammonium ($NH_4^{+)}$	mg/l	0.5
	Argent		Pas de valeur guide
	Fluorures	mg/l	1,5
	Zinc(Zn)	mg/l	3
	Bore(B)	mg/l	0.5
	Hydrocarbures aromatiques polynucléaires C_2 H_3 N_1 O_5 $P_{1\ 3}$	µg/l	0.1
	Pesticides	mg/l	0.0001
Minéralisation globale	THM (Trihalométhanes) C Cl_4	µg/l	4
	CalciumCa^{2+}	**mg/l**	**100**
	Chlorures(Cl)	**mg/l**	**250**
	Dureté mg/l $\underline{Ca}CO_3$	**Ppm**	**200**
	Sodium (Na)	**mg/l**	**200**
	Magnésium Mg^{2+}	**Magnésium Mg^{2+}**	
	Potassium (K^+)	**mg/l**	**12**

Annexe 23 : Teste de corrélation eau/sol

Variable	CE	pH	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	Na^+	K^+	Ca^{+2}	Mg^{+2}	CE i	pHi	Cl^-i	$SO_4^{2-}i$	HCO_3^-i	Na^+i	K^+i	$Ca^{+2}i$	$Mg^{+2}i$	CE t	pH t
CE	1,00																			
pH	-0,20	1,00																		
Cl^-	0,36	-0,08	1,00																	
SO_4^{2-}	0,29	-0,07	0,46	1,00																
HCO_3^-	-0,04	0,03	0,10	0,35	1,00															
Na^+	0,25	0,02	-0,06	0,06	0,19	1,00														
K^+	0,00	-0,03	-0,06	-0,01	0,38	0,15	1,00													
Ca^{+2}	0,41	-0,01	0,59	0,68	0,29	0,19	-0,11	1,00												
Mg^{+2}	0,13	-0,08	0,21	0,34	-0,11	-0,41	0,06	-0,05	1,00											
CE i	-0,10	-0,13	-0,07	-0,03	-0,16	-0,23	0,10	-0,27	0,21	1,00										
pHi	0,19	0,14	0,12	0,16	0,20	0,27	-0,13	0,39	-0,17	-0,96	1,00									
Cl^-i	-0,30	-0,10	-0,18	-0,27	-0,18	-0,26	0,17	-0,50	0,07	0,79	-0,92	1,00								
$SO_4^{2-}i$	0,04	0,04	0,02	0,34	0,10	-0,03	0,05	0,13	0,12	0,58	-0,37	0,16	1,00							
HCO_3^-i	0,19	0,17	0,12	0,26	0,25	0,27	-0,11	0,44	-0,16	-0,86	0,96	-0,92	-0,09	1,00						
Na^+i	-0,36	-0,07	-0,22	-0,32	-0,15	-0,23	0,19	-0,52	-0,00	0,59	-0,78	0,96	0,01	-0,80	1,00					
K^+i	0,11	-0,01	0,07	-0,18	-0,02	0,12	-0,12	0,09	-0,11	-0,77	0,66	-0,54	-0,91	0,41	-0,41	1,00				
$Ca^{+2}i$	-0,10	-0,08	-0,07	0,07	-0,09	-0,20	0,11	-0,19	0,18	0,96	-0,88	0,71	0,77	-0,70	0,53	-0,92	1,00			
$Mg^{+2}i$	-0,08	0,08	-0,05	0,26	0,12	-0,04	0,11	0,03	0,05	0,52	-0,38	0,29	0,94	-0,10	0,22	-0,94	0,74	1,00		
CE t	-0,02	0,03	0,06	-0,41	-0,15	0,04	0,00	-0,11	-0,13	-0,52	0,30	-0,02	-0,81	0,10	0,17	0,67	-0,63	-0,65	1,00	
pH t	-0,17	-0,04	-0,06	0,05	0,02	-0,13	-0,29	-0,04	0,01	-0,18	0,13	-0,11	-0,37	0,02	-0,09	0,37	-0,28	-0,40	-0,12	1,00