

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
Université Mohamed Kheider Biskra
Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie
Département des sciences agronomiques

N° d'ordre :.....
Série :.....



THESE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT
EN SCIENCES AGRONOMIQUES
OPTION : Agriculture et environnement en régions arides

PAR Rechachi Miled Zohra

THEME

**Impact de la qualité des eaux d'irrigation sur la salinisation des
sols en régions arides et semi arides : cas de la région du Ziban.**

Soutenu le 11/05/2017

Devant le jury composé de :

BENKHALED Abdelkader	Président	Professeur	Université Mohamed Kheider Biskra
CHEBBAH Mohamed	Directeur de thèse	Professeur	Centre universitaire A. Boussouf Mila
YOUCEF Leila	Examineur	Professeur	Université Mohamed Kheider Biskra.
MASMOUDI Ali	Examineur	Professeur	Université Mohamed Kheider Biskra
ABDESSELAM Salah	Examineur	Maitre de Conférences A	Université Hadj Lakhdar Batna
GHOMRI Ali	Examineur	Maitre de Conférences A	Université Hamma Lakhdar El-Oued

Année universitaire 2016-2017

Dédicaces

Je dédie cette thèse à

Ma très chère mère, pour son amour, son support moral et physique, ses prières et ses tendresses pour m'avoir donnée la force de continuer et obtenir ce document ;

Mon très cher père pour ses encouragements, son soutien moral et physique qui m'ont précieusement aidée à avoir ce document ;

Que dieu grand et puissant les bénisse et leur accorde une très longue vie

Amen

Mon très cher mari pour sa tendresse et sa patience ;

Mes précieux enfants Mahdi Tahar et Mahieddine ;

Mes deux grandes familles Rechachi et Zerarka

Mes sœurs, mes frères ;

Madame Bougouffa Soraya et sa famille à Avignon-France

A tous les membres du monde scientifique ;

Remerciements

A l'issue de ce travail, je viens remercier toutes les personnes qui, de près ou de loins m'ont aidé à le réaliser.

Monsieur CHEBBAH MOHAMED, Directeur de thèse, Professeur, centre universitaire A. Boussouf Mila qui a accepté de diriger dans la continuité mes travaux ; sa confiance et son soutien m'ont été le souffle permanent durant toutes les années de réalisation de la thèse.

Je suis très sensible à l'honneur que me fait Monsieur BENKHALED ABDELKADER, Professeur, département d'hydraulique à l'université de Biskra, d'avoir bien voulu juger mon travail et qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Je remercie Monsieur GHOMRI ALI., maitre de conférence A à l'université el-Oued d'avoir accordé un intérêt à mes travaux et accepter d'examiner cette thèse qu'il trouve ici le témoignage de mon profond respect.

Mes vifs remerciements vont également à monsieur ABDESSELAM SALAH., maitre de conférence A à l'université de Batna d'avoir accepté de juger ce travail. Je lui exprime ici mon profond respect.

Je remercie aussi madame YUCEF LEILA, professeur. Département d'hydraulique à l'université de Biskra, d'avoir bien voulu juger mon travail et d'avoir accepté de faire partie de mon jury. J'exprime ici toute ma reconnaissance.

Je remercie aussi monsieur MASMOUDI ALI., maitre de conférences au département d'agronomie à l'université de Biskra, d'avoir accepté de faire partie de mon jury. Je lui exprime ici toute ma reconnaissance.

Je remercie, infiniment, madame LAKHDARI FATTOUM, la directrice du centre de recherche scientifique et technique sur les régions arides. CRSTRA –Omar el Bernaoui- qui m'a offert cette opportunité d'effectuer mon travail et mon stage à l'étranger, elle est ouvert pour toute source du développement. C'est grâce au centre que je puisse exercer et continuer d'exercer mes travaux de recherches, pour leurs précieuses aides afin d'élaborer ce travail. Mes vifs remerciements sont adressés au staff technique et scientifique du centre.

Je remercie également Monsieur HALITIM AMOR, notre sommité scientifique et chef de la division gestion des ressources en sols en zones arides du CRSTRA, Je lui exprime ici ma

profonde gratitude pour ses orientations utiles et fructueuses et qui m'a orienté vers M. Bourrié Guilhem.

Je remercie Monsieur BOURRIE GUILHEM (Directeur de recherche à l'INRA et médaille d'or de l'académie d'agriculture en France) qui m'a dirigé avec gentillesse, pendant mon séjour du stage à l'Institut National de Recherche Agronomique INRA-PACA- de l'unité Géochimie des Sols et des Eaux de l'INRA d'Aix-en-Provence, et qui m'a encadré, notamment, sur le logiciel Phreeqc et pour ses discussions utiles. Ainsi que madame Trolad Fabienne. Je le prie de trouver ici, l'expression de ma profonde reconnaissance. Enfin, mes remerciements vont également au personnel de la station INRA d'Avignon qui m'a bien accueilli et a rendu mon séjour agréable.

Mes Remerciements vont également à monsieur BELHAMERA MOHAMED, professeur à l'université de Mohamed Kheider Biskra pour ses encouragements et précieuses aides.

La préparation d'une thèse nécessite aussi un environnement actif et agréable, pour cela je remercie spécialement mon collègue : Abdelhafid Youcef, pour leurs aides scientifiques et ses discussions utiles.

Je suis très heureuse de travailler avec mes collègues de CRSTRA : Roumani Massoud, Mancer Halima, Benaoune Saliha, et toute l'équipe sol grâce à leurs aides scientifiques, techniques et soutien moral, également, je les remercie.

Enfin, sans eux l'agriculture n'existe plus, pour cela, je tiens à remercier tous les agriculteurs de la région des Ziban notamment M. Laejal Khaled, il est difficile ici de nommer tous ceux qui m'ont apporté une aide efficace dans de nombreuses prospections.

Enfin, mes remerciements vont aussi à tous les amis (es) et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Toute personne qui font une aide soit scientifique, technique ou administrative sache que je le garde une profonde reconnaissance.

J'espère n'avoir oublié personne, merci à tous.

Que tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail soient remerciés.

الملخص

تقدم هذه الرسالة مساهمة لدراسة تأثير نوعية مياه الري على تملح التربة في ثلاث بلدات في المنطقة الزيبان (سيدي عقبة في الشرق برج بن عزوز في الغرب وسهل لوطاية في الشمال).

أساليب القياس المستخدمة هي عبارة عن مجموعة الأدوات مفصلة تضم دراسة ومسح وأخذ عينات من المياه والتربة، والنمذجة من خلال نتائج التحليل الكيميائي والمعالجة الإحصائية. وذلك بعد تقديم البيئة الطبيعية لمنطقة الدراسة، توصيف مياه الري، من أجل تحديد تأثيرها على التربة المروية.

العوامل الفيزيائية والكيميائية التي تم تحديدها هي: EC، ودرجة الحموضة ومحتوى الأيونية، لمحة الكيميائية، SAR وESP التربة والمياه، ومراحل المالحه، مستوى الملح، مؤشر التشبع. التراكيب الكيميائية للمياه المستخدمة في الري تظهر الملوحة العالية مع انخفاض الى ارتفاع في خطر التملح sodicité. أيضا، لديهم اثنين من سحنة في اتجاه التدفق، والكلوريد والكالسيوم والمغنيسيوم في مقدمة المنبع مع وجود اتجاه ليصبح كلوريد الصوديوم والبوتاسيوم في المصب.

رصدت هذه الدراسة تغير كيميائي في التربة بعد ري المحاصيل المزروعة حسب كل منطقة مدروسة ويظهر تغير كبير جدا في جميع المعلومات المقاسة. هذه الدراسة سمحت لنا بتبيان الملوحة العالية للتربة التي تظهر العائق الرئيسي الذي واجهها، وترجع هذا الملوحة العالية إلى الآثار المجتمعة من نوعية مياه الري التي هي مسبقا مالحة، والظروف المناخية الجافة جدا التي تنتج نسبة تبخر عالي تؤدي إلى تركيز محلول التربة وخاصة في ظل غياب و / أو وجود شبكة الصرف ويقترح وجود منطقتين فرعيتين من لمحة التربة الجيوكيميائية من كل منطقة الدراسة، وهي منطقة المنبع ذات طابع كبريتي ومنطقة المصب ذات طابع كلوريدي.

في الأخير أبرزت هذه الدراسة اتجاهات التنمية المختلفة من التربة المروية، وبعضها قد يكون ضارا لتنمية الزراعة الإقليمية؛ مما يترتب على ذلك أن نوعية مياه السقي لها تأثير كبير على تملح الأراضي المروية أساسا تلك التي تروى بمياه الآبار. هذا وفقا لسياقها الطبيعي، وعلى الأرجح إلى نوعية المحاصيل المستخدمة.

كلمات المفتاح: المنطقة الجافة، الزيبان، الماء، التربة، الري، الملوحة، نموذج الحرارة

Résumé

Ce travail de thèse présente une contribution à l'étude de l'impact de la qualité des eaux d'irrigation sur la salinisation des sols dans trois localités de la région des Ziban (Sidi Okba à l'Est, Bordj Ben Azouz à l'Ouest et la plaine d'El-Outaya au Nord).

Les méthodes mises en œuvre vont d'une étude détaillée sur le terrain, enquête et échantillonnage de l'eau et du sol, à la modélisation en passant par les analyses chimiques et le traitement statistique.

Après avoir présenté le contexte naturel de la région d'étude, une caractérisation des eaux d'irrigation a été faite, ceci afin de déterminer leur impact sur les sols irrigués.

Les paramètres physico-chimiques analysés et/ou déterminés sont : la CE, pH, contenu et bilan ionique, faciès chimique, le SAR et l'ESP des eaux et des sols, les phases salines, profil salin, l'indice de saturation.

Les compositions chimiques des eaux utilisées en irrigation font apparaître une salinité élevée avec un faible à fort risque de sodicité. Aussi, elles présentent deux faciès chimiques suivant le sens de l'écoulement, chloruré et sulfaté calcique et magnésienne en amont avec une tendance à devenir chloruré sodique et potassique à l'aval.

Le suivi des changements chimiques des sols après la mise en irrigation des cultures cultivées dans chaque région montre un changement considérable pour tous les paramètres mesurés. Cette étude montre une salinité élevée des sols qui apparaît comme une contrainte majeure au développement des cultures irriguées dans la région d'étude; cette forte salinité est attribuée aux effets conjugués de la qualité de l'eau d'irrigation préalablement salée, aux conditions climatiques très arides produisant une forte évapotranspiration et à l'absence et /ou présence d'un réseau de drainage. Aussi, elle met l'accent sur la distinction de deux sous-zones de faciès géochimique de sols différents dans chaque localité d'étude, une sous-zone en amont à faciès sulfaté et une sous-zone en aval à faciès chloruré.

Enfin, cette étude a permis de mettre en évidence différentes tendances d'évolution des sols irrigués dont certaines peuvent se révéler préjudiciables au développement de l'agriculture régionale. Cependant, il en résulte que la qualité des eaux d'irrigation a un impact non négligeable sur la salinisation des sols irrigués principalement ceux irrigués par les eaux des forages; ceci en fonction de leur contexte naturel et fort probablement du type de cultures utilisées.

Mots clés : Zone aride, Ziban, eau, sol, irrigation, salinité, modèle thermodynamique.

Abstract:

This thesis presents a contribution to the study of the impact of the quality of irrigation water on soil salinization in three localities of the region Ziban (Sidi Okba in the East Bordj Ben Azouz in west and the plain of El-Outaya North).

The methods used range from a detailed field study, survey and sampling of water and soil, modeling through chemical analysis and statistical processing. After presenting the natural environment of the study area, a characterization of irrigation water was made, in order to determine their impact on irrigated soils.

The physicochemical parameters analyzed and / or identified are: EC, pH, ionic content and balance sheet, chemical profile, SAR and ESP of soil and water, saline phases, salt profile, saturation index.

The chemical compositions of the water used in irrigation show high salinity with low to high risk sodicity. Also, they have two facies in the direction of flow, a chloride and calcium and magnesium sulfated upstream with a tendency to become a chloride sodium and potassium downstream.

The monitoring of chemical changes of soil after irrigation layout of crops grown in each region shows a significant change for all measured parameters. This study shows a high soil salinity which appears as a major constraint to the development of irrigated crops in the study area; this high salinity is attributed to the combined effects of water quality of salted beforehand irrigation, very arid climatic conditions producing high evapotranspiration and the absence and / or presence of a drainage system. Also, it emphasizes the distinction between two geochemical facies subzones of different soils in each location of study, a sub-area upstream sulfated facies and sub-zone downstream to chlorinated facies.

Finally, this study highlight different trends of development of irrigated soils some of which may be detrimental to the development of regional agriculture. However, the result is that the quality of irrigation water has a significant impact on salinization of irrigated land mainly those irrigated by water boreholes; this according to their natural context and most likely the type of crops used.

Keywords: Arid Zone, Ziban, water, soil, irrigation, salinity, thermodynamic model.

TABLE DES MATIERES

Dédicaces

Remerciements

Résumé

Abstract

ملخص

sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale et but de l'étude 2

Première partie : Cadre naturel et caractérisation de la région d'étude- les Ziban –

Chapitre I : Situation géographique et Cadre physique 9

I-1- Situation géographique de la Région des Ziban 9
I-2- Aperçus sur la région d'étude 17
Chapitre II : Etude climatique et hydrographique. 22

II-1- Etude du climat des Ziban 24
II-1-1- Aperçu climatique de l'Algérie 24
II-1-2- Station de mesure 24
II-1-3- Analyse climatique 25
II-1-3-1 Précipitations 25
II-1-3-2 Les températures 29
II-1-3-3 Humidité relative de l'air 31
II-1-3-4 Les Vents 33
II-1-3-5 Le régime climatique 33
II-1-3-6- Bilan hydrologique et établissement du bilan hydrique de la région
d'étude 37

II-1-4 Réseau hydrographique 43
II-1-5 Conclusion 46

Chapitre III : Contexte géologique et hydrogéologique 47

Introduction 47
III-1- Géologie régionale et locale 48
III-1-1 Zab Chergui : Contexte Géologique et Hydrogéologique 52
III-1-2 Zab Gharbi: Contexte Géologique et Hydrogéologique 54
III-1-3 La plaine d'El-Outaya 55
III-2- Cadre lithostratigraphique 58
III-2-1 Le Trias 58
III-2-2- Le Lias 59
III-2-3- Le Jurassique 60
III-2-4- Le Crétacé 61
III-2-5- Le Paléogène (Nummulitique) 69
III-2-6- Le Néogène 71
III-2-7- Le Quaternaire 72
III-2-8 Tectonique 73
III-2-9 La Paléogéographie 74

III-3-	Cadre Hydrogéologique - les principales aquifères des Ziban	75
III-3-1-	les formations aquifères à nappe libre, semi libre à semi captive	80
III-3-2-	Les formations aquifères captives	81
III-4-	la répartition spatiale des ressources souterraines en eau destinées à l'irrigation.	82
III-4-1	Réseau de suivi des deux nappes CT et CI dans la région de Biskra-sens d'écoulement	85
III-4-2-	Hydrochimie des eaux de la région de Biskra	88
III-5-	Conclusion	90
Deuxième partie : Méthodologie et Résultats		
Chapitre IV : Matériel et méthodes		
IV- 1-	Présentation de la zone d'étude	92
IV- 2-	L'échantillonnage	92
IV- 2-1-	Phases et chronologie du travail_ Démarche et méthodologie	93
IV-2-2-	Le choix des sites	94
IV-2-3-	Description de chaque région	98
IV-3-	Méthodes d'analyses utilisées	100
IV- 4-	Les méthodes de traitement des données.	
Chapitre V : Modélisation géochimique		
V-1-	Les Modèles Appliqués Aux Sols Sales	104
V-1-1-	La conception des modèles appliqués aux sols salés	104
V-1- 2-	La modélisation de l'évolution de la solution du sol	105
V-1-3-	Approche Thermodynamique des paramètres physico-chimiques.	106
V-1-4-	Application du Logiciel/ Argument géochimique	106
V-1-5-	Pratique	106
V-2-	Conclusion	113
Chapitre VI : Evaluation et Modélisation Géochimiques de la Qualité des Eaux Souterraines et de Surface Utilisées pour L'irrigation des Terres Agricoles dans une Région Aride : Cas de la Région de Ziban		
	Introduction et état de l'art	114
VI-	Caractérisation et qualité des eaux d'irrigation	119
VI-1-	Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation de la région de Sidi Okba ; Zab Chergui	119
VI-1-1-	Ressource en surface : Le barrage « Foum-El-Gherza»	120
VI-1-2-	Ressource en eau souterraine : les forages	121
VI-1-2-1-	Hydrogéochimie	123
VI-1-2-2	Faciès chimiques des eaux d'irrigation	126
VI-1-2-3	Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux.	127
VI-1-2-4	Discussion, aptitude des eaux à l'irrigation	128
VI-1-2-5-	Conclusion	131
VI-2-	Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation de la région BBA ; Zab Gharbi	132
VI-2-1-	Evaluation de la qualité des eaux de la nappe phréatique captée par des puits.	133
VI-2-1-1	Faciès chimique des eaux de la nappe phréatique utilisées en irrigation.	135
V-2-1-2-	Etude de la qualité des eaux des puits (salinité et sodicité)	137
VI-2-1-3-	Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux des puits utilisés en irrigation de la région de BBA.	140
VI-2-1-4-	Conclusion	142
VI-2-2-	Evaluation de la qualité des eaux des forages	143
VI-2-2- 1-	La qualité exprimée par La salinité et la sodicité de ces eaux : Hydrogéoc	143
VI-2-2- 2-	Faciès chimique	147
VI-2-2- 3-	Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les	148

	eaux de la nappe de Tolga	
VI-2- 3-	Evaluation de la qualité des eaux du drainage	149
VI-2- 3- 1-	Hydrogéochimie et faciès chimique	150
VI-2- 3-2-	Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux de drainage	154
VI-2-5-	Conclusion	159
VI-3-	Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation de la plaine d'El-Outaya	161
VI-3-1-	Caractérisation et la qualité des eaux d'irrigation de la plaine	162
VI-3-1-1-	Eau de surface : Le barrage « fontaine des gazelles »	162
VI-3-1-1-1-	Etude de la qualité physico-chimique des eaux de surface	162
V-3-1-1-2-	Evolution du faciès chimiques de l'eau du barrage « Fontaine des gazelles »	164
VI-3-1-1-3-	Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux de barrage « Fontaine des gazelles »	165
VI-3-1-2	Etude de la qualité des eaux des forages (l'eau souterraine) utilisés en irrigation agricole dans la plaine d'El-Outaya	166
VI-3-1-2 -1	Hydrochimie	167
VI-3-1-2 -2-	Etude du Faciès chimique des eaux souterraines	170
VI-3-1-2 -3-	Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux des forages de la plaine d'El-Outaya	170
VI-3-1-2 -4-	Discussion, aptitude des eaux à l'irrigation	172
VI-4-	Conclusion ; Etude et Comparaison globale entres les différentes eaux.	175
	TROISIEME PARTIE : Evaluation et Modélisation Géochimiques du Changement de la Qualité des Sols sous Irrigation dans une Région Aride : Cas de la Région de Ziban	179
	Chapitre VII : Synthèse sur la caractérisation des ressources en sol de la région d'étude	177
VII-1	Classifications des sols salés	181
VII-2	Paramètres de caractérisation des sols salés	182
VII-3	Les enjeux de la salinisation des sols	188
VII-4	Interaction sol- eau d'irrigation : salinisation secondaire	189
VII-5-	Les solutions de la salinisation	192
VII-6-	Aperçus sur les sols de l'Algérie	193
VII-7-	Conclusion	202
	Chapitre VIII : Caractérisation et qualité des sols soumis à l'irrigation	204
VIII-1-	Sol de la région de Sidi Okba	208
VIII-1- 1-	Résultats et discussion : caractérisation et qualité des sols sous irrigation	210
VIII-2-	Sol de la région de Bordj Ben Azouz -Zab Gharbi ; nappe des calcaires	265
VIII-2- 1-	Résultats et discussion : caractérisation et qualité des sols sous irrigation	268
VIII-3-	Evaluation de la qualité des sols de la plaine d'El-Outaya	299
VIII-3- 1-	Résultats et discussion : caractérisation et qualité des sols sous irrigation	303
	Synthèse Globale	334
	Conclusion générale et perspectives	357
	Références bibliographiques	365
	Annexes	380

Liste des figures

Fig1	Situation géographique de la Wilaya de Biskra	17
Fig2	Situation géographique de la zone d'étude Zab Chergui (Sidi Okba).	18

Fig3	Situation géographique de la zone d'étude Zab Gharbi (Bordj Ben Azouz).	19
Fig4	Situation géographique de la plaine d'El-Outaya (commune et plaine) (a) et Les principales unités morphologiques de la région d'El Outaya(b).	20-21
Fig5	Carte de répartition de la pluviométrie, région de Biskra (Extrait de la carte pluviométrie de l'Algérie au 1/500.000, 1971).	23
Fig6	Extrait de la carte pluviométrique annuelle du Nord d'Algérie. Période septembre 1965- août 2002(ANRH - G.T.Z, mars 2003)	25
Fig7	Variation des précipitations moyenne mensuelle, Station de Biskra. (1967 - 2012).	26
Fig8	Variation des précipitations moyenne saisonnières, Station Biskra (1967 / 2012).	27
Fig9	Variation interannuelle des précipitations, Station Biskra. (1967 / 2012).	28
Fig10	Variation des Températures moyenne mensuelle, Station Biskra. (1967 / 2012).	30
Fig11	Diagramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls	31
Fig12	Humidités relatives moyennes enregistrées à la station de Biskra Période (1996-2005)	32
Fig13	Vitesses moyennes des vents enregistrées à la station de Biskra Période (1996-2005).	33
Fig14	Abaque de l'Indice climatique de D. Martone 1923.	35
Fig15	Climagramme d'Emberger de la station de Biskra (1967-2012).	36
Fig16	Le réseau hydrographique du sous bassin 0614	45
Fig17	Carte hydrographique d'El-Outaya	45
Fig18	Carte géologique de Biskra. (Échelle : 1/200.000)	50
Fig19	Carte géologique simplifiée de la région de Biskra (Chebbah, 2007).	51
Fig20	Esquisse géologique de la wilaya de Biskra.	52
Fig21	Carte géologique simplifiée du bassin des Chotts (Chebbah et al. 2012).	54
Fig. 22a	Diapir de sel d'El-Outaya	56
Fig.22b	Coupe hydrogéologique schématique des différents domaines dans la région de Biskra (d'après GUIRAUD. R, 1973).	57
Fig23	Tracé de l'accident sud atlasique au Sud du Hodna (d'après Guiraud 1990)	58
Fig24	Esquisse structural simplifié	74
Fig25	Le château d'eau souterrain du Sahara algérien. (Dubost, 2002).	77
Fig26	Prélèvements par forages dans le SASS (1970 – 2000).	78
Fig27	Coupes hydrogéologique schématique de la région de Biskra. (Extrait de la carte hydrogéologique de BISKRA 1/200.000).	82
Fig28	Répartition des points d'eau par daïra et par zone (ANRH-2008).	83
Fig29	Répartition des points d'eaux dans la région de Biskra (ANRH).	85
Fig30	Carte d'inventaire des piézomètres implantés dans la région de Biskra (Novembre 2009, CRSTRA, 2010).	86
Fig31	Carte piézométrique de la nappe de Miopliocène de la région de Biskra (Novembre 2009, CRSTRA, 2010).	86
Fig32	Carte piézométrique de la nappe de l'Eocène inférieur de la région de Biskra (Novembre 2009, CRSTRA, 2010).	87
Fig33	Hydrochimie des eaux souterraines de la région de Biskra (ANRH, 2011).	89
Fig34	Situation géographique de la zone d'étude.	94
Fig35	Schématisation de la procédure du travail par Phreeqc version.3.1.4-8929.	107
Fig36-a	Diagramme d'équilibre de la calcite (modèle Phreeqc) des eaux souterraines de sidi Okba. Calcite : log K= -8.45.	110

Fig36-b	Diagramme d'équilibre de la calcite (modèle Pitzer) des eaux souterraines de sidi Okba. Calcite : $\log K = -8.38$.	110
Fig36-c	Diagramme d'équilibre de la calcite (modèle SIT) des eaux souterraines de sidi Okba. Calcite : $\log K = -8.45$.	111
Fig37-a	Diagramme d'équilibre du gypse (modèle Phreeqc) des eaux souterraines de sidi Okba. Gypse : $\log K = -4.58$	112
Fig37-b	Diagramme d'équilibre du gypse (modèle Pitzer) des eaux souterraines de sidi Okba. Gypse : $\log K = -4.58$	112
Fig37-c	Diagramme d'équilibre du gypse (modèle SIT) des eaux souterraines de sidi Okba. Gypse : $\log K = -4.61$	123
Fig38	Situation géographique du barrage de Foum-el-Gherza Biskra, Algérie (Toumi et Remini., 2004).	120
Fig39	positionnement des points d'eau dans la zone d'étude : Sidi Okba.	122
Fig40	Carte de la salinité (CE mS/cm) des eaux des forages de la zone d'étude.	125
Fig41	Carte piézométrique de la nappe du Miopliocène de Biskra (Messameh et al, 2009).	126
Fig42	Diagramme de Piper des eaux d'irrigation.	127
Fig43	Représentation graphique du rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$	127
Fig44	Diagramme de Riverside des eaux d'irrigation de Sidi Okba selon Manuel pour Diagrammes (Smiler, 2013).	130
Fig45	Carte du SAR des eaux d'irrigation, campagne 2014.	130
Fig46	Diagramme de Piper des eaux des puits de la nappe phréatique de BBA utilisées en irrigation des palmeraies. (Simler, 2013).	136
Fig47	Représentation graphique du rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ des eaux des puits utilisés en irrigation à BBA	136
Fig48	Diagramme de Riverside exprime la salinité et sodicité des eaux des puits de la nappe phréatique de BBA utilisées en irrigation des palmeraies. (Simler, 2013).	140
Fig49	Carte de la conductivité électrique (CE) en dS/m des eaux des puits de la nappe phréatique de BBA utilisées en irrigation des palmeraies.	140
Fig50	Diagramme de Riverside exprime la salinité et sodicité des eaux des forages de la nappe des calcaires de BBA utilisées en irrigation des palmeraies. (Simler, 2013).	147
Fig51	Diagramme de Wilcox exprime la sollicité des eaux des forages de la nappe des calcaires de BBA utilisées en irrigation des palmeraies. (Simler, 2013).	147
Fig52	Représentation graphique du rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$	148
Fig53	Diagramme de Piper des eaux des forages de la nappe des calcaires de BBA utilisées en irrigation des palmeraies. (Simler, 2013).	148
Fig54	Diagramme de Riverside des eaux des drainages des palmeraies de BBA. (Simler, 2013).	150
Fig55	Représentation graphiques du rapport $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ des eaux des drains.	151
Fig56	Diagramme de Piper des eaux des drainages des palmeraies de BBA. (Simler, 2013).	151
Fig57	Diagramme de Wilcox des eaux des drainages des palmeraies de BBA. (Simler, 2013).	154
Fig58	Carte de positionnement (a) et Diagramme de classification (b) des différents points d'eau (forages, puits et drains) de la région BBA..	160
Fig59	Diagramme de Riverside des eaux d'irrigation de barrage « Fontaine des Gazelles » selon Manuel pour Diagrammes (Smiler, 2013).	163
Fig60	Diagramme du Piper de l'évolution du faciès chimique de l'eau du barrage « Fontaine des Gazelles » durant 7 ans.	165
Fig61	Diagramme de classification des eaux des forages utilisées en irrigation (Riverside USSSL, 1954 effectuée par le logiciel Diagrammes version free, Smiler, 2013).	169
Fig62	Carte de salinité (CE dS/m) des eaux des forages utilisées en irrigation des sols de la plaine d'El-Outaya.	169

Fig63	Représentation graphique du rapport Cl^-/SO_4^{2-}	170
Fig64	Diagramme de Piper représentant du faciès chimique des eaux des forages de la nappe Miopliocene utilisées en irrigation de la plaine d'El-Outaya.	170
Fig65*	Profil salin de type D selon Servant (1978) du sol non irrigué du Garta.	212
Fig65	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la première exploitation_ Garta ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-60cm) et horizon 3(H3N 60-80cm).	213
Fig66	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la première exploitation_ Garta ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-60cm) et horizon 3(H3N 60-80cm).	213
Fig67	Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol sous irrigation du Garta.	216
Fig68	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués de la première exploitation_ Garta ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm), horizon 3(H3N 40-60cm) et horizon 4 (60-80cm).	217
Fig69	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la première exploitation_ Garta ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm), horizon 3(H3N 40-60cm) et horizon 4 (60-80cm).	217
Fig70	Profil salin de type D selon Servant (1978) du sol non irrigué du Feïdh el ghareg- elkfouf, Sidi-Okba.	221
Fig71	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la deuxième exploitation_ Faïdh elghareg ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-75cm) et horizon 3(H3N 75-140cm).	221
Fig72	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la deuxième exploitation_ Faïdh elghareg ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-75cm) et horizon 3(H3N 75-140cm).	222
Fig73	Profil salin de type B selon Servant (1978) du sol irrigué du Feïdh el ghareg- elkfouf, Sidi-Okba.	224
Fig74	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en orge de la deuxième exploitation_ Faïdh elghareg ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm).	225
Fig75	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en orge de la deuxième exploitation_ Faïdh elghareg ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm).	225
Fig76	Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol non irrigué du Tajdid, Sidi-Okba	229
Fig77	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, cultivés en palmier dattier de la troisième exploitation_ Tajdid ; horizon1 (H1N 0-30 cm), horizon 2 (H2N 30-70cm), horizon 3(H3N 70-100cm) et horizon 4(H4N 100-140 cm).	229
Fig78	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, cultivés en palmier dattier de la troisième exploitation_ Tajdid ; horizon1 (H1N 0-30 cm), horizon 2 (H2N 30-70cm), horizon 3(H3N 70-100cm) et horizon 4(H4N 100-140 cm).	230
Fig79	Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol irrigué du Tajdid, Sidi-Okba.	233
Fig80	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en palmier dattier de la troisième exploitation_ Tajdid ; horizon1 (H1N 0-40 cm), horizon 2 (H2N 40-80cm), horizon 3(H3N 80-100cm) et horizon 4(H4N 100-140 cm).	234
Fig81	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits	234

	aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en palmier dattier de la troisième exploitation_ Tajdid ; horizon1 (H1N 0-40 cm), horizon 2 (H2N 40-80cm), horizon 3(H3N 80-100cm) et horizon 4(H4N 100-140 cm).	
Fig82	Profil salin de type B selon Servant (1978) du sol non irrigué du Mangae Bougtaf, Sidi-Okba.	239
Fig83	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, cultivés en palmier dattier de la quatrième exploitation_ Mangae Bougtaff ; horizon1 (H1N 0-30 cm), horizon 2 (H2N 30-60cm) et horizon 3(H3N 60-90cm).	239
Fig84	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, cultivés en palmier dattier de la quatrième exploitation_ Mangae Bougtaff ; horizon1 (H1N 0-30 cm), horizon 2 (H2N 30-60cm) et horizon 3(H3N 60-90cm).	240
Fig85	Profil salin de type C selon Servant (1978) du sol irrigué du Mangae Bougtaf, Sidi-Okba.	242
Fig86	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en palmier dattier de la quatrième exploitation_ Mangae Bougtaff ; horizon1 (H1N 0-30 cm), horizon 2 (H2N 30-60cm) et horizon 3(H3N 60-90cm).	242
Fig87	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en palmier dattier de la quatrième exploitation_ Mangae Bougtaff ; horizon1 (H1N 0-30 cm), horizon 2 (H2N 30-60cm) et horizon 3(H3N 60-90cm).	243
Fig88	Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol non irrigué du Safel Tajdid, Sidi-Okba.	246
Fig89	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, non cultivés de la cinquième exploitation_ Safel Tajdid ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm), horizon 3(H3N 40-60cm) et horizon 4(H4N 60-100 cm).	246
Fig90	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, non cultivés de la cinquième exploitation_ Safel Tajdid ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm), horizon 3(H3N 40-60cm) et horizon 4(H4N 60-100 cm).	246
Fig91	Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol irrigué du Safel Tajdid, Sidi-Okba.	249
Fig92	Représentation sur le diagramme de Piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en palmier dattier de la cinquième exploitation_ Safel Tajdid ; horizon1 (H1N 0-60 cm), horizon 2 (H2N 60-90cm) et l'horizon 3(H3N 90-140cm).	249
Fig93	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en palmier dattier de la cinquième exploitation_ Safel Tajdid ; horizon1 (H1N 0-60 cm), horizon 2 (H2N 60-90cm) et l'horizon 3(H3N 90-140cm).	249
Fig94	Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol non irrigué limite Safel Tajdid -Haouche, Sidi-Okba.	252
Fig95	Représentation sur le diagramme de Piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, non cultivés de la sixième exploitation_ Safel Tajdid-limite Haouche ; horizon1 (H1N 0-15 cm), horizon 2 (H2N 15-60cm) et l'horizon 3(H3N 60-100cm).	252
Fig96	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, non cultivés de la sixième exploitation_ Safel Tajdid-limite Haouche ; horizon1 (H1N 0-15 cm), horizon 2 (H2N 15-60cm) et l'horizon 3(H3N 60-100cm).	252
Fig97	Profil salin de type B selon Servant (1978) du sol irrigué limite Safel Tajdid -Haouche, Sidi-Okba.	255
Fig98a	Représentation sur le diagramme de Piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en orge de la sixième exploitation_ Safel Tajdid-limite Haouche ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et l'horizon 3(H3N 40-60cm).	255
Fig98b	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en orge de la sixième	255

	exploitation_ Safel Tajdid-limite Haouche ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et l'horizon 3(H3N 40-60cm).	
Fig. 99	Carte de positionnement des profils du sol sur la carte de salinité (CE dS/m) des eaux des forages de la région de Sidi okba.	264
Fig100	Profil salin de type B selon Servant (1978) du sol non irrigué de Bordj ben Azouz.	273
Fig101	Représentation sur le diagramme de piper des solutions du sol non irrigués, cultivés en palmier dattier de la ferme Paul Ozval-BBA de cinq horizon ; horizon1 (H1N 0-24 cm), horizon 2 (H2N 24-73cm), horizon 3(H3N 73-130cm), horizon 4 (H4N 130-210cm) et horizon 5 (H5N >210 cm).	274
Fig102	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions du sol non irrigués, cultivés en palmier dattier de la ferme Paul Ozval-BBA de cinq horizon ; horizon1 (H1N 0-24 cm), horizon 2 (H2N 24-73cm), horizon 3(H3N 73-130cm), horizon 4 (H4N 130-210cm) et horizon 5 (H5N >210 cm).	277
Fig103	Profil salin de type B selon Servant (1978) du sol irrigué de Bordj ben Azouz.	278
Fig104	Représentation sur le diagramme de piper des solutions du sol irrigués, cultivés en palmier dattier de la ferme Paul Ozval-BBA.	278
Fig105	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions du sol irrigué, cultivés en palmier dattier de la ferme Paul Ozval-BBA.	284
Fig106	Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol non irrigué près du réseau du drainage de Chmora de Bordj ben Azouz.	282
Fig107	Représentation sur le diagramme de piper des solutions du sol non irrigués, non cultivés en palmier dattier du sol près du réseau du drainage de Chmora-BBA.	282
Fig108	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions du sol non irrigués, non cultivés en palmier dattier du sol près du réseau du drainage de Chmora-BBA.	282
Fig109	Profil salin de type D selon Servant (1978) du sol irrigué près du réseau du drainage de Chmora de Bordj ben Azouz.	286
Fig110	Représentation sur le diagramme de Piper des solutions du sol irrigués P2, cultivés en palmier dattier du sol près du réseau du drainage de Chmora-BBA.	286
Fig111	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions du sol irrigués P2, cultivés en palmier dattier du sol près du réseau du drainage de Chmora-BBA.	286
Fig112	Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol de la zone de dépression(Ezarga) de Bordj ben Azouz.	289
Fig113a	Représentation sur le diagramme de Piper des solutions du sol Ezarga-BBA.	290
Fig113b	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions du sol Ezarga-BBA.	290
Fig.114	Carte de positionnement des profils du sol à l'intérieur de l'oasis de BBA (palmeraie ozval(P3) et Laejal (P1et P2)) sur la carte de salinité (CE dS/m) des eaux des puits (la nappe phréatique).	298
Fig115-a	Représentation graphique de la Répartition de la superficie des classes du sol de la plaine d'El Outaya ; D'après Lezzar, 1980).	299
Fig115-b	Carte de la lithologie (b1) et des sols (b2) de la plaine d'El-Outaya (Source : Abdelhafid, 2011 ; d'après Carte hydrogéologique ANRH, 1980 et Lezzar, 1980 respectivement).	300
Fig115-c	Triangle texturale du sol de la région d'El Outaya. (in Benaouda et al, 2008).	301
Fig116	Diagrammes de Piper de la solution du sol de la plaine d'El Outaya.	302
Fig117	Profil salin de Type B de sol non irrigué de la station bio ressource El-Outaya.	305
Fig118	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la de la station bio ressource El-	305

	Outaya; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60 cm).	
Fig119	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la de la station bio ressource El-Outaya; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60 cm).	305
Fig120	Profil salin de Type B de sol irrigué de la station bio ressource El-Outaya.	308
Fig121	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués de la de la station bio ressource El-Outaya; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60 cm).	308
Fig122	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués de la de la station bio ressource El-Outaya; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60 cm).	308
Fig123	Profil salin de Type D de sol non irrigué de la première exploitation(Exp01	311
Fig124	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la première exploitation ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon3 (H3N 40-60 cm).	311
Fig125	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la première exploitation ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon3 (H3N 40-60 cm).	311
Fig126	Profil salin de Type D de sol irrigué de la première exploitation(Exp01).	315
Fig127	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués de la première exploitation ; horizon1 (H1I 0-20 cm), horizon 2 (H2I 20-40cm) et H3I(40-60cm).	316
Fig128	Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués de la première exploitation ; horizon1 (H1I 0-20 cm), horizon 2 (H2I 20-40cm) et H3I (40-60cm).	316
Fig129	Profil salin de Type A du sol non irrigué de la deuxième exploitation El-Outaya.	319
Fig130	Représentation sur le diagramme de Piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la deuxième exploitation ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60 cm).	319
Fig131	Représentation sur le diagramme de Piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la deuxième exploitation ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60 cm).	319
Fig132	Profil salin de Type B du sol irrigué de la deuxième exploitation El-Outaya.	322
Fig133a	Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués de la deuxième exploitation ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60cm).	323
Fig133b	Représentation sur le diagramme de Riverside de la salinité et sodicité des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués de la deuxième exploitation ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60cm).	323
Fig.134	Carte de positionnement des sondages du sol des deux exploitations (01 et 02) irriguées par les eaux de forage (F5(01) et F8(02)) mentionnées sur la carte de salinité des eaux d'irrigation de la nappe de Miopliocène.	325

Liste des Tableaux

Tableau 01	La superficie irriguée/mode d'irrigation dans la région de Sidi-Okba	18
Tableau 02	La superficie irriguée/mode d'irrigation dans la région de Bordj Ben Azouz	19
Tableau 03	Cordonnées de station météorologique de Biskra (ANRH)	24
Tableau 04	Précipitations moyennes Mensuelles en mm, (Station Biskra)	26
Tableau 05	Répartition saisonnière des précipitations, (Station Biskra)	26
Tableau 06	Variation interannuelle des précipitations, (Station Biskra)	28
Tableau 07	Température moyenne mensuelle, (Station Biskra)	29
Tableau 08	Températures et précipitations moyennes mensuelles	31
Tableau 09	Humidités relatives moyennes enregistrées à la station de Biskra Période (1996-2005).	32
Tableau 10	Vitesses moyennes des vents enregistrées à la station de Biskra Période (1996-2005)	33
Tableau 11	Détermination de régime climatique par la méthode d'Euverte (Station de Biskra). (1967-2012).	34
Tableau 12	Type de climat selon de D.Marton.	35
Tableau 13	Indice d'aridité de Martonne	35
Tableau 14	La valeur du Q ₃ .	36
Tableau 15	ETP moyennes mensuelles et annuelles station de Biskra, Période (1967-2012).selon Serra.	38
Tableau 16	ETP moyennes mensuelles et annuelles station de Biskra, Période (1967-2012).selon Serra	39
Tableau 17	Bilan hydrique de Thornthwaite de station de Biskra, période (1967-2012)	42
Tableau 18	Principaux oueds qui franchissent les Ziban	44
Tableau 19	Différentes complexes lithos stratigraphiques et leurs substances utiles (O.R.G.M, 1998)	49
Tableau 20	Caractéristiques par Daïras, des nappes captées à travers la wilaya	84
Tableau 21	les principales unités lithostratigraphiques de la wilaya de Biskra	90
Tableau 22	Importance de l'irrigation gravitaire dans la région de Sidi-Okba	94
Tableau 23	Importance de l'irrigation gravitaire dans la région de Bordj Ben Azouz	96
Tableau 24	Tableau récapitulatif des différentes méthodes d'analyses utilisées dans notre étude.	99
Tableau 25	Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc) des eaux souterraines (forages) de la nappe Mio pliocène de la localité de Sidi Okba.	108
Tableau 26	Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation (Durand, 1958).	117
Tableau 27	Les paramètres statistiques des eaux analysées	124
Tableau 28	Matrice de Corrélation (Pearson) des différents paramètres de la qualité chimique des eaux d'irrigation utilisées dans la région de Sidi-Okba.	124
Tableau 29	Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013)) des eaux de forages de Sidi Okba.	128
Tableau 30	Les paramètres statistiques mesurés des eaux de la nappe phréatique (puits)	137
Tableau 31	matrice de corrélation des paramètres mesurés	138
Tableau 32	Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013)) des eaux de puits de BBA.	140
Tableau 33	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans les eaux des puits sollicités en irrigation.	141
Tableau 34	Les paramètres statistiques mesurés des eaux des forages	144
Tableau 35	Matrice de Corrélation (Pearson) des différents paramètres mesurés	145
Tableau 36	Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013)) des forages de BBA.	149
Tableau 37	Analyse statistique de l'Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013)) des eaux de forages de BBA.	149

Tableau 38	Les paramètres statistiques mesurés des eaux des drains	151
Tableau 39	Matrice de corrélation des différents paramètres mesurés des eaux des drains de BBA	152
Tableau 40	Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013) des eaux des drains étudiés de BBA.	155
Tableau 41	Analyse statistique de l'Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013)) des eaux des drains étudiés de BBA.	155
Tableau 42	Composition moyenne des différentes eaux de la région de BBA	156
Tableau 43	Composition moyenne d'IS des différentes eaux	156
Tableau 44	Evolution de l'analyse du bilan ionique des eaux d'irrigation du barrage « Fontaine des Gazelles ».	163
Tableau 45	Rapport Cl^-/SO_4^{2-} montrant l'évolution de la nature de la salinisation.	164
Tableau 46	Evolution de l'indice de saturation IS des minéraux présents dans l'eau du barrage « Fontaine des gazelles » durant 7 ans.	165
Tableau 47	Les paramètres statistiques mesurés des eaux des forages de la plaine d'El-Outaya.	168
Tableau 48	Matrice de corrélation des forages el-Outaya.	169
Tableau 49	Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013)) des eaux de forages de la plaine d'El-Outaya.	171
Tableau 50	Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013)) des eaux de forages de la plaine d'El-Outaya.	172
Tableau 51	Tableau d'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée à 25°C (USSL, 1954).	184
Tableau 52	Tableau d'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol saturé 1/5 à 25°C (Aubert, 1986).	185
Tableau 53	Nature de la salinisation selon Cl^-/SO_4^{2-} .	186
Tableau 54	Le développement des superficies irriguées dans le monde depuis 1800(d'après Szabolcs, 1994).	189
Tableau 55	Les grandes catégories de sols salés.	191
Tableau 56	Distribution générale des terres agricoles de la willaya de Biskra de la campagne agricole 2010-2011.	196
Tableau 57	Caractéristiques physico-chimiques du sol P1	211
Tableau 58	Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5) du P1.	211
Tableau 59	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués.	214
Tableau 60	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la première exploitation_ Garta.	214
Tableau 61	Résultats analytiques du sondage P1.	215
Tableau 62	Bilan ionique de suivi de la solution du sol du P1.	215
Tableau 63	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués.	218
Tableau 64	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué de la première exploitation_ Garta.	218
Tableau 65	Les analyses physico-chimiques (P2 ; sol de référence-non irrigué).	219
Tableau 66	Bilan ionique de la solution du sol du profil 2.	220
Tableau 67	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P2.	222
Tableau 68	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la deuxième exploitation_ Faïdh elghareg.	222
Tableau 69	Résultats analytiques de suivi du sondage 2.	223
Tableau 70	Bilan ionique de la solution du sol du P2.	224
Tableau 71	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués du P2.	226
Tableau 72	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la deuxième exploitation_ Faïdh elghareg.	226

Tableau 73	Résultats analytique du profil 3 (sol non irrigué).	227
Tableau 74	Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5) de profil P3.	228
Tableau 75	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P3.	230
Tableau 76	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la troisième exploitation_ Tadjdid	230
Tableau 77	Résultats analytiques du sondage P3.	232
Tableau 78	Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5).	232
Tableau 79	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présent dans dans la solution des sols irrigués du P3.	235
Tableau 80	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la troisième exploitation_ Tadjdid.	235
Tableau 81	Résultats analytiques du sondage P4.	237
Tableau 82	Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5).	238
Tableau 83	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P4.	240
Tableau 84	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la quatrième exploitation_ Mangae Bougtaff.	240
Tableau 85	Résultats analytiques du sondage P4.	241
Tableau 86	Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5).	241
Tableau 87	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués du P4.	243
Tableau 88	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué de la quatrième exploitation_ Mangae Bougtaff.	243
Tableau 89	Résultats analytiques du sondage 5.	245
Tableau 90	Bilan ionique de la solution du sol du profil 5 non irrigué.	245
Tableau 91	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P5.	247
Tableau 92	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la cinquième exploitation_ Safel Tadjdid.	247
Tableau 93	Résultats analytique du sondage P5.	248
Tableau 94	Bilan ionique de la solution du sol P5.	248
Tableau 95	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués du P5.	250
Tableau 96	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué de cinquième exploitation_ Safel-Tajdid.	250
Tableau 97	Résultats analytique du profil P6.	251
Tableau 98	Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5) du profil 06.	251
Tableau 99	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P6.	253
Tableau 100	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la 6 exploitation_ Safel Tadjdid-limite Haouche.	253
Tableau 101	Résultats analytiques du sondage P6 irrigué.	254
Tableau 102	Bilan ionique d'un extrait aqueux (rapport 1/5) de la solution du sol irrigué.	254
Tableau 103	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués du P6.	256
Tableau 104	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué de la sixième exploitation_ Safel Tadjdid-limite Haouche.	256
Tableau 105	Analyses statistiques des différents paramètres mesurés pour les sols non irrigués.	260
Tableau 106	Analyses statistiques des différents paramètres mesurés pour les sols irrigués.	262
Tableau 107	La superficie irriguée dans la région de Bordj Ben Azouz.	266
Tableau 108	Analyse des paramètres physico-chimique du profil 1.	271
Tableau 109	Bilan ionique de la solution du sol du profil pédologique de la palmeraie Ozval (bordj ben Azouz)	271

Tableau 110	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P1 de bordj Ben Azouz.	274
Tableau 111	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué du P1 de bordj Ben Azouz.	275
Tableau 112	Description d'un profil cultural (sous pied de palmier dattier 91 ans).	276
Tableau 113	Résultats analytiques du sondage 1 sol irrigué.	276
Tableau 114	Bilan ionique de la solution aqueux du sol (rapport 1/5).	276
Tableau 115	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P2.	278
Tableau 116	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué de la ferme Paul Ozval_BBA.	279
Tableau 117	Description du profil 2 d'un sol non irrigué.	280
Tableau 118	Résultats analytiques du profil 2 d'un sol non irrigué.	281
Tableau 119	Bilan ionique de la solution aqueux du sol (rapport 1/5).	281
Tableau 120	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P2.	283
Tableau 121	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué P2 de Chmora_BBA.	283
Tableau 122	Description d'un profil cultural (sous pied de palmier dattier apparait sain et sans troubles physiologiques).	284
Tableau 123	Résultats analytiques du profil 2 sol irrigué.	285
Tableau 124	Bilan ionique de la solution aqueux du sol (rapport 1/5).	285
Tableau 125	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués du P2.	287
Tableau 126	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué P2 de Chmora_BBA.	287
Tableau 127	Données physico-chimiques de la solution du sol.	288
Tableau 128	Bilan ionique de la solution aqueux du sol (rapport 1/5).	288
Tableau 129	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols de Ezarga.	290
Tableau 130	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol d'Ezarga_BBA.	290
Tableau 131	Analyses statistiques des différents paramètres mesurés pour les sols non irrigués de BBA.	293
Tableau 132	Moyenne de l'IS de tous les sols non irrigués.	294
Tableau 133	Analyses statistiques des différents paramètres mesurés pour les sols irrigués de BBA.	295
Tableau 134	Indice de saturation(IS) du changement du sol sous irrigation.	296
Tableau 135	Caractéristique physico-chimique du sol non irrigué de la station bio ressource El-Outaya.	303
Tableau 136	Bilan ionique de la solution du sol non irrigué de la station bio ressource El-Outaya.	304
Tableau 137	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués.	306
Tableau 138	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la première exploitation.	306
Tableau 139	Caractéristique physico-chimique du sol non irrigué de la station bio ressource El-Outaya.	307
Tableau 140	Bilan ionique de la solution du sol non irrigué de la station bio ressource El-Outaya.	307
Tableau 141	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués.	309
Tableau 142	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la première exploitation.	309
Tableau 143	Composition physico-chimiques des eaux d'irrigation souterraine utilisées	309

	dans l'irrigation des deux paramètres.	
Tableau 144	Résultats analytiques des moyens des sondages.	310
Tableau 145	Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5)	310
Tableau 146	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués.	312
Tableau 147	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la première exploitation.	312
Tableau 148	Les principales communes à vocation céréalières. (Statistique 2013).	313
Tableau 149	Résultats analytiques des moyens des sondages du sol irrigué.	314
Tableau 150	Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5).	314
Tableau 151	Matrice de corrélation des sols de la première exploitation.	316
Tableau 152	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués.	317
Tableau 153	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué de la première exploitation.	317
Tableau 154	Résultats analytiques des moyens des sondages.	318
Tableau 155	Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5) de moyens des sondages.	318
Tableau 156	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués.	320
Tableau 157	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la deuxième exploitation.	320
Tableau 158	Résultats analytiques des moyens des sondages du sol irrigué.	321
Tableau 159	Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5) de moyen des sondages.	321
Tableau 160	Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués.	323
Tableau 161	Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la première exploitation.	323
Tableau 162	Analyses statistiques des différents paramètres mesurés pour les sols non irrigués et les eaux souterraines.	326
Tableau 163	Moyenne de l'indice de saturation des minéraux présents dans le sol non irrigué	327
Tableau 164	Analyses statistiques des différents paramètres mesurés pour les sols irrigués.	328
Tableau 165	Moyenne de l'indice de saturation des minéraux présents dans le sol irrigué.	329

Liste des Photos

Photo01	Bassin traditionnel d'accumulation des eaux de forages utilisées à l'irrigation des terres agricoles dans la région de sidi Okba. (Auteur, 2014).	131
Photo 02	Puits à ciel ouvert situé à BBA dont l'agriculteur fait l'irrigation. (Auteur, 2014).	142
Photo 03	L'irrigation des palmiers à travers un puits (chagga, tranché ouvert). (Auteur, 2014).	142
Photo04	Drain principal BBA (palmeraie de Laejal) qui collecte les eaux de drainages de Ghadar vers Ezarga. (Auteur, 2014).	158
Photo05	Plante indicatrice des sols limoneux et salés zeita (<i>Limoniastrum guyonianum</i>) dans la région de Sidi- Okba (Safel Tajdid) (Auteur, 2014).	202
Photo 06	Profil 02 de Feidh elghareg Sidi Okba.	219
Photo 07a	Utilisation de la matière organique à l'intérieur de la palmeraie. (Auteur, 2014).	235
Photo 07b	Des travaux importants réalisés par le fellah afin de planter les jeunes palmiers dont le but de briser la couche argileuse et placer le palmier sur la couche sableuse (70-150 cm, selon les profils) dans la région de Sidi-Okba (Tajdid). (Auteur, 2014).	236
Photo 08	Mode d'irrigation par submersion (rigole-ruissellement) des palmeraies de Sidi-Okba (localité Tajdid) ; les palmiers sont connectés entre-eux. (Auteur, 2014).	236
Photo 09	Profil d'un sol à 3 horizons bien distincts dans la région de Sidi-Okba (localité Tajdid). (Auteur, 2014).	237
Photo 10	Profil d'un sol salé sous l'influence de l'irrigation ; l'horizon médian est le plus influencé par le sel. (Auteur, 2014).	265
Photo11	L'état de surface envahie par les sels-sol salin (sol Solontchaks -fech-fech) et les plantes halophytes (tamarix-sueda) d'une palmeraie à l'extrême sud de la région d'étude Sidi okba (safel tajdid-limte haouche). Le sel (sodique en particulier) remonte par ascension capillaire va cristalliser en surface et recouvrir les terres irriguées sous forme souvent des efflorescences blanches en surface. (Auteur, 2014).	265
Photo 12	Palmeraie de Ozval (Bordj ben Azouz) montre la régénération des anciens palmiers dattiers. (Auteur, 2014).	269
Photo13	Profil ou solum de bordj ben Azouz (ferme Paul Ozval). (Prise, CRSTRA, 2014).	270
Photo14	Profil du sol non irrigué à BBA palmeraie de Laejal non encore cultivé. (Auteur, 2014).	280
Photo 15	Pédopaysage d'un sol non cultivé, non irrigué avec ses cortèges floristiques à base des plantes halophytes à BBA (de référence). (Auteur, 2014).	280
Photo 16	L'état de la surface d'une palmeraie à un seul étage ou strate arbre, du palmier dattier à coté du drain principal à BBA (Auteur, 2014).	284
Photo 17	Zzone de dépression où s'accumule les eaux de drainage (écosystème saharien-oasien : Ezarga, bordj ben Azouz). (Auteur, 2014).	288

Liste des Abréviations

ANRH : Agence nationale des ressources hydriques.

BBA : oasis de Bordj Ben Azouz.

C.P.C.S., 1967- Commission de pédologie et de cartographie des sols.

Cv : cheval, unité de mesure de puissance.

DPSB : Direction de programmation et suivi du budget de la wilaya de Biskra.

GCA : Générale des concessions agricoles.

IS : Indice de saturation des minéraux.

HnN : horizon non irrigué.

H irr : horizon irrigué.

PNDA : Plan national du développement agricole.

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement.

FNDA : Fond national du développement agricole.

Kw : kilo watt, unité de mesure de puissance.

O.R.G.M : Office National de la Recherche Géologique et Minière.

SAT : surface agricole totale.

ST : surface totale.

SAU : surface agricole utile.

SDAT : schéma directeur d'aménagement touristique de la wilaya de Biskra.

Introduction générale

Introduction générale et but de l'étude

De par le monde, les régions arides et semi-arides sont marquées par le déficit hydrique de façon quasi permanente ; les précipitations sont rares, irrégulières et mal réparties dans le temps et l'espace. Ce déficit hydrique associé à des évapotranspirations ETP extrêmes fait que le recours à l'irrigation des terres est inévitable. Cette dernière se fait, souvent à l'aide d'eau saumâtre ce qui expose les terres au risque de salinisation secondaire surtout lorsque les techniques d'irrigation sont inadaptées et le drainage déficient. En effet depuis fort longtemps, les civilisations anciennes ont eu recours à l'irrigation en régions arides voir hyperarides qui nous ont légué sur patrimoine référentiel « les oasis ». Toutefois, l'accroissement démographique et son corollaire celui des besoins a conduit à l'extension des surfaces irriguées à travers le monde, ce qui a engendré une dégradation des terres surtout en absence de pratiques agricoles appropriées.

On estime que 6.5 % des terres du globe, soit 9 millions de km², sont déjà affectés par ce phénomène, ce pourcentage passant à 39 % dans les zones arides (Qigou, 1994 in Cheverry et Bourrié, 1998). Ce phénomène de salinisation des sols touche plus d'une centaine de pays où l'homme et le sel survivent ensemble depuis les anciennes civilisations, surtout dans les régions arides et pauvres. (Shabbir et al, 2013) ; l'évapotranspiration y est en effet beaucoup plus forte que les précipitations(pluies) pendant une bonne partie de l'année ; les eaux du sol remontent alors par capillarité et déposent dans leur partie superficielle des sols, sous forme de cristaux, les sels qu'elles contenaient jusque là en solution. (Cheverry et Bourrié, 1998). Mais on peut observer ces phénomènes de salinisation dans tous les continents, dans toutes les ceintures climatiques du globe, y compris à l'intérieur du cercle polaire (Szabolcs, 1994) et à toutes les altitudes, que l'on soit sous le niveau de la mer (région de la Mer Morte) ou à 5000 mètres d'altitude (plateau tibétain). Même un pays de climat tempéré comme la France est concerné. La Camargue et les marais de l'ouest de la France (marais charentais, vendéen, poitevin : 300 000 hectares au total) ont subi l'influence des eaux de mer. Les risques d'une dégradation des sols liée à une salinisation résiduelle y sont réels. (Cheverry et Bourrié, 1998). Sachant que le monde perd au moins trois(3) hectares de terre arable chaque minute à cause de la salinité du sol. Autrement dit, La salinisation des sols constitue une grande menace pour certains sols cultivés dans le monde. (Cheverry et Bourrié, 1998). En Algérie, les sols agricoles sont dans leur forte majorité affectés par la salinité ou susceptible de l'être (Durand, 1958 ; Halitim, 1973 in Daddi Bouhoun et Brinis, 2004).

Donc, les sols productifs est de l'ordre de 6 % des sols de la planète. L'Algérie n'est pas à l'abri de ce risque, seulement 0.2 % des sols sont actuellement productifs. Au Sahara algérien, il ya 400 000 ha des sols irrigués, sur un million ha, seulement 10 % des sols sont productifs, les 90 % restés ne sont pas des sols agricoles. Les ressources en sol agricoles au Sahara sont limitées, ce qui nécessite en urgence une cartographie afin de faire ressortir les sites favorables à la mise en valeur. (Halitim, 2015, communication orale). Sachant que, la stratégie actuelle de l'état algérien est d'augmenter la superficie agricole irriguée à 2 millions d'hectares, ce qui nécessite une attention primordiale aux ressources en eaux et en sols, autrement dit, le milieu nourricier.

En effet, le développement des systèmes d'irrigation a permis la mise en valeur des terres arables en zones arides et semi-arides. C'est ainsi que depuis une cinquantaine d'années, de grands périmètres ont été construits en Algérie pour combler le déficit en eaux des cultures. Cependant, ces pratiques d'irrigation à grande échelle ont modifié le fonctionnement des sols et accru le risque de salinisation. Par ailleurs, la majorité des eaux d'irrigation titrent plus de 2 g/l, ce qui accroît le risque de salinisation de sol. (CRUESI-CRGR, 1970 in Askri et Bouhlila., 2010). En Algérie, les travaux de Boulaine(1957), Durand (1958), Dekkiche (1974), Aubert (1975), Daoud (1983), Halitim (1985) montrent que les sols salés occupent des grandes étendues. Une évaluation sommaire montre que les sols salés occupent 15 %, d'autres estiment plus de 20 % des sols irrigués sont concernés par le problème de salinité (Douaoui et Hartani, 2007), de la surface cartographiée dans différentes régions (essentiellement des plaines alluviales destinées à l'irrigation) et à différentes échelles. (Daoud, 1993). Potentiellement, à l'exception des sols des montagnes du Nord-est, la majeure partie des sols sont susceptibles d'être affectés par la salinisation secondaire. En effet, ces sols sont localisés dans des milieux où les conditions nécessaires à la salinisation sont réunies. (Daoud, 1993). Les sources des sels solubles sont nombreuses et réparties à travers tout le territoire, il s'agit essentiellement de roches gypso-salifères et d'évaporites du Trias, du Miocène, et du Sénonien (Merabet et Povov, 1972 in Daoud, 1993). Par ailleurs, les hauteurs des précipitations sont relativement faibles et ne permettraient qu'un faible drainage climatique souvent insuffisant pour éliminer les sels solubles du profil. Enfin, la texture argileuse prédominante dans les sols des plaines alluviales (Boulaine, 1957), et dans les sols à roche mère marneuse qui présentent une grande extension en Algérie du nord (Durand, 1958), constitue un facteur favorable à la salinisation. (Daoud, 1993).

La salinisation des sols y apparaît aussi comme un indicateur pertinent pour l'évaluation de la performance de ces systèmes irrigués. (Marlet, 2004).

Afin de conclure et d'après Szabolcs 1994, à terme, près de la moitié des surfaces irriguées dans le monde apparaîtraient menacée de salinisation secondaire. (Lahlou et al, 2000). Le degré de salinisation d'une surface irriguée dépend de plusieurs facteurs :

- La qualité de l'eau d'irrigation
- La qualité du sol
- Les conditions climatiques
- Le niveau de la nappe

La mise en valeur des sols salés pose un problème technique dont la solution ne peut être envisagée que par la mise en œuvre de l'irrigation et du drainage. Toutefois, l'utilisation intempestive d'eau d'irrigation salées ou non peut provoquer des salinisations secondaires. (Durand, 1983). L'amélioration de la productivité de chaque hectare déjà cultivé est certes une solution à envisager avec attention. (Cheverry et Robert, 1998).

Comme, la cause principale de cette salinisation est la qualité des eaux d'irrigation utilisées associée aux particularités des sols mis en culture ; notre sujet se propose d'étudier, l'impact de la qualité de ces eaux sur l'évolution de la salinisation des sols dans leur contexte saharien. Il s'agit de la région du Ziban, qui nécessitant une forte dynamique agricole depuis trois décennies au moins. Auparavant, la région est connue par une activité agricole oasienne basée sur la phoeniculture a été choisie comme cas d'étude.

Les régions sahariennes sont situées sous un climat hyper aride, avec de fortes contraintes du point de vue biotique et abiotique surtout édaphique. Dans les zones endoréiques, sans exutoires naturels, représentées essentiellement par les Oasis, les sols sont plus évolués par suite des pratiques d'une agriculture irriguée intensive. Ils sont plus riches en matière organique, en éléments fins et en éléments nutritifs, avec des structures construites, mais sujet à une forte hydromorphie et salinisation limitant leur productivité.

La région des Ziban, **laboratoire ouvert dans la nature**, est caractérisée par une forte potentialité phoenicole avec près de 5 millions palmiers dattiers, et près de 10000 points d'eau (forage, nappes et sources) ainsi que deux barrages irrigant une surface de plus de 100 000 ha sous forme d'Oasis avec généralement une polyculture en étage (palmier dattier, arboriculture et cultures herbacées ou maraichères) ou sous forme de périmètres

irrigués et d'abri-serres plus spécialisés (palmiers dattiers ou céréales ou cultures maraîchères). Toutes ces potentialités constituent un facteur certain de progrès et d'amélioration des conditions de vie des populations locales et de satisfaction alimentaire à l'échelle du pays. Malheureusement cet acquis est menacé par une gestion irrationnelle des facteurs de production et notamment l'eau et le sol entraînant la dégradation du milieu et la baisse de la qualité du sol, remettant en cause le développement durable de ces espaces cultivés. Le défi est donc de caractériser ces derniers, c'est-à-dire de décrire leur contexte topographique et géomorphologique, les systèmes de culture adoptés, les techniques culturales suivies, d'analyser la couverture édaphique et les eaux utilisées pour l'irrigation.

Certes, nous enregistrons une réelle dynamique agricole qui contribue à l'approvisionnement des marchés, à la création d'emploi, mais jusqu'à quand ?

Dans ces régions l'agriculture qui intervient déjà pour 18% de la production agricole nationale, les pouvoirs publics comptent la développer pour atteindre 38%. C'est à dire l'importance du point de vue socio - économique de son développement. L'augmentation de cette production agricole saharienne réside pour l'essentiel dans l'amélioration des écosystèmes existants et dans la mise en valeur de nouveaux périmètres d'une part et la pérennisation de cette agriculture d'autre part afin d'obtenir un développement durable en basant sur la sécurité alimentaire du pays.

Le maintien de l'équilibre des écosystèmes existants aussi bien que la mise en valeur ne peut être atteint que par la maîtrise du continuum eau- sol-plante-climat. Or, les eaux d'irrigation indispensables pour le développement agricole dans ces régions entraînent une évolution des sols et un changement de leur qualité. Parmi les facteurs de cette évolution il ya lieu de citer le contexte topographique des zones irriguées, les techniques d'irrigation et surtout les caractéristiques des sols et des eaux. Dans un tel environnement (milieu très évaporant, endoréisme, sols squelettiques dépourvus de la matière organique), les eaux d'irrigation, quoique de caractéristiques variables selon leur origine (types d'aquifères et eaux de surface) sont de qualité médiocre et influencent fortement la qualité des sols avec des conséquences sur la productivité de l'agriculture et sa durabilité.

Enfin, la salinisation des sols est identifiée comme un processus majeur de la dégradation des terres irriguées conduisant, souvent, à une diminution de la production sur de nombreux périmètres selon la vulnérabilité de leurs sols, particulièrement dans les zones arides et semi-arides qui, dans plusieurs des cas, mettent en cause leur pérennité.

But d'étude

L'objectif principal de cette étude est de suivre les modifications de la composition originelle des sols en sels. Il est question de mesurer et d'analyser les compositions en sels des sols avant et après irrigation et de quantifier leur degré de salinisation en fonction de la composition des eaux utilisées ainsi que leur évolution au cours du temps, cette évaluation est renforcée par la modélisation thermodynamique. Aussi, l'objectif majeur visé par ce travail est:

- une évaluation de l'état des sols soumis à l'irrigation à l'aide d'eau saumâtre à travers différentes localités représentatives. (Surtout 30 ans après la mise en œuvre des différents programmes du développement agricole).

- d'identifier des indicateurs en guise d'outils d'aide à la décision pour la réussite des mises en valeurs en projet et /ou de réhabilitation.

Pour cela notre travail consiste à mettre des hypothèses de l'impact des eaux de l'irrigation sur l'évolution de la qualité des sols de la région des Ziban. Ce qui nécessite l'agencement des différentes tâches comme suit :

Dans une première partie, nous préciserons les principales caractéristiques et d'analyser spatialement quelques indicateurs (géographique, géologique, hydrogéologique, climatique, hydrographique, nature des sols, etc.) de la région d'étude celle du Ziban et par conséquent son contexte naturel. Ce travail qui incluse la caractérisation physique, chimique des différentes localités et stations choisies, entre autres Sidi Okba, Bordj Ben Azouz et la plaine d'El-Outaya, situés dans un contexte différent (texture des sols, origine des eaux d'irrigation, contexte topographique).

La deuxième partie se consacre à l'étude de la qualité des eaux sollicitées en irrigation dans la région d'étude (eaux souterraines et eaux des barrages Fontaine des Gazelles et Fom El Gherza). Elle traite de la composition des eaux de différentes origines utilisées pour l'irrigation (Albien, Miopliocène, nappes superficielles, barrage), et d'analyser leur impact sur quelques indicateurs édaphiques (salinité et phases salines, dynamique de sels ou profils salins, ..). Le principal objectif sera l'identification et/ou la classification de ces eaux à partir d'une étude hydrochimique détaillée en exploitant les données existantes et la réalisation de nouvelles analyses. Vue l'importance de l'irrigation agricole qui est actuellement la plus grosse consommatrice d'eau (75%). (Cheverry et Robert, 1998).

La troisième partie sera consacrée à l'étude de salinité globale des sols cultivés dans la région et soumise en irrigation par ces différentes catégories d'eau. Deux campagnes

d'échantillonnages et d'analyses de sols seront effectuées (une avant irrigation et l'autre après) pour chaque culture et mettant en évidence le rôle des types de cultures sur l'évolution de cette salinisation.

En définitif, il s'agit de l'établissement d'une répartition spatiale des sols dans la région selon leur vulnérabilité à la salinisation en fonction de la chimie des eaux et les cultures utilisées donc une quantification de l'impact qualité des eaux – salinisation des sols dans leur contexte naturel, et ceci dans le but d'aider et de faciliter le choix et la sélection des périmètres cultivables en fonction de la qualité des eaux disponibles et des cultures pour une gestion rationnelle de la ressource hydrique et les terres cultivables dans le cadre d'un développement durable de la région.

Donc l'objectif principale de cette étude est étant de mettre en évidence, notamment les conséquences de la mise en valeur en irrigué sur les changements des indicateurs de la qualité des sols. Ces derniers étant considérés comme un compartiment capitalisant l'impact des transferts des eaux et des solutés et induisant des effets à la fois sur la productivité agricole et sur l'environnement. Le second objectif est de rechercher et d'élaborer des méthodes et des techniques à même d'orienter les modifications de la qualité des sols afin de pouvoir réhabiliter ceux qui sont dégradés. Tout l'enjeu est donc d'augmenter la productivité des sols sans compromettre leur qualité et celle du milieu dans ses dimensions physiques et biologiques.

L'agriculture durable en milieu aride ne peut être possible que si on maîtrise la gestion de l'eau et du sol. Le suivi de l'évolution des sols sous irrigation apparaît indispensable pour garantir une agriculture irriguée rentable et durable dans la région des Ziban.

PREMIERE PARTIE :

Cadre naturel et caractérisation de la région d'étude- les Ziban.

Chapitre I : Situation géographique et cadre physique

I-1- Situation géographique de la Région des Ziban

Cadre géographique

Biskra était la capitale des Ziban et de l'Aurès. Elle se localise à 420 km d'environ de la capitale Alger. Elle s'étend sur une superficie totale de 21 509.8 km² soit 1 % de la superficie globale de notre nation Algérie, et la commune la plus éloignée se trouve à 200 km du chef lieu de la wilaya. (Monographie de Biskra, 2011) .Elle issue du découpage de 1974, Biskra est bordée par 6 wilayas (fig.01) :

- Au Nord par la wilaya de Batna ; reliée par la route nationale n°03
- A l'Est par la wilaya de Khenchela ; menée par la route nationale n° 83
- A l'Ouest par les wilayas de M'Sila et Djelfa ; menée par la route nationale n°46
- Au Sud par les wilayas d'Ouargla et El Oued ; aussi, reliée par la route nationale n°03.

L'immensité de la wilaya de Biskra offre une surface agricole totale(SAT) de **1 652 751 ha** (77 % de ST), dont **185 473 ha** représentent la surface agricole utile SAU (**11 % de SAT**). On enregistre **103990.80 ha (56.07% de la SAU)** des terres irriguées principalement par les eaux souterraines. (Statistique de 2013).

C'est la région charnière entre le Nord et le Sud, elle constitue une des zones les plus franches de transition entre les domaines atlasiques montagneux et plissés du Nord (Algérie méditerranéenne) et les étendues plates et désertiques du Sahara septentrional au Sud (Algérie saharienne). Elle est formée d'un ensemble de bassins et (ou) sous bassins aligné presque parallèlement Nord-sud. (Chebbah, 2007).

Au sud de Biskra, la plaine saharienne se présente comme un piémont sans relief marqué qui relie par une pente douce les chaînons atlasiques aux étendues sahariennes proprement dites. Elle est formée par toute une série de glacis d'érosion modelés par le ruissellement et où se localisent des oasis. (Chebbah, 2007). La région de Biskra dans sa majeure partie est constituée par la grande dépression septentrionale saharienne. Celle-ci est entourée au Nord, Nord-est et au Nord-ouest par les derniers versants de l'Atlas saharien, dont les monts du ZAB dominant la région, d'orientation Sud-ouest et Nord-est. La morphologie de cette région est cependant marquée par trois unités morphologiques : la montagne, le piémont et la plaine. (Aidaoui, 1994).

La région des Ziban se caractérise par une forte potentialité phoenicicole avec près de 5 millions de palmiers dattiers et plus de 9908 points d'eau (forage, puits et sources) inventoriés ainsi que deux barrages irrigant une surface de 103990.80 ha (DSA, 2013) sous forme d'oasis avec une polyculture en étage (palmier dattier, arboriculture et cultures herbacées ou maraîchères) ou sous forme de périmètres irrigués et d'abri-serres plus spécialisés (palmiers dattiers, céréales ou cultures maraîchères).

Encadrée : Portrait de Présentation de l'historique agraire des Ziban.

I-1-1- Signification et Historique des Ziban

Le « Zab » signifie dans la langue arabe : remplir, boire fortement de l'eau ; quand l'homme est entrain de boire, on dit que l'homme boit l'eau quand il a soif ; de ce fait on remarque une relation étroitement liée de Zab avec l'eau. (Masmoudi, 2013). Ziban vient du mot arabe qui signifie ensemble d'oasis, pluriel de Zab. (Belguedj et al, 2008). Le Zab a connue différentes définitions selon la période et l'aire géographique. Mais au moment actuel, le mot Zab signifie la région de Biskra seulement qui est sa capitale administrative et commerciale. (Masmoudi, 2013). Elle était la capitale des Ziban et de l'Aurès,(Vescera) qui fut à la fois une ville Romaine et Numide dans l'Antiquité. Les Byzantins importeront des dattiers pour en faire la culture. Les Berbères Zénètes se sédentarisent et font de Biskra une ville prospère au Moyen Âge. (SDAT, 2012).

C'est grâce au **Okba ibn Nafaâ**, qui avec ses plus de trois cents soldats, libéra l'Afrique du Nord de la Tyramine romaine et y implanta l'Islam, reposant là depuis plus de 14 siècles. (Bouchama, 1984). Après la mort de Okba Ibn Nafaâ Al Fihri et de la Kahina, une nouvelle ère s'annonce sous Tarik ibn Ziyad et Musa ben Nusayr. Biskra devient un relais entre le Sahara et le Nord et des villes telles que Kairouan en Tunisie ou Tlemcen ou Constantine, ou Bougie, ou Fès ou Cordoue en Espagne, etc. Donc, différentes dynasties et empires règneront à Biskra : les Zénètes, les Omeyyades, les Fatimides, les Hammadides, les Hilaliens, les Almohades, les Mérinides, les Zianides, les Hafsides, les Ottomans. (Zekiri, 2016).

La ville de Biskra fut le théâtre de plusieurs batailles, Les Français prendront le contrôle de la ville au XIXe siècle. Pendant la colonisation française, plusieurs groupes et personnes se révoltent dans la ville et dans la région comme les Zaatchas. Au début, l'Émir Abd El-Kader prend tout le Zab. Ensuite, les Zaatchas se révoltent sous Bouziane. Pendant la révolution algérienne, Biskra était intégrée à la Wilaya I et à la Wilaya VI. (SDAT, 2012).

I-1-2- Ziban à l'époque romaine

La route d'Aïn Rich à Ouargla traverse le Bou Kahil par le long défilé d'Aïn Kahla. Ces montagnes forment la berge nord de la mer saharienne et se prolongent à l'est par les monts du Zab. Elles sont précédées d'une mince crête, sorte d'avant-chaîne, que l'oued Tademit traverse près des ksour Messad, Demmed, et el-Hania, et qui dessine jusqu'au djebel Hamara une ligne continue coupée par d'étroits ravins, par lesquels les eaux du Bou Kahil descendent dans l'oued Djedi. Les plus intéressantes de ces vallées sont celles qui viennent d'Amoura et celle de l'oued Namous, route d'Aïn Rich à Ouargla.

Plus à l'est, les montagnes de la chaîne saharienne s'affaissent et se rétrécissent sous le nom de **Monts du Zab**. Le Zab, à l'époque romaine, comprenait, en effet, tout le bassin du Hodna et la région des oasis nord-sahariennes. Sa capitale(Zabi) était près du village de Bechilga, au nord du Hodna. Zab ou Ziban est maintenant plus ordinairement réservé à la région des oasis du sud.

La route de Bou Saâda à Biskra traverse les montagnes par le kheneg Sadouri entre le djebel Kahila et le djebel Aksoun et conduit aux oasis d'el-Amri.

Le chemin de Barika, Mdoukal, el-Amri les traverse par le kheneg Salzou au pied du djebel el-Guelb. C'est un des principaux passages des nomades lors de leurs migrations. Ce passage conduit dans le petit bassin de la **daya de Sildjen** (plaine d'el-Outaya) où se trouvent d'excellentes terres de culture et de fort beaux pâturages. Ce bassin est fermé au sud par une chaîne étroite de montagnes : djebel Matraf, djebel Mendjenaïb, djebel Boughzal, réservoirs naturels des eaux qui arrosent les oasis des Ziban. L'oued Kantara limite à l'est le bassin de la daya de Sildjen et marque le commencement de la région de l'Aurès. (Noix, 1890).

I-1-3- Découpage des Ziban

Selon notre savant Mohamed Bachir Ibrahim (Massmoudi, 2013), aussi le Zab ou **Ziban** est découpé en deux Zab : **Zab Gharbi** et **Zab Chergui** ; le Zab **Gharbi** est divisé en deux parties : Zab **dhahraoui** et l'autre **guebli**, le Zab **dhahraoui** touche les communes de : Bordj Ben Azouz (Sidi Kibalci), Tolga(Farfar, Mazouchia, Dkhila, Kodia Hamra, Labrach, Magsam), Foughala, Lichana(Zeatcha), Bouchagroune(Kodiat Rfis, Oued Mlili, Fej Rih), El-Ghrous(Ameri, Marhoum), Doucen(Khafoura, Khayadha, Berouth,Bordj Doucen Roumani, Drae Souid, Dhrae Rmal, El-Hajeb-Maglouub-(Ain Ben Naoui, Bordj Nos, Ain Karma).

Jusqu'à La Ville d'Ouled Djellal (Chaewa, Difel) Et Sidi Khaled (Saboune, Lehouimel, Arich Hamoula, Nebka), Besbas-Ex-Ouled Harkat-(Bayedh, Oued Yetel, Dandougui, El-Jader, El-Harmik) Raes Elmiead-Ex-Ouled Saci (Ome El-Gred, Elsemara, Benrokhm, Graret Safia), Elchaiba-Ex Ouled Rahma-(Leksayeat, Elsayeda). Le Zab **Guebli** Regroupe Les Communes De Ourlel, Lioua (El-Shaira, El-Bayadha), Mekhadema (Bentyouss), M'lili (Bigou, Emnahla, Zaouia Ben Ouaeir, Zaouia Emohamed), Oumache (Chegga, Zaouia, Dechra)...

Alors que, le **Zab Chergui** se situe à l'est de la ville de Biskra, il occupe : Sidi Okba(Thouda, Seriana, Garta), Ain Naga(Eldhibia, Elmansouria, Elhoraya), El Haouche (Sidi m'Hamed Ben Moussa, Saeda,Rokna, Elkhafej), Chetma(Drou'e, Sidi Khilil), Elfeyedh(Zribet Hamed, Elrouijel, Eloulaja, Elikhoua Harzelli-Tomas-, El- Jaedi), Khenguet Sidi -Naji, Zribet Elouadi(Bades,Leksar,Liana,Enfhidha,Elrakma, Chahboune, Elguatar), M'zira'e(Sidi Masmoudi, Tajmout, Lebghila, Zamoura, Elmoncef, Loulache, Jmina, Rommane), M'chouneche(Baniane, Dissa, Lehbal)...

Au nord de la capital des Ziban, on trouve **El-Outaya** (Manba'e Elghozlane, Sabea Mgate'e, Elfirma), Branis (Ouled Sayd, Loulaj), Jamoura (Guedila, Bani Souik, Salat, Eltaref Mgacem, Ain Dhyab), El-Kantara, Ain Zaetout-Bani Farh-(Mechta Tizi Ouled Othmane, Mechta Ouled Bouha, Mechta Lousata, Mechta Elzaouiaet Kalea Guecha)... Toutes ces localités se trouvent dans le territoire de la wilaya de Biskra. (Masmoudi, 2013).

I-1-4- Description de l'état agraire de Biskra à l'arrivé colonial (en 1844), selon Cataldo(1988) :

a- La ville de Biskra

La principale richesse de Biskra est, comme celle d'autres villes des Ziban, la culture des dattiers. Ils ont aussi un grand nombre d'oliviers, on y récolte des grenades et quelques abricots, mais en petite quantité... on y cultive le poivre rouge en grande abondance. Le henné s'y trouve aussi mais sa culture n'est pas aussi étendue que dans plusieurs autres villes des Ziban. La ville de Droue, entre autres, est une de celles où on récolte le plus. Le blé et l'orge sont aussi un des objets qui attirent le plus l'attention des habitants de Biskra.

Suit la liste des herbes cultivées pour le bétail : nefel, Nouar, sel, khortal, et dénommées collectivement Okedria. Les burnous, haïks, fabriqués avec la laine des troupeaux, sont échangés contre des céréales du tell par l'intermédiaire des Sahahis.

Il ya 7 moulins dans l'intérieur de la ville de Biskra. Ils sont mus par l'eau mais la petitesse des meules en cause (fait) qu'ils ne peuvent moulinier que fort peu de grains chaque jour. Ils appartiennent à des particuliers. Il ya un très grand nombre de Mosquées à Biskra et la plus considérée de toutes est Djemaa El Kebir placée dans la grande éminence de la Casbah.

Les terres sont toutes privées, à l'exception des biens Habou. Au recensement fait sur ordre de Salah Bey il y avait 36000 palmiers mais 28000 seulement subissent l'impôt, 8000 ayant été exemptés du temps de Saleh Bey. Les maisons ont peu de valeur.

L'eau de l'Oued Zerzour va pour trois quart à Biskra et un quart à Filieche. Elle est distribuée par quatre embranchements qui vont à benni Morra, Gaddecha et Bab el Khoukha, El M'Cid, Bab el Chaleq et Bab el Dharb. La quantité d'eau est mesurée par Ouqza. Il en arrive 35.5 qui sont répartis ainsi : Benni Morra : 4.2- Gueddacha et bab el Khoukha 12- El M'Cid 6.5- Bab El Chaleq et Bab el Dharb : 13. Le prix d'une Ouqza est de 200 bassetas (pesetas) soit 500 Francs.

b- El-Outaya

Petite palmeraie de 947 habitants, dans l'immense plaine qui va de l'Aurès au Djebel Ksoum et du Djebel Modiane aux Mons du Zab. Zone de pâture et de céréales, véritable chaudron d'été, les cultures sont irriguées, en grande partie, par les crues (Ferme Dufourg, par exemple). Dans sa partie occidentale, on y trouve au nord le bled Mazouchia, où l'on débouche, en venant de Doucen, par le col de Naam, entre les Djebel Ksoum et arroussine, le bled Mader, et, au Sud, le bled Selga au sortir du Col de Khnizzen, en venant de Tolga, entre les Djebels Oum denib et Koudiat el Kheïri. Ces trois secteurs étaient des zones de parcours en même temps que le passage des troupeaux partant en achaba. Les oueds descendus de la montagne, oued Naam, oued salsou, oued sergue, etc. ... viennent s'y perdre, simples collecteurs d'eau de pluie. A mi-chemin de Tolga et El-Outaya, Bir Labrach est un point important pour les troupeaux en transhumance. En 1960, des puits avaient été forés dans le bled Selga qui devait permettre d'établir des cultures permanentes. (Cataldo, 1988).

c- Le Zab Gharbi

Le Zab Dahraoui est un plateau à l'ouest de Biskra qui est abondamment arrosé par des sources artésiennes ayant souvent un gros débit, des puits de pompage, le plus souvent sous forme de tranchée(chegga) qui récupèrent les eaux perdues des sources et, enfin, par des puits artésiens jaillissants. Le premier de ces derniers a été foré par la Cie de Biskra et de l'oued-Rhir à Foughala en 1888. Certains de ces puits avaient un gros débit comme, à Tolga, l'Ain

Torcha (12000l/minute) tombés à 4500l/minute, par suite de la construction défectueuse du forage, le puits de Saad ben Tabbi en 1913 (30 000 l/minute) et celui de Buchère à 10000l/minute. (Cataldo, 1988).

En 1934, à Foughala, au domaine Ozval, l'Aïn Suzy jaillit à 3600 l/minute. sur ce puits, après de nombreuses études par la Sté Neypric de Grenoble, est installé en 1936 un groupe électrogène à turbine tourbillon de 3 CV6 couplée à une génératrice compound donnant 17 AS sous 115 volts(continu) soit 2 KW, suffisants pour alimenter l'exploitation en électricité domestique. C'est le premier du genre qui sera ensuite copié par un tunisien qui s'en attribuera la paternité. Ce puits était couramment appelé par les ouvriers de la palmeraie Aïn Tricité. (Cataldo, 1988).

Le Zab Dhahraoui est certainement la partie la plus riche des Ziban. C'est là que l'on trouve le plus gros pourcentage de belles palmeraies, avec des dattes le plus souvent d'une qualité exceptionnelle.

La capitale en est **Tolga**, on aperçoit tout le Zab Occidental de Bouchagroune à l'Est à El Amri à l'Ouest ; à Rassouta, se trouvaient les très belles palmeraies Ben Tabbi et Bengana. Cette dernière, entourée de hauts murs, était un petit paradis : l'eau courait descendant en petites cascades les terrasses étroites plantées de palmiers. Les massifs de fleurs, roses, géraniums, jasmin, les grandes volières où s'ébattaient des centaines de perruches blanches, jaunes, rouges, bleues, vertes, la fraîcheur de l'atmosphère en faisait un jardin des Mille et une nuits.

Le Megloub : vaste espace sans village mais ses nombreux jardins et palmeraies à l'Ouest de Tolga, le groupe des palmeraies de Foughala (village Buchère et Ozval), El Amri et El Kherouz (2955 habitants) s'étendant sur 11 kilomètres mais formant une seule commune, est un ensemble de plus de 60 000 palmiers.

Le Zab Guebli, reçoit les eaux du Zab Dahraoui et utilise les crues de l'Oued Djedi et ses sources. Les plus importantes palmeraies sont :

Lioua : 1303 habitants, **Ourlal** (50 000 palmiers) et **Sahira** (2729 habitants) avec sa Zaouïa, Kayada au confluent des Oueds BOU Mlih et Ouzen, (ferme vachet et froment) produit les meilleurs pastèques de la région, **Benthious**, **Mekhadma**, **M'lili**, **Sidi Fellaouche** où Monsieur Reboul acheta en 1906, 300 hectares. Il fera partie de la Commission Municipale, en 1910 avec Paul Ozval, Bigou. Enfin, malgré sa position, il faut inclure **Oumache** (3345

habitants) dans le Zab Guebli. Arrosée par l'Aïn M'lili et les barrages de l'Oued Djeddi, l'oasis compte plus de 30 000 palmiers.

Le Zab occidental est le type même de la zone à palmiers. Non seulement l'eau y est abondante, et en tout cas suffisante, mais encore peut-on planter des palmiers avec une simple irrigation de complément dans de nombreux endroits favorables. Du fait de l'évaporation intense, l'eau du sous-sol abandonne ses sels en surface. Il se forme alors une carapace gypseuse d'épaisseur variable (10 cm à 2.50 m). Sous cette carapace, dans ce qu'on appelle la tine (terre plus ou moins marneuse et sableuse), l'eau circule dans le sol.

Une particularité des eaux de cette région est la présence de poissons aveugles dans le réseau souterrain. On peut en voir surgir lors de travaux de captation de sources ou au premier jaillissement de puits artésiens. On trouve également, dans les seguias permanentes des quantités de crabes et d'escargots d'eau douces (ils sont persistes maintenant en 2014, selon notre enquête sur le terrain). (Anonyme, 1908).

Au sud de Tolga, il existe deux petits lacs, des étangs plutôt, dont l'Aïn Zerga, distants d'un Kilomètres et demi environ, et qui sont le produits d'un effondrement artésien. Ces Behour (pluriel de behar), sont profonds d'une soixantaine de mètres (la légende locale leur attribue une profondeur insondable et la présence de génies) et abritent des poissons-chats, d'ailleurs légèrement différents d'un lac à l'autre. Ces clarias Lazera sont les frères des poissons-chats du Tassili des Azgueur. On suppose qu'ils seraient partis de la faune résiduelle de l'ancien fleuve Igharghar qui reliait la zone tropicale au Ziban et qui se jetait dans les chotts Melghir et Djerid à l'époque des glaciations européennes. Parmi ces résidus figureraient également les najas (improprement appelés Cobras, l'aspic de Cléopâtres), et un crocodile capturé dans une mare de l'Oued Harir en plein Sahara (selon E.F.Gautier, 1922 in Cataldo, 1988).

Il suffit de casser cette croûte pour atteindre la zone humide et les palmiers peuvent s'y abreuver directement. Mais les meilleures terres sont, quand même, les terres légères que l'on peut arroser abondamment.

Ces oasis du Zab Guebli ont été regroupées en 1957 dans les communes de lioua, Ourlal et Oumache.

d- La Zab Chergui

Le Zab Chergui ; à l'Est de Sidi-Okba, il s'étend sur 80 km et du Nord au Sud sur 60 km ; l'Oued Yala le sépare, à l'Est, du cercle de Khenchela. Aujourd'hui, partie la plus

déshéritée des Ziban, il fut une des zones les plus fertiles de Numidie, du temps des Romains, grâce aux travaux d'hydraulique qu'ils y avaient entrepris. Couvert de fermes irriguées, exploitées par les Vétérans de la Legio III Augusta, on estime qu'il contribuait à la plus grande partie du million de quintaux de céréales produits dans les Ziban. Le sol y est naturellement riche en phosphates et nitrates, favorisant la culture des céréales et des oliviers. L'embarquement de cette production se faisait à Carthage, à laquelle le Zab Chergui était relié par une route construite par Antonin en 150. Aujourd'hui, pratiquement désertique, plus rien ne subsiste, sinon des vestiges, des travaux romains. Principaux villages : Aîn Naga, Sidi Ali Saleh, Zribet ElOued au confluent des Oueds el Arab et Gouchtal, Zribet Ahmed, près d'Ad Majores. Au nord de ce dernier, Bades (ruines d'une basilique ancienne) Liana, près du poste Romain d'Ad Bades. Au Sud, El Feïdh (céréales) et son puits profond de 156 mètres, Timmermacin et sa Zaouïa, Tenneuma qui fut avec Bades la capitale du Zab Chergui (Ibn Khaldoun). (Cataldo, 1988).

Donc, les Ziban sont situés au pied des montagnes et représentent un bassin fermé (équivalent de Hodna), constituant des niveaux de base pour des réseaux hydrographiques qui naissent au Nord. Ce bassin fermé est donc enrichi par des eaux provenant des zones pluvieuses offrant le contraste de leurs cultures irriguées.

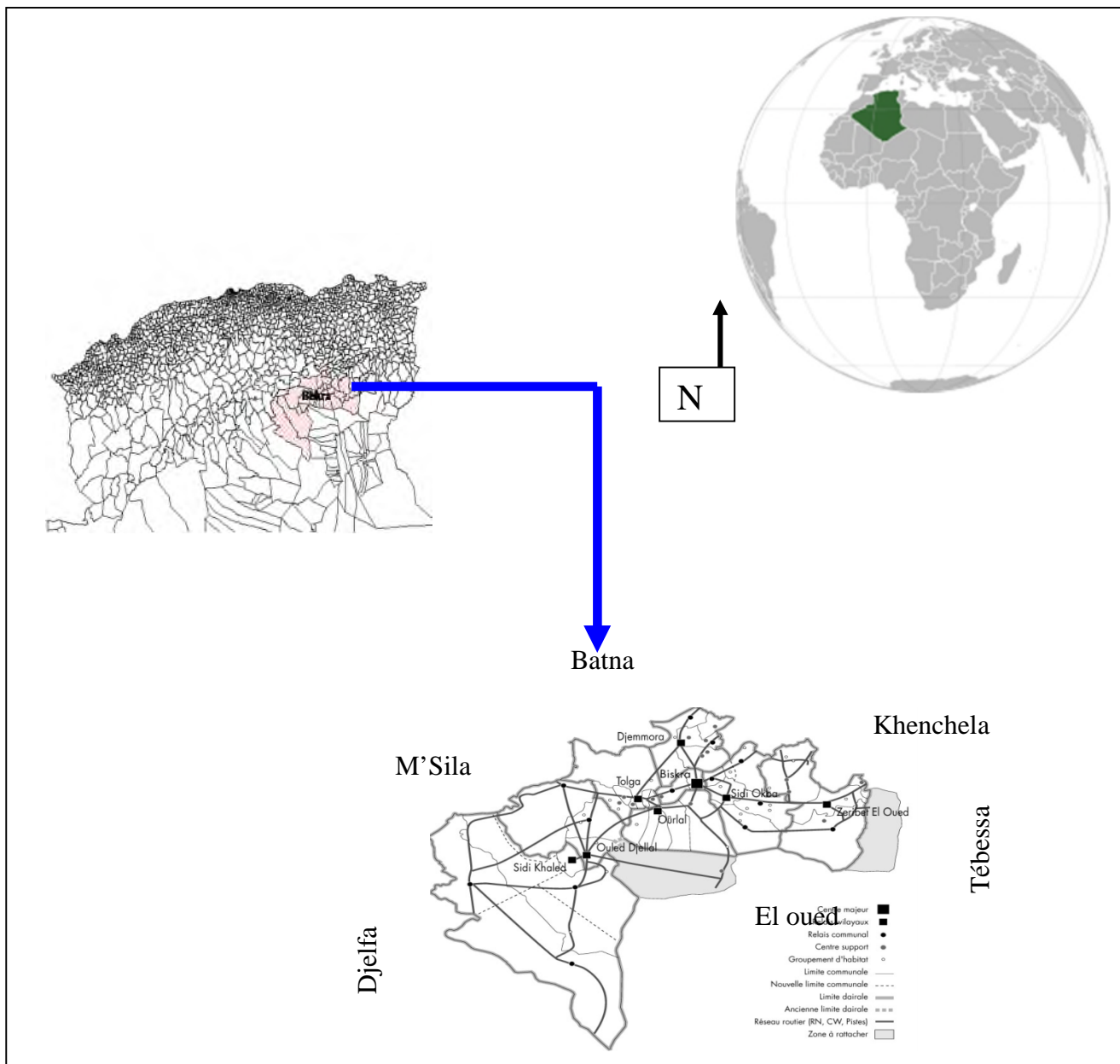


Fig. 01 : Situation géographique de la Wilaya de Biskra.

I-2- Aperçus sur la région d'étude

I-2-1- La région de Sidi –Okba- Zab Chergui (oriental).

La ville de Sidi Okba avait l'avantage d'être une ville sainte, renfermant le tombeau d'un des premiers conquérants de l'Afrique (Okba ibn Nafaâ). (Cataldo, 1988). Elle est localisée à une vingtaine de km, au sud-est SE, du chef lieu de Biskra. (Fig.02).

La région de Sidi Okba, une plaine à haute potentialité agricole, englobe une superficie de 25 410 ha soit 1.2 % de la superficie total de la wilaya. Elle possède une superficie agricole utile (SAU) de 10025 ha dont 7513 ha irriguées (monographie de Biskra, 2011). La répartition de la surface irriguée dans la zone d'étude est présentée dans le tableau 1.

Tableau 01 : La superficie irriguée/mode d'irrigation dans la région de Sidi-Okba.

Mode d'irrigation	gravitaire	Goutte à goutte	aspersion	total (ha)
Superficie irriguée (ha)	6219	1184	110	7513.00

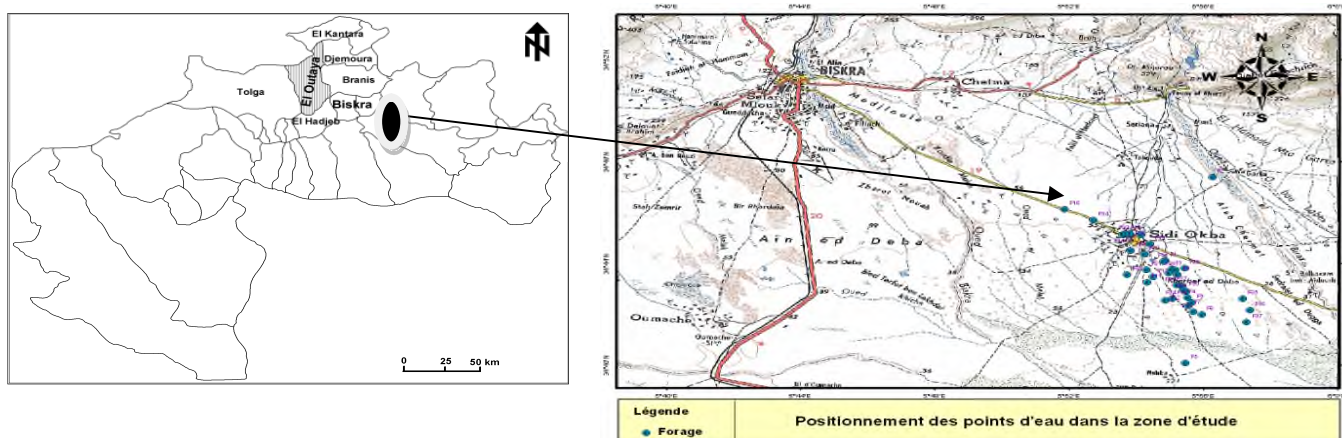


Fig. 02 : Situation géographique de la zone d'étude de Zab Chergui (Sidi Okba).

I-2-2- La région de Bordj ben Azouz – Tolga-Zab Gharbi (Occidental)

La Daïra de Tolga couvre 1334.10 km² soit 6.20 % de la superficie totale de la Wilaya (21.510 km²), la SAU (Superficie Agricole Utile) représente 8.89% de la SAT (Superficie agricole Totale) soit 9250 ha; dont 74.87% en phoeniculture, le reste est constitué par des terres incultes et par des parcours qui couvrent pré de 91% de la SAT. Elle est située à 390 km au Sud-est de la capitale et à 36 km au nord ouest du chef lieu de wilaya Biskra. Son altitude est de 128 mètres au dessus du niveau de la mer. Elle est caractérisée par un climat froid en hiver, chaud et sec en été. Sa localisation géographique fait d'elle une région à vocation agrosaharienne basée sur les vastes étendues des oasis. L'activité de culture du palmier dattier s'est ancrée dans la région, et elle se présente comme l'une des plus importantes régions Phoenicole en Algérie. Elle est connue mondialement pour la grande qualité de ses dattes, notamment par la variété noble Deglet Nour. (Benziouche et Chehat, 2010).

La Daïra de Tolga comporte 4 communes : Tolga, Bordj ben Azouz, Bouchagroune et Lichana. La région de Bordj Ben Azouz, qui nous intéresse dans notre recherche, a une superficie totale de 23.20 Km² (2320 ha) de la wilaya de Biskra soit 0.11 % avec une superficie agricole utile SAU de 1666 ha (71.81 % de la ST de Bordj ben Azouz et 0.9% de SAU totale de Biskra).(Fig.03).

Tableau 02 : La superficie irriguée/mode d’irrigation dans la région de Bordj Ben Azouz

Mode d'irrigation	Gravitaire	Aspersion	Goute goutte	à Total irrigué (ha)	SAU (ha)
Superficie irriguée (ha)	1550	0	87	1637	1666



Fig. 03 : Situation géographique de la zone d’étude Zab Gharbi (Bordj Ben Azouz).

I-2-3- La plaine d’El-Outaya

La plaine d’El-Outaya est un glacis en pente douce en situant au pied de l’Aurès à des altitudes qui varient entre 250 et 180 mètres. Des thalwegs sillonnent la plaine en creusant des ravins atteignant jusqu’à 3 mètres de profondeur, mettant à nu la nappe du gravier. Le réseau hydrographique est constitué essentiellement de l’Oued Biskra à l’Est et l’oued Selsou à l’Ouest. L’oued Biskra est alimenté par des pluies exceptionnelles et les affluents issus de massifs des Aurès. En revanche, oued Selsou présente un écoulement du type endoréique. (Chabour, 2006).

Le Trias se manifeste en un grand dôme à El-Outaya (Dj. El Melah) où il est associé à des lambeaux dolomitiques liasiques ou en petits affleurements d’argiles bariolées (Fontaines des gazelles, Branis et Djemora). (Chebbah, 2007).

La commune d’El Outaya qui couvre 406,10km² est limitée(Fig.04) :

- Au Nord par les communes d'El Kantara et Bitam ;
- A l'Est par les communes de Branis et Djemmorrah ;
- A l'Ouest par la commune de Tolga ;
- Au Sud par la commune de Biskra.

La plaine d'El-Outaya, au Nord-ouest de la ville de Biskra, fait partie de la zone des Ziban (versant sud des Aurès) et s'étend sur environ 330 Km² (33300 ha). La plaine constitue par sa position géographique, sa forme losangique limitée par des failles (est-ouest ; nord-ouest-sud-est et nord-est-sud-ouest) et ses dimensions réduites (30*70Km) un bassin très particulier. Elle montre un paysage géomorphologique très diversifié qui constitue une entité géographique propre formant une cuvette presque fermée. Elle est limitée :

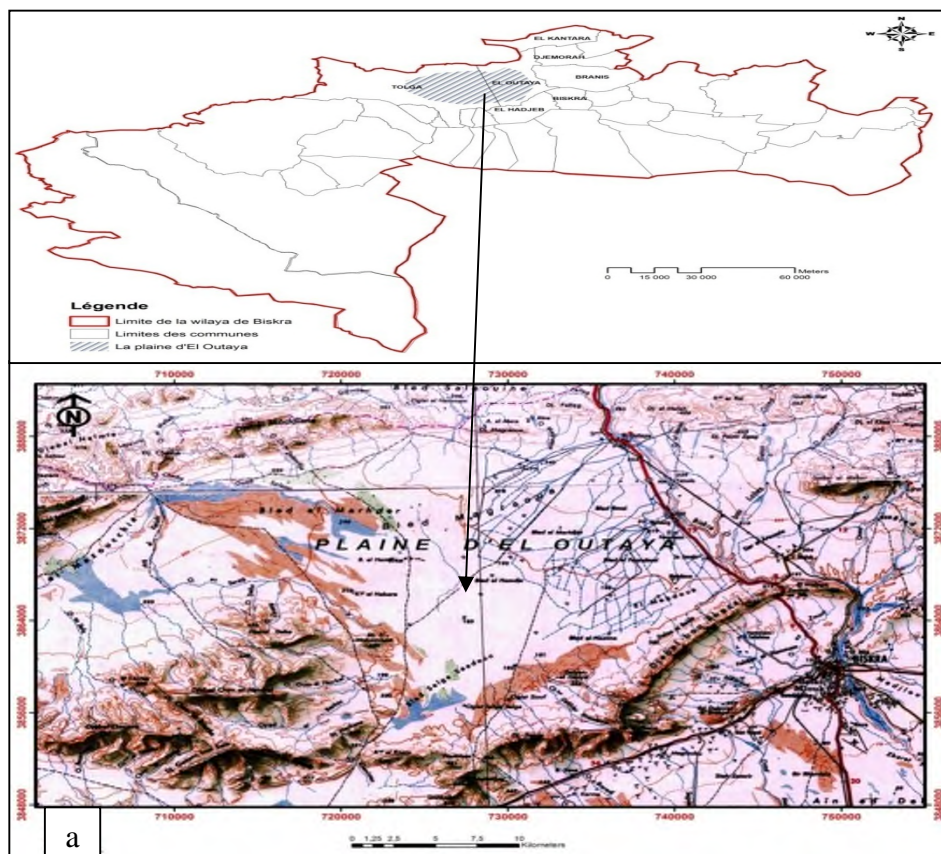
-Au Nord par les Djebels Melah (dôme escarpé et raboteux 626m), Meddiane et Magraoua.

-A l'Est par l'Oued Branis et Djebel Mohar(Branis) à 584m.

-Au Sud par Djebels Oum Djenib, Gouara et Aroussine avec au Sud-est Dj. Bourhzal(415m).

-A l'Ouest par Djebels Rebaa, Ed Deba et Ksoum.(Rechachi,2010)

En effet, la plaine d'El Outaya constitue par position géographique très spécifique et par sa grande immensité, une grande potentialité hydro-agricole dans la région. Ces ressources naturelles offrent de grandes perspectives pour le développement agricole dans la wilaya de Biskra.



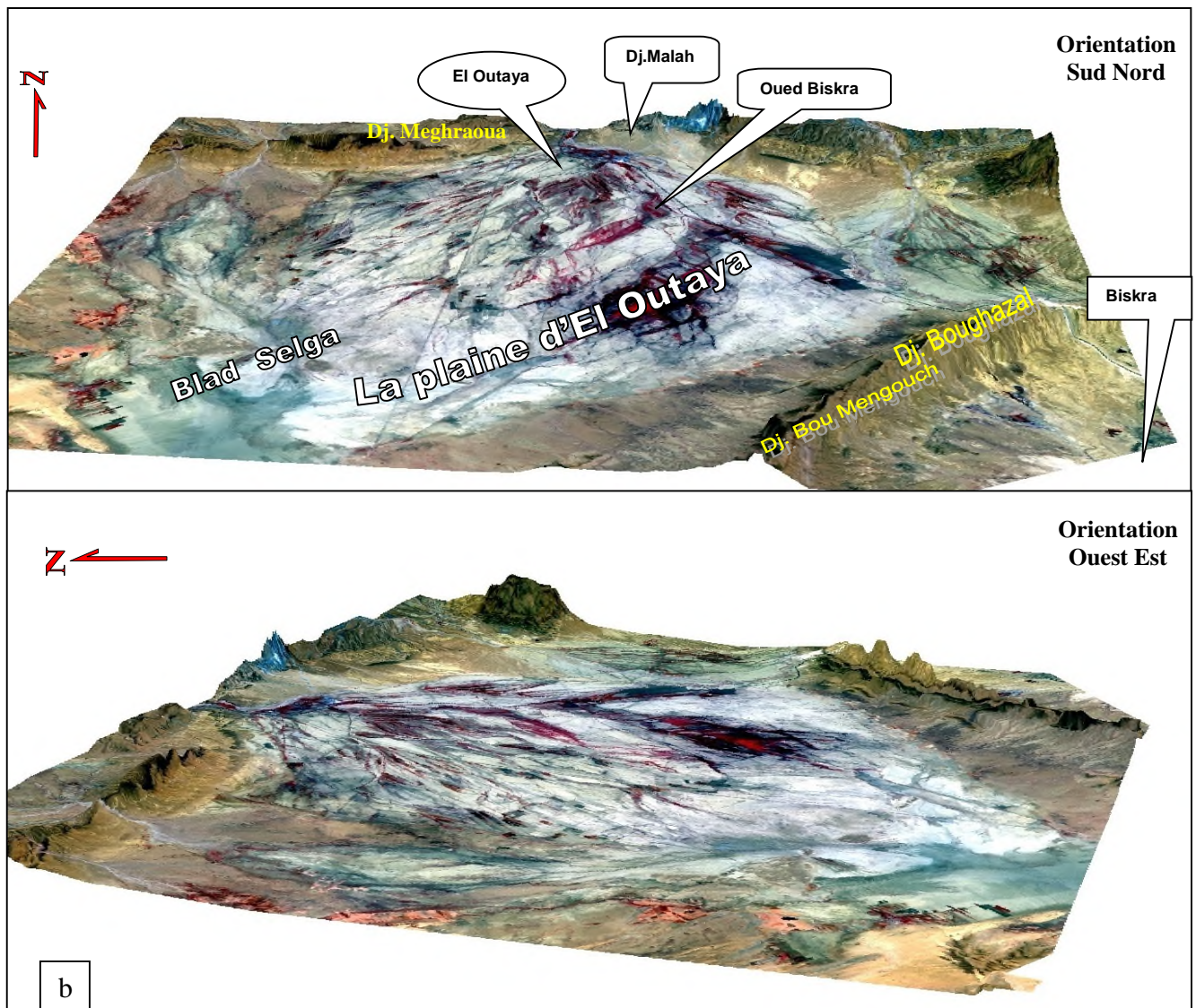


Fig.4 : Situation géographique de la plaine d’El-Outaya (commune et plaine) (a) et Les principales unités morphologiques de la région d’El Outaya(b)
 (Source: Abdelhafid, 2011).

Chapitre II : Climat et Hydrographie

Introduction et Généralités

Le Sahara , bien plus que tous les autres déserts du globe, est un monde où les êtres vivants nous révèlent comment on peut s'adapter à la rareté de l'eau, à une existence en milieu salé et surchauffé, soumis à l'agression des vents de sable. Les deux savants ; Monod, dans ses grands livres sur le Désert, ou Menchikoff, dans sa conception du Centre de recherches sahariennes de Béni-Abbès en témoignent. (Fabre, 2005).

Pratiquement, les limites du Sahara se situent en-deçà des isohyètes 100 à 150 mm. Les régions sahariennes situées au 12° longitude Est. On peut les tracer comme suit : au Nord, une ligne partant de l'Océan au droit de Goulimine et passant par Bou-denib, Laghouat, Biskra pour finir à Gafsa ; au Sud, une ligne allant de Nouakchott vers Tidjikja, Oualata, l'Adrar des Iforas, le Sud de l'Aïr et l'Ennedi. (Toutain, 1977). Une région aride où le rapport entre la pluviométrie annuelle (P) et l'évapotranspiration (ETP) a une valeur comprise entre 0.05 et 0.20 selon PNUE (1997) ; c'est-à-dire, les précipitations annuelles ne dépassent pas 200mm, la végétation annuelle est clairsemée, dominée par des espèces épineuses ou succulentes. (Kadik, 2010). Le Sahara septentrional s'étendant de la limite Nord jusqu'à 1000 Km vers l'intérieur. (Fig.05).

Les climats sahariens sont caractérisés notamment par (Toutain, 1977)

- La faiblesse des précipitations,
- Une luminosité intense,
- Une forte évaporation,
- De grands écarts de températures.

Le piedmont du Ziban est soumis à un bioclimat aride avec 150 mm environ, est ne reçoit pour les eaux de ruissellement que celles qui viennent du massif de l'Aurès ou de piedmont de Nememcha, elles même semi-arides, donc des écoulements intermittents sous forme de crues.

Le piedmont du Ziban est aussi divisé en deux compartiments de part et d'autre de la ville de Biskra :

- A l'Ouest (région de Tolga, Zab Gharbi) présente des ressources en eaux abondantes, palmeraies nombreuses et population importante ;

- A l'Est (région de Sidi Okba, Zab chergui) et tout le piedmont qui le prolonge jusqu'à la frontière tunisienne, ne comptent que quelques minces palmeraies. Et pourtant c'est l'Est qui est vaste et dominé par les hautes montagnes, alors que le piedmont Ouest est exigu (70 x 25 km).(Côte, 1987)

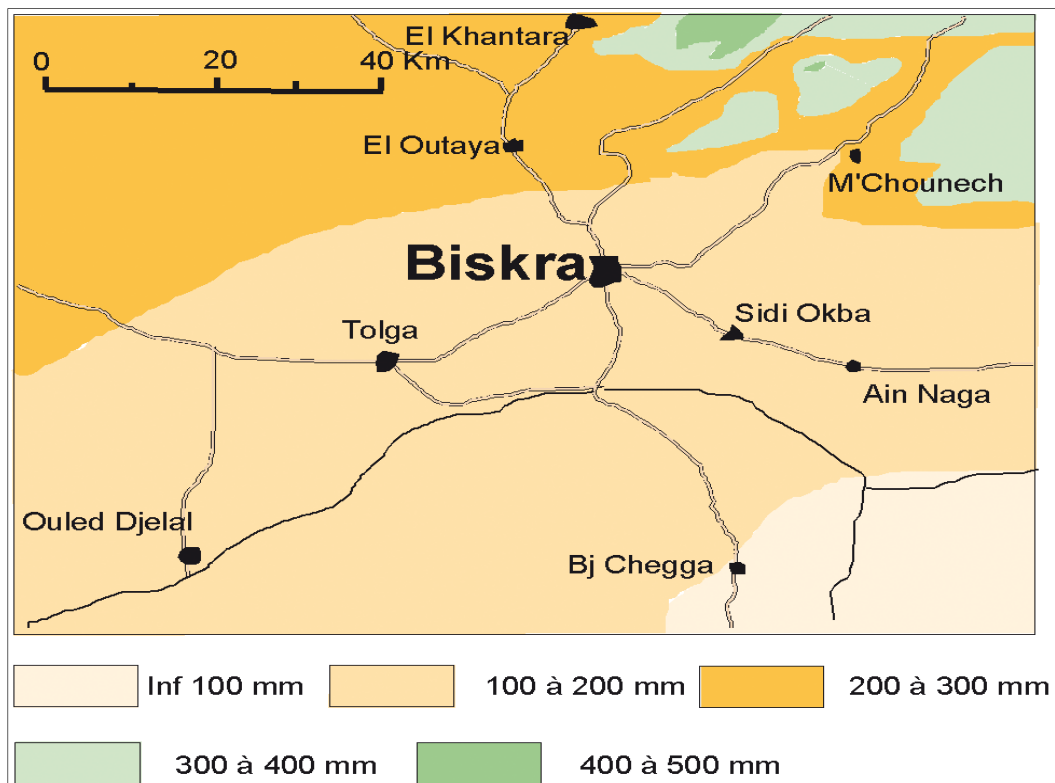


Fig.5 : Carte de répartition de la pluviométrie, région de Biskra (Extrait de la carte pluviométrique de l'Algérie au 1/500.000, 1971).

II-1- Etude du climat des Ziban

Les conditions climatiques jouent un rôle déterminant dans la réalimentation des nappes aquifères et ce sont les précipitations qui en constituent le facteur essentiel. La climatologie donne un premier aperçu sur la relation entre la nappe et son environnement immédiat. L'étude des aquifères est reliée avec l'étude du climat en se basant sur deux paramètres essentiels; la précipitation et la température, cette étude permet nous donner un aperçu sur leurs répartitions dans le temps et dans l'espace.

II-1-1- Aperçu climatique de l'Algérie

Selon Seltzer (1946), le climat de l'Algérie est de type méditerranéen caractérisé par une période pluvieuse allant en moyenne de Septembre à Mai et un été sec et ensoleillé.

L'Atlas tellien joue le rôle d'un rempart qui provoque la condensation et les précipitations d'une partie de la vapeur d'eau amenée par les vents soufflant de la mer. L'altitude entraîne une diminution générale de la température, l'éloignement de la mer, une augmentation des amplitudes diurnes et annuelles. Le climat de l'Atlas tellien présente donc tous les degrés intermédiaires entre un climat de montagnes pluvieux, froid à amplitude thermique relativement faible avec chutes de neige et un climat de plaines plus sec relativement chaud et à forts écarts thermiques. Tout entier situé au-delà de l'isohyète de 200 mm, le Bas-Sahara algérien (Ouargla, Oued Righ, Souf et Ziban) ne peut connaître que des cultures irriguées et un élevage nomade.

II-1-2- Station de mesure

La station de Biskra est une station pluviométrique, appartient à l'office nationale de la météorologie(ONM), présentant une série de données relativement longue et assez cohérente qui s'étale sur une période de 46 ans (1967-2012):

Tableau 03 : Cordonnées de station météorologique de Biskra (ANRH).

Station	Code	X	Y	Z (m)	Série d'observation
Biskra	06 14 16	5°43'48"N	34°51'40"E	86	1967-2012

La carte pluviométrique annuelle du nord de l'Algérie (dernière version) de l'agence nationale des ressources hydriques pour la période: septembre 1965 à août 2002, montre que la zone d'étude fait partie de la zone caractérisée par une pluviométrie comprise entre 100 et 150 mm.

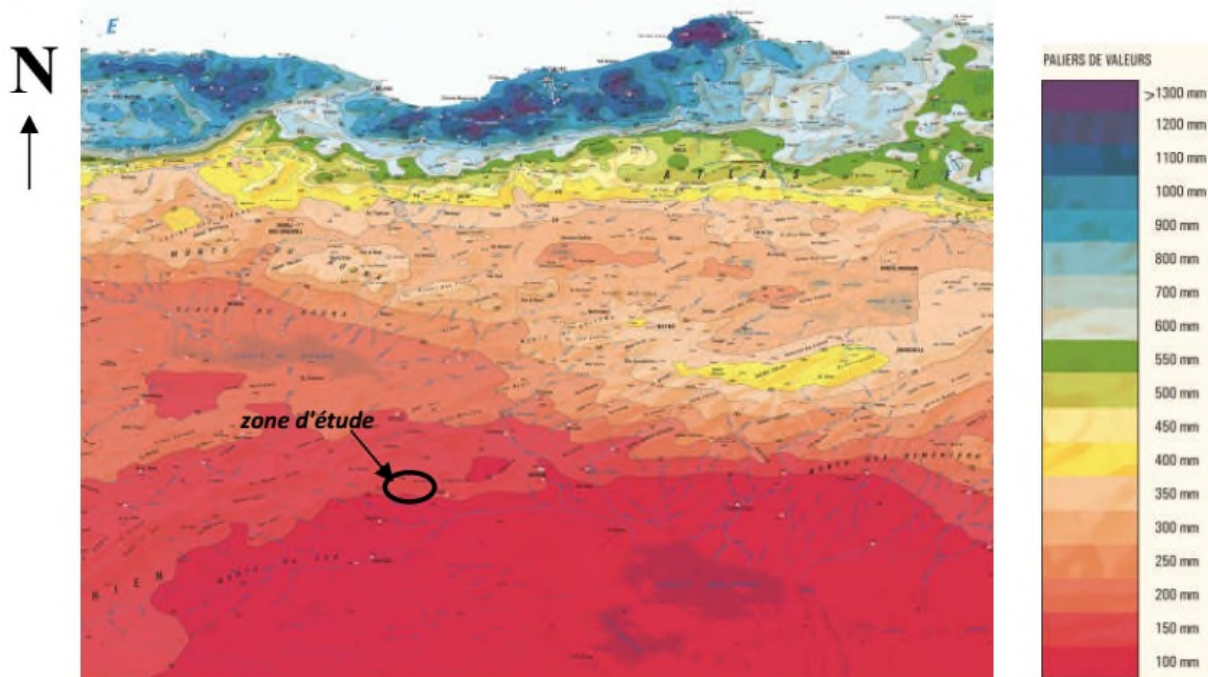


Fig.06 : Extrait de la carte pluviométrique annuelle du Nord d'Algérie. Période septembre 1965- août 2002(ANRH - G.T.Z, mars 2003)

II-1-3- Analyse climatique :

L'analyse climatique permet d'établir le bilan hydrique et les liaisons existant entre les différents paramètres climatologiques caractérisant la région.

II-1-3-1-Précipitations :

Les précipitations jouent un rôle primordial dans l'alimentation des réseaux hydrographiques d'une région ainsi que son système aquifère, en plus, elles forment un paramètre indispensable dans la réalisation d'un bilan hydrique.

II-1-3-1-1Variations Mensuelles des Précipitations :

La variation mensuelle de la précipitation pour la période de 1965 à 2012 est représentée dans le tableau suivant :

Tableau04 : Précipitations moyennes Mensuelles en mm, (Station Biskra)

station	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul.	Aout	Total
Biskra	22.77	16.33	18.61	10.81	18.48	12.85	15.54	13.82	14.33	6.73	1.76	5.00	157.07

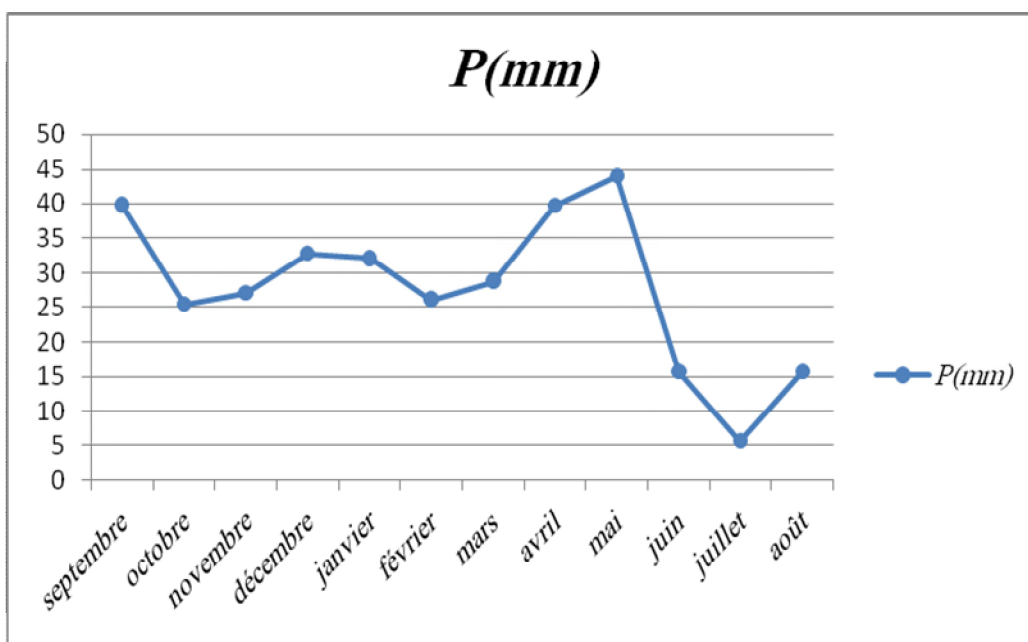


Fig.07: Variation des précipitations moyenne mensuelle, Station de Biskra. (1967 - 2012).

L'analyse de la courbe des variations mensuelles des précipitations sur une période de 45 ans pour la station montre que :

- ❖ Le mois le plus arrosé est le mois de septembre avec une précipitation moyenne mensuelle de **22.77mm**.
- ❖ Le mois le moins arrosé est le mois de juillet avec une précipitation moyenne mensuelle égale à **1.76 mm**.

II-1-3-1-2-Variations des précipitations saisonnières:

Tableau05 : Répartition saisonnière des précipitations, (Station Biskra)

saisons	Automne			Hiver			Printemps			Eté			Total
mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	
P (mm)	22.77	16.33	18.61	10.81	18.48	12.85	15.54	13.82	14.33	6.73	1.76	5.00	157.07
Σ (mm)	57.71			42.14			43.69			13.49			

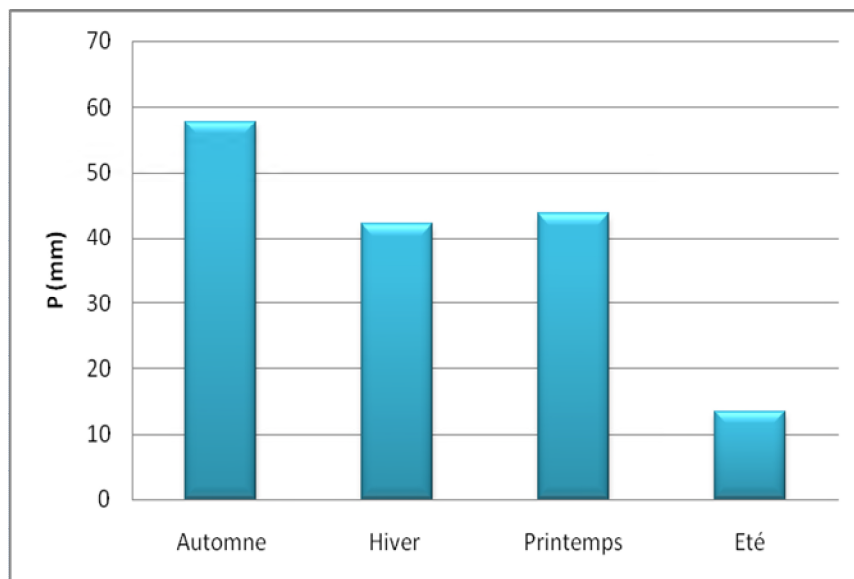


Fig.08: Variation des précipitations moyenne saisonnières, Station Biskra

L'analyse de l'histogramme des variations saisonnières des précipitations sur une période de 46 ans pour la station de Biskra montre que :

- ❖ La saison la plus humide est l'automne : **P (mm) 57.71**
- ❖ La saison la plus sèche est l'Eté : **P (mm) 13.49**

II-1-3-1-3- Variation interannuelle des précipitations :

La variation annuelle des précipitations pour une période de 46 ans (1967-2012) est représentée dans le tableau suivant :

Tableau06: Variation interannuelle des précipitations, (Station Biskra)

Année	P (mm)	Année	P (mm)
-------	--------	-------	--------

1967	101,8	1990	219,5
1968	69,1	1991	132,8
1969	590,9	1992	200,8
1970	59,5	1993	103,3
1971	97,4	1994	319,9
1972	173,4	1995	272,6
1973	63,1	1996	422,4
1974	60,3	1997	443,2
1975	135,1	1998	94,8
1976	179,4	1999	193
1977	194,8	2000	64,5
1978	62,1	2001	88,8
1979	152	2002	47
1980	126,3	2003	156,9
1981	105,8	2004	294,1
1982	188	2005	58,8
1983	78,4	2006	173
1984	103,4	2007	79,3
1985	130,2	2008	118,4
1986	151,7	2009	169,8
1987	92,4	2010	185,5
1988	82,9	2011	252,3
1989	82,2	2012	54,5

Source ONM Alger

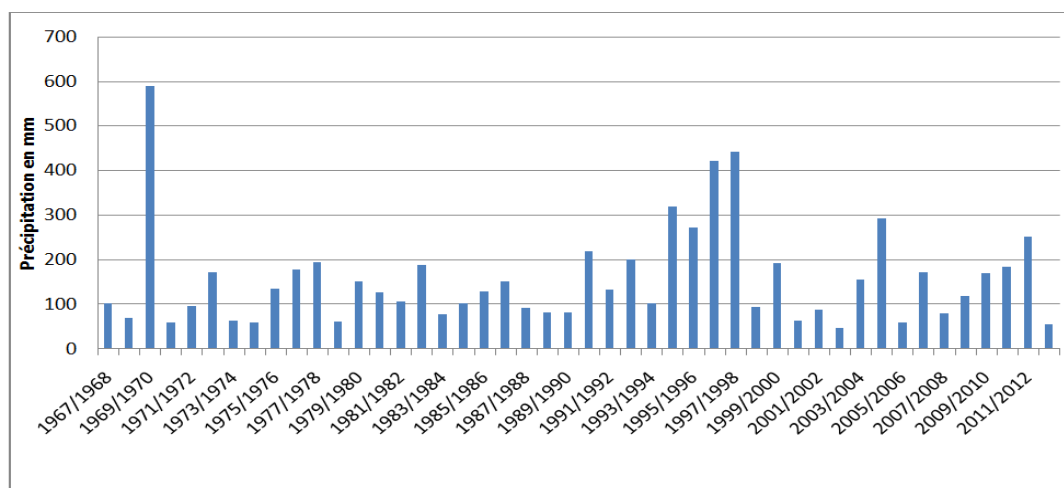


Fig.9: Variation interannuelle des précipitations, Station Biskra. (1967 / 2012).

L'analyse des données des précipitations annuelles (fig.6), mesurées à la station de Biskra pour la période de 46 ans (1967/2012), montre une moyenne annuelle de 157.07mm.

Les valeurs moyennes annuelles sont faibles, par contre les irrégularités interannuelles sont importantes avec un maximum de 590.9mm en 1969/1970(l'année des inondations ; ame eltoufane dans la langue commune des habitants de Biskra) et un minimum de 47mm en 2002/2003. En outre, l'examen du graphique montre une tendance générale à une très légère reprise, malgré certaines années sèches.

II-1-3-2-Les températures :

La région de Biskra présente une température moyenne annuelle de 21,88°C. L'effet de continentalité est important, les températures n'étant pas soumises à l'influence de la mer.

Ceci donne une augmentation sensible de l'amplitude thermique (22°C de moyenne annuelle).

Cette forte chaleur conjuguée à une amplitude thermique très élevée, favorise une intense évaporation.

II-1-3-2-1-Variation moyenne mensuelle de la température :

Les données des températures moyennes mensuelles de la région sont représentées dans le tableau suivant pour la période : 1967-2012.

Tableau07: Température moyenne mensuelle, (Station Biskra)

mois	jan	fév	mar	avr	mai	jui	juil	aout	sep	oct	nov	déc	moy
Temp.	10.93	12.68	16.00	19.53	24.70	30.04	33.23	32.69	33.34	22.01	15.65	11.77	21.88
°C													

Source ONM Alger

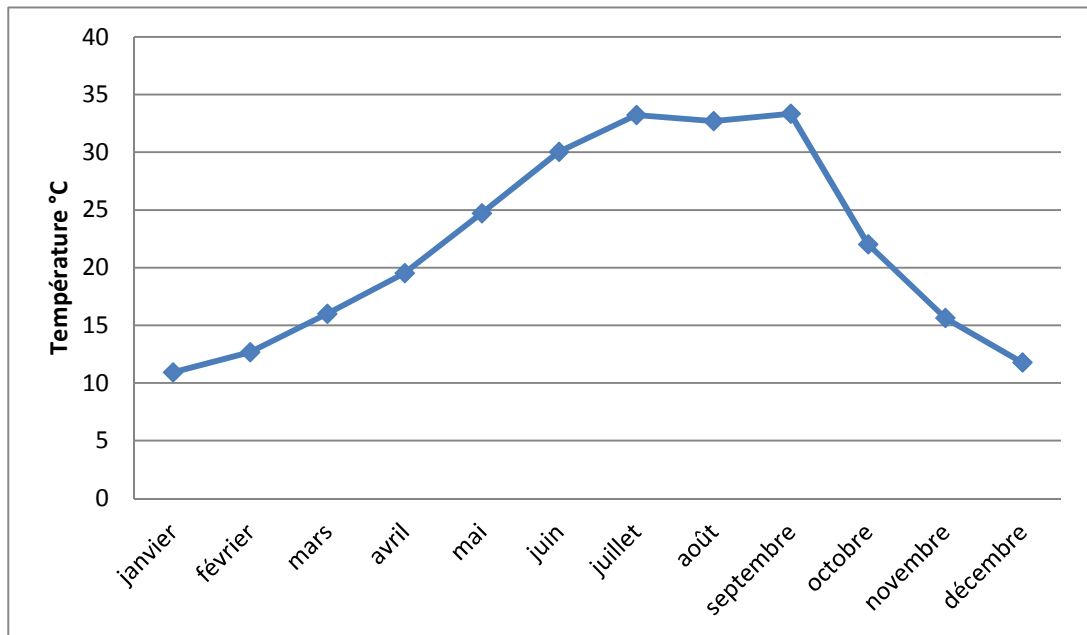


Fig.10: Variation des Températures moyenne mensuelle, Station Biskra. (1967 / 2012).

Le maximum des températures est atteint en mois de septembre, avec une valeur de 33.34°C. Tandis que le minimum est observé en Janvier avec une valeur de 10.93°C.

Les données du tableau 5 montre que

- La saison la plus chaude est l'Été (juillet, août et septembre).
- La saison la plus froide est l'Hiver (décembre, janvier et Février).

II-1-3-2-2-Diagramme pluviothermique de Gaussen et Bagnouls :

On utilise cette méthode pour déterminer la période sèche et la période humide de la région d'étude.

Pour Gaussen et Bagnouls le climat sec est celui où la totalité des précipitations en mm est inférieure ou égale au double des températures moyennes ($P \leq 2T^{\circ}\text{C}$).

Cette relation permet d'établir un graphique Ombrothermique sur lequel les températures sont portées à l'échelle double des précipitations.

Lorsque la courbe représentant les précipitations passe au-dessus de la courbe de la température ; il s'agit d'une période excédentaire (humide). Alors que si la courbe des précipitations passent au-dessous de celle de la température ; il s'agit d'une période déficitaire (sèche).

Le tableau suivant représente les précipitations et températures moyennes mensuelles.

Tableau08 : Températures et précipitations moyennes mensuelles

Mois	jan	fév.	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sep	oct.	nov.	déc.
T (°c)	10.93	12.68	16.00	19.53	24.70	30.04	33.23	32.69	33.34	22.01	15.65	11.77
P (mm)	18.48	12.82	15.54	13.82	14.33	6.73	1.76	5.00	22.77	16.33	18.61	10.81

Source ONM Alger

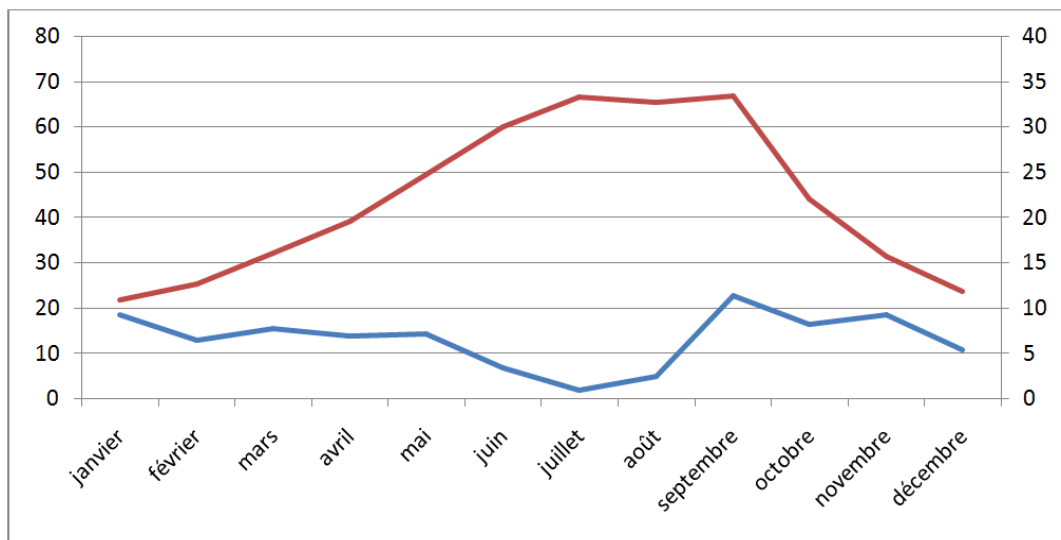


Fig.11: Diagramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls

Ce diagramme dressé pour la station d'étude pour la période de 1967 à 2012 révèle que la période sèche s'étale pendant toute l'année.

II-1-3-3-Humidité relative de l'air :

Elle exprime le rapport en pourcentage de la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air (P_a), à la pression de vapeur saturante (P_r) dans les mêmes conditions de mesure de température lue au thermomètre sec et en pression.

Ce paramètre est relativement faible dans la zone d'étude ; la moyenne est de 42.29%. Cette faiblesse s'explique par l'aridité du climat et la concentration des masses d'air chaudes du Sahara. Les valeurs moyennes mensuelles sont insérées dans le tableau ci-dessous.

Tableau09 : Humidités relatives moyennes enregistrées à la station de Biskra Période (1996-2005).

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Jun	Juil.	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc	Moy
H %	59.7	48.6	42.1	38.2	33.3	28.8	26.1	29.5	39.8	46.5	54.4	60.5	42.29

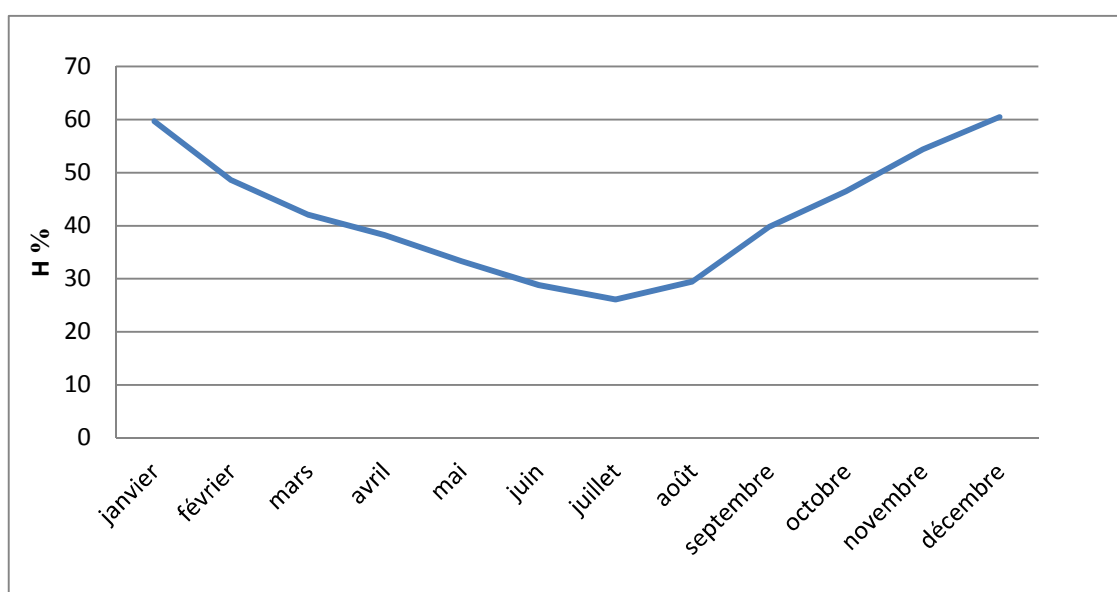


Fig.12: Humidités relatives moyennes enregistrées à la station de Biskra Période (1996-2005)

II-1-3-4- Les Vents:

Les vents sont fréquents et répartis sur toute l'année avec des vitesses moyennes mensuelles de 4.66 m/s environ ; alors que les vitesses maximales sont enregistrées aux mois d'avril et mai (respectivement 6.15 et 5.78m/s).

Durant les mois: juin, juillet, août et septembre, les vents dominants sont de secteur Sud-Est ; où, durant cette période arrivent souvent des siroccos (vent brûlant très sec) d'une moyenne de 58 jours/an. Pendant la saison hivernale, les vents du secteur Nord-Est sont dominants, amenant de l'humidité du Nord.

Tableau 10: Vitesses moyennes des vents enregistrées à la station de Biskra Période (1996-2005)

Mois	jan	fév.	mars	avr.	mai	jui	juil	Août	sep	oct	nov	déc	moy
Vents (vitesse moyenne(m/s))	4.53	4.55	4.7	6.15	5.78	4.86	4.26	4.07	4.43	4.09	4.5	4.02	4.66

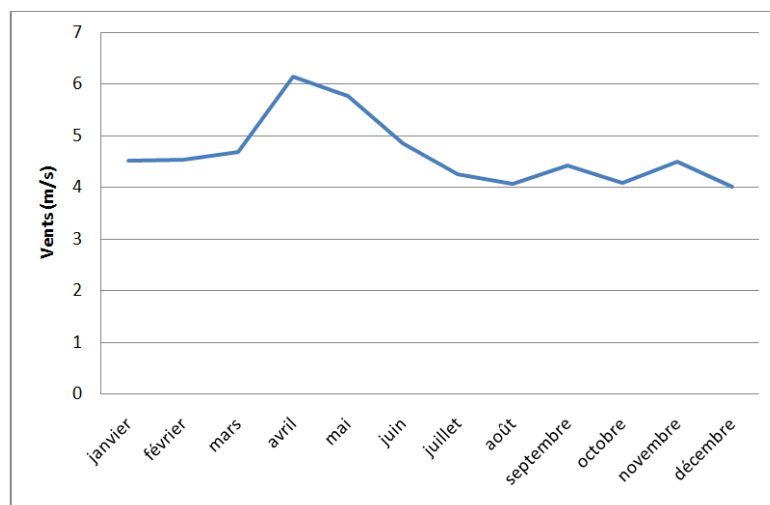


Fig.13: Vitesses moyennes des vents enregistrées à la station de Biskra Période (1996-2005).

II-1-3-5- Le régime climatique :

Afin de préciser les conditions climatiques de la région de notre étude, nous avons utilisé plusieurs méthodes ; méthode d'Euverte ; Diagramme Ombrothermique de Gaussen Bagnoules ; Indice d'aridité de Martonne ; Diagramme d'Emberger.

II-1-3-5-1-Méthode d'Euverte :

Le rapport précipitation, température établit mensuellement permet de connaître plusieurs régimes :

Tableau11: Détermination de régime climatique par la méthode d'Euverte. (Station de Biskra). (1967-2012).

Mois	jan	fév	mars	avr	mai	jui	Juil	aou	sep	oct	Nov	déc
P	18.48	12.82	15.54	13.82	14.33	6.73	1.76	5.00	22.77	16.33	18.61	10.81
T	10.93	12.68	16.00	19.53	24.70	30.04	33.23	32.69	33.34	22.01	15.65	11.77
P/T	1.69	1.01	0.97	0.70	0.58	0.22	0.05	0.15	0.68	0.74	1.18	0.91

-un régime très sec où : $P/T < 1$

- un régime sec où : $1 < P/T < 2$

-un régime sub-humide où : $2 < P/T < 3$

-un régime humide où : $P/T > 3$

Nous remarquons qu'il y a un régime sec aux janvier, février et novembre alors que le reste des mois sont des mois très secs.

II-1-3-5-2-Calcul de l'indice de l'aridité de MARTONNE 1923 « I » :

L'indice de l'aridité (I) permet de terminer le type de climat en fonction de la précipitation moyenne annuelle P en (mm) et de la température moyenne annuelle T en (°C).

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

Où :

P : les précipitations moyennes annuelles ;

T : les températures moyennes annuelles.

Selon De Martonne, les différents types des climats sont les suivantes :

Tableau12 : Type de climat selon de De Martonne.

I	I<5	5<I<7.5	7.5<I<10	10<I<20	20<I<30
Type de climat	hyperaride	désertique	steppique	Semi-aride	tempéré

Les résultats du calcul de l'indice d'aridité sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau13 : Indice d'aridité de De Martonne.

Station	P	T	I	Régime
Biskra	157.07	21.88	4.92	hyperaride

D'après cette classification la région d'étude est caractérisée par un climat de type hyperaride : I=4.92.

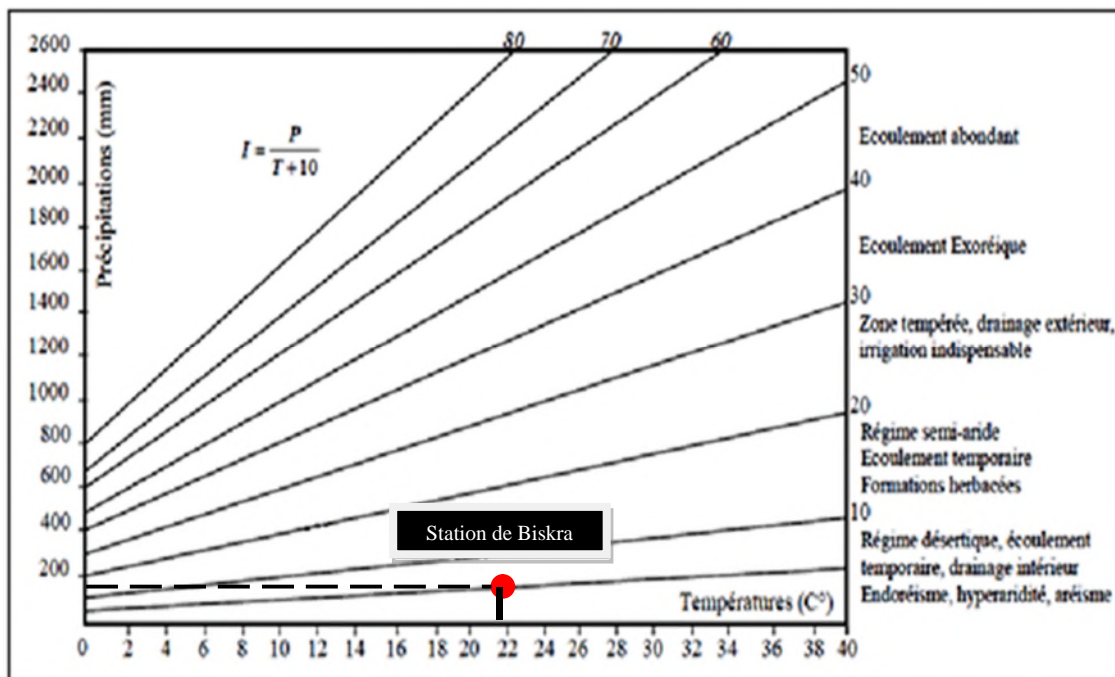


Fig.14: Abaque de l'Indice climatique de De Martonne 1923.

II-1-3-5-3-Le diagramme d'Emberger :

Le quotient pluviométrique ou indice climatique d'Emberger, détermine les cinq différents types de climats méditerranéens, depuis le plus aride, jusqu'à celui de haute montagne.

Ce quotient est défini par la formule : $Q_2 = 2000P/M^2 - m^2$

Avec :

-P : précipitation annuelle en mm.

-M : Moyenne des températures maximales du mois le plus chaud exprimées en degré absolu(K°)

-m : moyenne des températures minimales du mois le plus froid exprimé en degré absolu (K°).
(T.K° = Tc° + 273.2).

La formule est parfois adaptée sous la forme suivante (formule de Stewart):

$$Q_3 = 3.43P / (M - m)$$

L'abaque de L. Emberger (modifié par Stewart), comporte en ordonnées les valeurs de Stewart, et en abscisses la température moyenne des minimas de la saison froide en °C.

Pour la région d'étude, est égal à 22.04 et la moyenne des minimas de la saison froide est égale à 3,6°C ; le point ainsi obtenu sur l'abaque (fig.15) montre que la zone est circonscrite dans l'étage bioclimatique saharien.

Tableau14 : La valeur du Q₃.

Station	P (mm)	M		m		Q ₃
Biskra	271.34	33.34	306.54	10.93	284.13	24.04

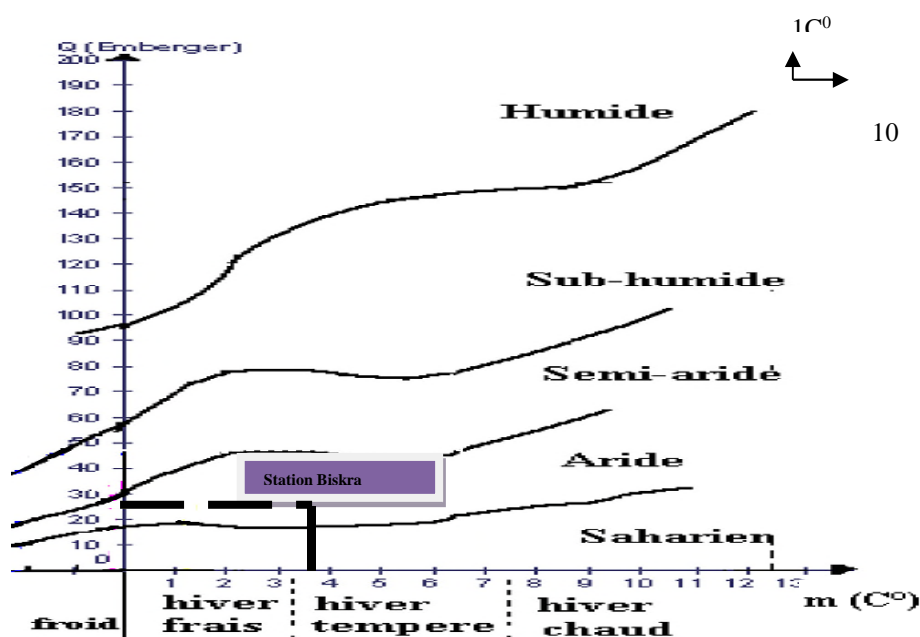


Fig.15 : Climagramme d'Emberger de la station de Biskra (1967-2012).

Suite à la représentation de ces valeurs sur le Climagramme de L'Emberger ; nous constatons que la région d'étude est située dans l'étage bioclimatique aride.

II-1-3-6- Bilan hydrologique et établissement du bilan hydrique de la région d'étude

a- Bilan hydrologique :

Le bilan hydraulique de l'Algérie qui se divise approximativement en trois zones :

a-1- La zone septentrionale :

D'une superficie de 130000km^2 , elle reçoit, en moyenne 500mm/an , ou $13 \times 10^{10} \times 0.5 = 65 \times 10^9 \text{m}^3$ (65 milliards de m^3). (Sari Ahmed; 2002).

a-2- La zone des hauts plateaux :

D'une superficie de 76000km^2 , avec 300mm/an en moyenne, ou $76 \times 10^9 \times 0.3 = 22.8$ milliards de m^3 (Sari Ahmed; 2002).

a-3- La zone Sud Atlas :

D'une superficie de 67000 km^2 , avec 250 mm/an ou $67 \times 10^9 \times 0.25 = 16.75$ milliards de m^3 (Sari Ahmed; 2002). Le bilan hydrique permet d'interpréter plus précisément la notion de sécheresse, cette dernière peut être reconnue quand les précipitations et les réserves d'eau du sol ne compensent pas la capacité élaboratrices et les besoins de la végétation qui représentent l'évapotranspiration potentielle.

b- Établissement du bilan hydrique :

L'établissement du bilan nous permet d'estimer la répartition des précipitations sur le terme suivant :

ETR : évapotranspiration réelle, R : ruissellement, I : infiltration, P : précipitation.

b-1- Etude de l'évapotranspiration (évaporation +transpiration):

L'évapotranspiration est la transformation de l'eau en vapeurs par un processus physique. Cette transformation se fait à partir de la fine pellicule d'eau recouverte les feuilles, les tiges et les branches, de toutes les plantes aussi qu'on partit du surface d'eau stagnante ou mobile et des couches superficielles du sol.

b-2- Calcul l'évapotranspiration potentielle (ETP) :

C'est une quantité d'eau pouvant être évaporer ou transpirer sur une surface donnée et pendant une période définie, en considérant que les apports en eau sont suffisants.

Il existe plusieurs formules empiriques pour calculer l'évapotranspiration potentielle, mais elles ne sont pas représentatives pour toutes les régions du monde, parce qu'elles doivent subir plusieurs corrections locales.

-Formule de Thornthwaite :

Cette formule est basée sur de nombreuse expérience effectuée sur le terrain et avec des lucimètres, elle s'est exprimée en fonction de la température mais à condition considérée du surfaces suffisamment étendue et pas de temps assez long de l'ordre de la décade.

$$ETP = 16 \left(\frac{10 \times T}{I} \right)^a \times K \quad (\text{En mm})$$

ETP : Evapotranspiration mensuelle corrigée ; T: Température moyenne mensuelle (en °C) ;

I : Indice thermique annuelle, ($i = \sum i$)

i: Indice thermique mensuel, déterminé par l'expression : ($i = (T/5)^{1.514}$)

a : Coefficient calculé par la formule : $a = (1.6/100) i + 0.5$

EP : Evapotranspiration potentielle non corrigée, déterminée par l'expression :

$$EP = 16(10 \cdot T/I)^a$$

K : Coefficient de correction qui dépend du temps, du mois et de l'altitude du lieu, par lequel, on doit multiplier les valeurs de l'ETP pour obtenir les valeurs corrigées.

-Application :

Tab.15: ETP moyennes mensuelles et annuelles station de Biskra, Période (1967-2012).

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil.	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	total
T(°c)	10.93	12.68	16.00	19.53	24.70	30.04	33.23	32.69	33.34	22.01	15.65	11.77	
i	3,27	4,09	5,82	7,87	11,23	15,10	17,60	17,17	17,69	9,43	5,63	3,66	
ETP	13,18	18,81	32,84	52,97	92,95	148,56	189,32	182,04	190,81	70,5	31,13	15,73	1038,89

-Formule de Serra:

Serra propose pour le calcul de l'ETP la formule suivante :

$$ETP = 16 * (10T/ I)^a$$

Où

I = la somme de i et $i = 0.09 * T^{3/2}$.

ETP: évapotranspiration potentielle corrigée

T : Température moyenne mensuelle (°C) ;

I: somme des indices thermiques mensuels

a: exposant égal à 2.32 pour la station de Biskra ;

k: facteur de correction tabulé, fonction de la latitude

Application :

Tableau16: ETP moyennes mensuelles et annuelles station de Biskra, Période (1967-2012).selon Serra

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil.	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc	total
T(°c)	10.93	12.68	16.00	19.53	24.70	30.04	33.23	32.69	33.34	22.01	15.65	11.77	
i	3,25	4,07	5,76	7,77	11,05	14,82	17,25	16,83	17,33	9,29	5,57	3,64	
ETP	13,78	19,44	33,34	52,96	91,26	143,67	181,67	174,91	183,05	69,83	31,65	16,36	1011,90

b-3- Calcul l'évapotranspiration réelle (ETR) :

L'évapotranspiration réelle est la somme de l'évaporation et de la transpiration réelle pour une surface donnée et une période donnée.

TURC a proposé une formule permettant d'évaluer directement l'évapotranspiration réelle à partir de la hauteur annuelle de la pluie et de la température moyenne annuelle, la formule est exprimée de la manière suivante :

$$ETR = P / \sqrt{0.9 + \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}$$

Avec :

$$L=300+25T+0.05T^3$$

P : Précipitation moyenne annuelle (en mm);

T : Température moyenne annuelle (en °C) ;

ETR : Evapotranspiration réelle (en mm).

-Application :

L=759.91, P=157.07mm. Donc on aura: **ETR=164.65mm (105.51 %)**

* D'après A.COUTAGNE, une formule empirique permettant de calculer l'ETR :

$$ETR = P - \lambda * P^2$$

Avec : - P : précipitation moyenne annuelle (m) $\lambda = 1/0.8 + 0.14T$.

- T : la température moyenne annuelle en (°C).

Cette formule n'est applicable qu'à la condition : $1/8 \lambda \leq P \leq 1/2 \lambda$

Le calcul a donné pour λ une valeur de 0.25 ; la condition d'application n'étant pas vérifiée, la formule de Coutagne n'est donc pas applicable.

Le calcul de l'ETR d'après THORNTHWALTE est :

- **Si $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$:** Et s'il y a un excédent qui est $(P - ETP)$, il va alimenter le RFU, le ruissellement et l'infiltration. Le surplus d'eau s'écoule à moitié dans les réseaux hydrographiques pendant le mois considéré M, et l'autre (écoulement souterrain) est reportée au mois suivant M+1.
- **Si $P < ETP \Rightarrow ETR = P$:** Plus toute ou partie de la RFU jusqu'à égale la valeur de l'ETP, si malgré l'apport de la RFU, l'ETR.

Le bilan d'eau proposé par Thornthwaite permet d'estimer mensuellement l'évapotranspiration réelle, en tenant compte de la recharge des sols due aux précipitations et de la décharge, due à l'ETP.

Ce bilan fait intervenir la notion de **réserve facilement utilisable (RFU)**; la quantité d'eau absorbé par le sol, est dépend d'une part par la nature du sol (degré de saturation) et d'autre part par la couverture végétale, elle présente la quantité d'eau emmagasinée dans le sol;

L'estimation de ce paramètre est basée sur l'application de la formule :

$$\mathbf{RFU=1/3*Da*He*P}$$

Da : La densité apparente du sol,

He : Capacité de retentions en % ;

P: Profondeur de la terre parcourue par les racines.

Nous obtenons alors une valeur de RFU sensiblement égale à 100mm et qui correspond bien à la valeur proposée par C.W. Thornthwaite.

L'établissement du bilan fait intervenir l'ETP et les précipitations ; le principe est le suivant :

- Si $P > ETP$; l'ETR=l'ETP, l'excédent va alimenter la RFU. La quantité qui dépassera la réserve cumulée de 100mm admise comme réserve en eau du sol à saturation, constituera l'excédent de Thornthwaite qui va alimenter le ruissellement et l'infiltration.
- Si $P < ETP$; l'ETR=P+une partie de la RFU, jusqu'à égaler la valeur de l'ETP.

Si la RFU est assez élevée pour combler l'insuffisance des précipitations, l'ETR encore égale à l'ETP ; les réserves du sol sont alors déduites de la différence (ETP-P) du mois considéré.

Si la RFU est insuffisante pour satisfaire l'ETP, l'ETR reste inférieure à l'ETP et sera égale à P+RFU (réserves disponibles).

Les résultats du calcul du bilan hydrique sont consignés dans le tableau n° 17 suivant :

Tableau.17: Bilan hydrique de Thornthwaite de station de Biskra, période (1967-2012)

Mois	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Total
P	18.48	12.82	15.54	13.82	14.33	6.73	1.76	5.00	22.77	16.33	18.61	10.81	157.07
T°C	10.93	12.68	16.00	19.53	24.70	30.04	33.23	32.69	33.34	22.01	15.65	11.77	Moy=21. 88
ETP	13,18	18,81	32,84	52,97	92,95	148,56	189,32	182,04	190,81	70,5	31,13	15,73	1038,89
P-ETP	5.3	-5.99	-17.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-4.92	/
RFU	5.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.3
ETR	13.18	12.82	15.54	13.82	14.33	6.73	1.76	5.00	22.77	16.33	18.61	10.81	151.7
Da	0	5.99	17.3	39.15	78.62	141.83	187.56	177.04	168.07	54.17	12.53	4.92	887.18
Ex	5.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.3

Nous constatons que les précipitations sont toujours inférieures à l'ETP ; l'ETR est donc égale aux précipitations (157.07mm), ce qui conduit à un déficit couvrant toute l'année (à l'exception du mois de janvier). La réserve utile du sol n'atteint jamais son maximum qui est de 100mm telle que suggérée par Thornthwaite dans sa formulation. Ce déséquilibre entre les précipitations et l'évaporation montre **la nécessité d'une irrigation importante pour l'agriculture utilisant surtout les eaux souterraines.**

b-4- Calcul de ruissellement R :

Le ruissellement est l'écoulement instantané temporaire des eaux sur un versant à la suite des averses. Le ruissellement apparaît dès que l'intensité d'une pluie devient supérieure à la vitesse d'infiltration du sol. Il est nettement plus élevé sur sol nu que sous cultures. Les plus faibles ruissellements proviennent des pluies tombantes après une période sèche. Par contre, les ruissellements et les pertes en terres les plus élevés ont eu lieu à une époque où le sol est déjà très humide et dans le cas des pluies exceptionnelles et des orages d'automne et de printemps. Le ruissellement ne débute qu'après un cumul pluviométrique journalier de 18 à 20 mm sur sol sec même si les pluies sont intenses ou après un cumul de 4 mm sur sol humide et compact.

Ces seuils de hauteur dépendent en partie des caractéristiques des pluies (intensité, mais aussi du volume de pluie tombant après saturation du sol) et surtout de l'état de surface du sol (plus le sol est dégradé plus le ruissellement est rapide).

La loi de TIXERON-BERKALOFF (1960), nous permet d'estimer le ruissellement à partir des précipitations moyennes annuelles et de l'ETP, calculée selon THORNTHWAITE.

Elle concerne surtout les régions ayant un climat aride et semi-aride.

$$R = P^3 / 3ETP^2$$

Où : R : Ruissellement (en mm) ;

P : Précipitation moyenne annuelle ;

ETP : Calculée par THORNTHWAITE.

Application :

P = 157.07 mm, ETP = 1038.89mm. Donc R=1.19mm, soit 0.76% des précipitations annuelles.

b-5- Calcul de l'infiltration :

Tous les sols sont plus ou moins perméables. Le coefficient de perméabilité qui représente la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol dépend essentiellement de la porosité du sol. Pour calculer l'infiltration, on applique la formule suivant : $EX = R + I \Rightarrow I = EX - R / I = 4.11 \text{ mm}$.

II-1-4- Réseau hydrographique:

Le bassin versant de Chott Melghir couvre une superficie de 68750 Km² et un périmètre de 1724 Km. Il draine un important réseau hydrographique dont l'écoulement est activé le plus souvent, du fait de l'aridité du climat, lors des crues.

Selon le service hydrogéologique (Anonyme, 1980), l'oued Djedi est le plus important du bassin, il prend naissance à la confluence de deux oueds; oued M'zi et oued Messaad. Il a un régime temporaire et son lit ne présente qu'un écoulement superficiel pendant quelques jours par an. Ses affluents viennent du Nord et du Nord-Ouest. Ils sont caractérisés par un régime d'écoulement temporaire. Les principaux affluents, d'amont en aval, sont :

- Oued Kharsa: dont les réseaux descend des monts du Zab en recoupant les Djebel Groum El Kebch et Hamara, et se disperse dans la plaine de Doucen où il est relié à Oued Doucen.
- Oued Doucen: rejoint oued Djedi au sud de Lioua après avoir reçu sur sa rive gauche oued El Ouzene, celui-ci draine le secteur oriental des monts du Zab ; les Djebels Aroussine et El Ksoum.

Réseau hydrographique-les écoulements du surface

Comme étant l'exutoire de l'ensemble des eaux de surfaces dans le bassin de Melghir, le chott reçoit les eaux des principaux oueds suivants : A l'Est, oued El Arab, principal oued de la zone, avec ses 5 affluents, et Oued El Haguef, au Nord, Oueds El Abiod et Biskra qui se jettent dans l'Oued Djeddi au lieu dit Sâada, à l'Ouest, Oued Djeddi avec ses 6 affluents.(voir Fig.16 et Fig.17)

Le tableau suivant illustre quelques détails des principaux oueds qui franchissent les Ziban.

Tableau. 18: Principaux oueds qui franchissent les Ziban

Oueds	Longueur (Km)	Apport Interannuel (m³/an)	Type d'écoulement
Oued DJEDY	380	32,70	Temporaire
Oued EL HAI	22,5	13,21	-
Oued LABIOD	80	11,20	Temporaire
Oued BISKRA	57	6,05	épisode

(ANRH, 2008)

Les oueds des Aurès acheminent, de ce fait, vers la région des Ziban des quantités d'eaux très importante. (Chabour, 2006).

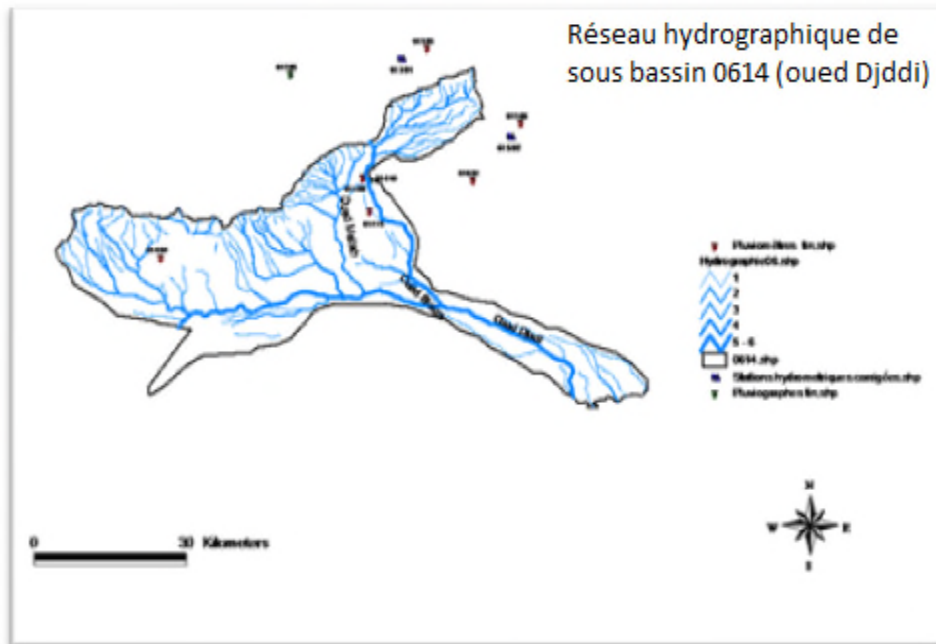


Fig.16 : Le réseau hydrographique du sous bassin 0614(oued Djedi-Biskra)

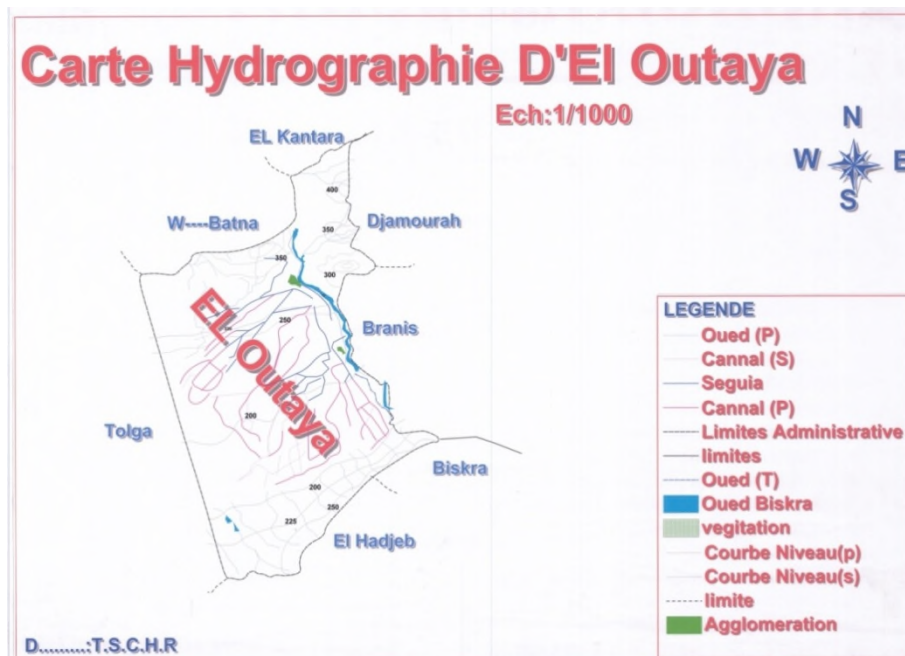


Fig.17 : Carte hydrographique d'El-Outaya

II-1-5- Conclusion

En conclusion, nous retiendrons que la région d'étude Ziban est soumise à un climat aride avec des tendances franchement sahariennes, caractérisé par des mois pluvieux en hiver et un été chaud et sec. Les précipitations d'une moyenne annuelle de 157.07 mm sont d'origine orographique et la température moyenne annuelle est de 21.88 °C. Cette forte chaleur est due à la concentration des masses d'air chaud du Sahara, ce qui donne une augmentation sensible de l'amplitude thermique favorisant ainsi une intense évaporation.

L'évapotranspiration est très importante dans le secteur étudié, elle est de 1038.89mm entraînant une reprise totale de toutes les précipitations par l'évaporation et engendrant une période sèche couvrant toute l'année. Ce déséquilibre entre les précipitations et l'évaporation montre **la nécessité d'une irrigation importante pour l'agriculture utilisant surtout les eaux souterraines.**

L'estimation de l'infiltration par le biais du bilan hydrologique proposé par Thornthwaite -- ne s'adapte pas à ce type de climat. En effet, ce bilan montre un déficit durant tous les mois de l'année ce qui impliquerait une infiltration annuelle nulle (à l'exception du mois de janvier).

En régions arides les précipitations, faibles et occasionnelles, induisent un drainage climatique nettement déficitaire pendant la plus grande partie de l'année. Les écoulements, superficiels (oueds) ou hypodermiques, y sont le plus souvent temporaires. Ils atteignent des zones de concentration qui sont les lieux privilégiés de manifestations salines dans les eaux et dans les sols.

Chapitre III : Contexte géologique et hydrogéologique

Introduction

L'étude géologique d'une région est indispensable pour pouvoir déterminer les formations susceptibles de contenir des nappes aquifères à partir de leur lithologie. La connaissance de la nature lithologique de terrains ainsi que leur structuration permettent d'expliquer certains paramètres hydrogéologiques des sous-sols et des eaux qui s'y trouvent dans un bassin donné, du fait, nous donnerons dans ce qui suit les **principaux traits des formations présents dans notre région d'étude ainsi que les ressources hydriques souterraines qui s'y trouvent.**

De nombreux auteurs qui ont travaillé sur la région; essentiellement les Aurès et El-Hodna. Parmi eux, nous avons exploité les descriptions fournies par Laffitte (1939), et Guiraud (1973, 1990) ainsi que les conclusions des travaux de Chabour (2006), Chebbah (2007), Hamel (2009), Brinis(2011) et Boutouga (2012). Nous pensons que ces travaux assez cohérents peuvent nous donner une conclusion sur la géologie de la région d'étude.

Il a paru utile d'indiquer la part attribuée aux différentes formations géologiques comme source du matériau alluvionnaire et comme roches mères. Les roches mères de ces régions sont sédimentaires et d'âges secondaire, tertiaire et surtout quaternaire (flandrin, 1952 ; S.N.repal, 1952 ; Cornet, 1952 ; Estorges, 1962 ; 1965 ; Mahrour, 1965 ; Caratini, 1967 ; Pouget, 1980 ; Trayssac, 1980 in Halitim, 1988).

Le Sahara est une énorme dalle où cet ensemble renferme encore de gros gisements d'hydrocarbures et les nappes aquifères (Fabre, 2005) ; vieux massif primaire à deux chaînes de montagnes, fut recouvert plusieurs fois par la mer jusqu'au secondaire laissant des couches sédimentaires relativement épaisses selon les endroits. Au tertiaire, la mer, se retirant définitivement, laisse derrière elle, des bras de mer, lagunes et lacs. A la fin de cette période, formes du relief saharien sont à peu près les mêmes qu'aujourd'hui. Au quaternaire, l'érosion se poursuit sous un climat à périodes alternées d'humidité et de sécheresse. (Toutain, 1977).

Le Bas Sahara forme un vaste bassin sédimentaire entre les Tassilis et l'Atlas saharien. Sa plus grande partie est recouverte de sables qui surmontent d'épaisses formations (=4000 m) sédimentaires, essentiellement détritiques, carbonatées ou évaporitiques. Sa structure est d'une apparence simple mais mal connue et on admet la superposition discordante de

formations récentes sur un substratum plissé et faillé. Le Bas-Sahara a désormais atteint sa structure actuelle en cuvette synclinale dissymétrique bordée à l'ouest, au sud et à l'Est par des bancs à pendages faibles tandis qu'au Nord une fosse profonde se creuse au pied de l'Aurès et redresse presque à la verticale des sédiments déposés. (Halitim, 1988).

III-1- Géologie régionale et locale:

La région de Biskra est prise au sens large du terme, et ses limites sont approximatives. Elle forme une zone de transition progressive entre le domaine atlasique et le domaine saharien septentrional car la continuité géologique de part et d'autre de l'accident sud atlasique est vérifiée entre Branis et Chetma. (Chebbah, 2007).

C'est une région « synorogénique » liée principalement à la tectonique de l'orogène atlasique (alpine). A tous moments les phénomènes tectoniques synsédimentaires d'ampleurs diverses commandent la sédimentation, par conséquent le devenir des bassins. Les relations tectonique-sédimentation sont étroitement liées. La région a vécu du Miocène au Quaternaire et en partie à l'actuel. Elle appartient à un ensemble d'aires sédimentaires diachrones plus ou moins indépendantes qui se sont surimposées à l'orogène telléen ou hercynien (Guiraud, 1990 in Chebbah, 2007).

Dans toute la région, les parties centrales des bassins sont formées par une suite de vastes dépressions remplies de sédiments quaternaires (et miopliocènes par endroits), séparées par des reliefs montagneux limités ou recoupés par des accidents transverses : des seuils (paléostructures) sur lesquels affleure le Néogène (Miocène et Pliocène). Les massifs bordiers, tant au Nord qu'au Sud de l'accident sud-atlasique, montrent des affleurements importants. Le type de l'érosion, l'absence ou la rareté de la végétation, ont permis de lever des coupes dans les sédiments siliciclastiques ou confinés sur les marges des bassins, déposées tout le long du néogène. (Chebbah, 2007).

Donc, Le territoire de la wilaya de Biskra est constitué par des formations marines, lagunaires et continentales d'âges variant du Trias au quaternaire. (O.R.G.M, 1998). (Fig.18) :

-les dépôts triasiques constitués par des marnes, gypses et sel gemme ont une extension très limitée : un seul affleurement à l'extrémité nord de la wilaya (Djebel- Melah).

-les calcaires et marnes du Jurassique, peu développés, affleurent à l'extrême nord-ouest de la wilaya (Djebel Ez-Zerga).

- les roches terrigènes et carbonatées (grès, calcaires, marnes, dolomies, argiles) du Crétacé, constituent les formations montagneuses de l'Atlas Saharien situées au Nord de la Wilaya (Djebel El Azreg, Djebel El Ksoum).

-les dépôts paléogènes (marnes, calcaires à interlits de silex, gypse, phosphates, grès conglomérats) sont répandus essentiellement dans la zone de transition de l'Atlas Saharien au plateau Saharien et sur les flancs des synclinaux.

-les dépôts miocènes (marnes, calcaires, argiles, gypse, conglomérats, grès) reposent en discordance angulaire sur ceux du Paléogène et du Crétacé. Ils sont répandus dans la zone de transition de l'Atlas Saharien au plateau Saharien.

-le Pliocène représenté par des conglomérats, grès, argiles gréseuses, gypse, est largement répandu à l'Ouest de la wilaya.

-les formations proluviales, alluviales, lacustres et éoliennes du Quaternaire (galets, limons, limons sableux, sables, argiles, conglomérats) sont répandues dans la dépression d'El-Outaya et les dépressions intra montagneuses.

Elles occupent la majeure partie du plateau Saharien où sa partie Nord est affectée de cônes de déjection tandis qu'au Sud apparaissent les Chotts et les massifs de sables éoliens. Aux différentes complexes lithos stratigraphiques, correspondent des substances utiles aptes à tel ou tel usage (O.R.G.M, 1998) :

Tableau.19 : Différentes complexes lithos stratigraphiques et leurs substances utiles (O.R.G.M, 1998)

complexes lithos stratigraphiques	substances utiles
Dépôts du Crétacé	Gypse, grès quartzeux, agrégats
Dépôts de Trias	Sel gemme, gypse
Dépôts du Paléogène	Agrégats, gypse, Célestine, phosphate, argile
Dépôts du néogène	Gypse, roches argileuses
Dépôts du quaternaire	Sel gemme, sable, graviers

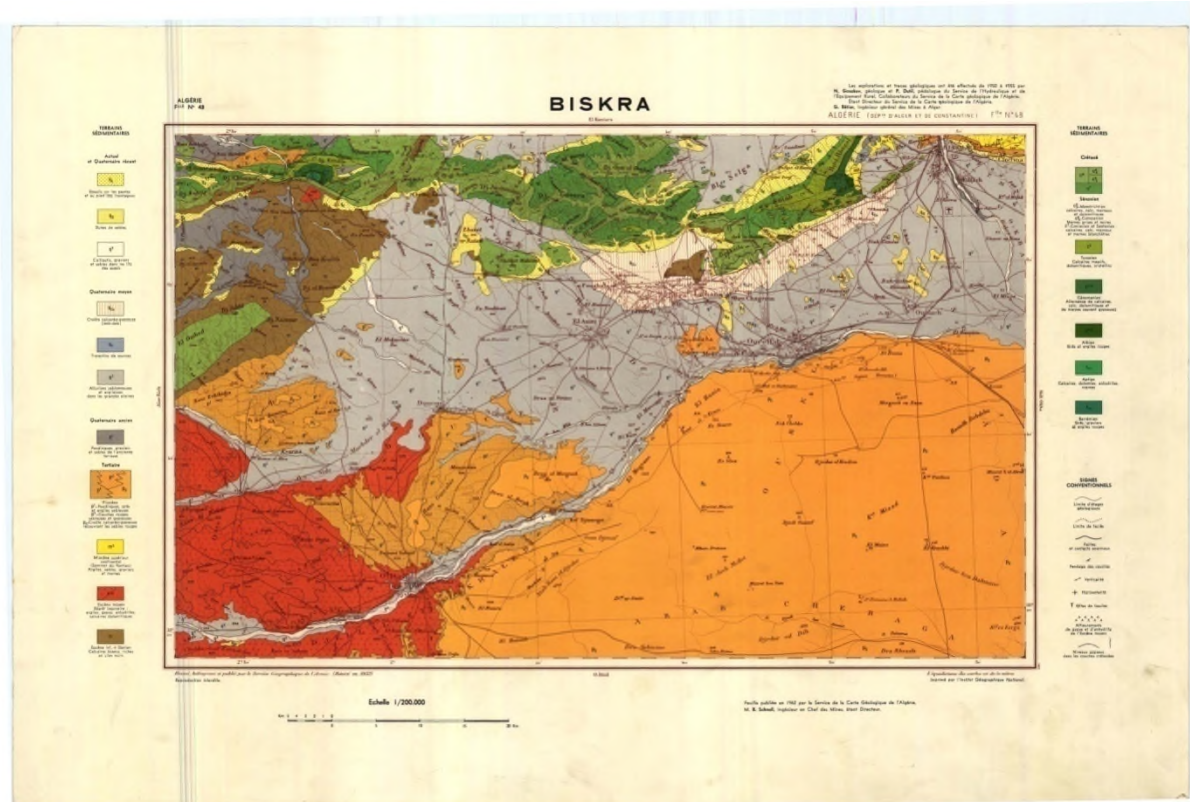


Fig. 18 : Carte géologique de Biskra (échelle : 1/200.000).

La région de Biskra se caractérise par des terrains sédimentaires, allant du Barrémien à la base jusqu'au Quaternaire (fig.19 et fig.20). Au Nord, c'est un pays montagneux tandis qu'au Sud, c'est un pays effondré qui fait partie du Sahara Septentrional. Le passage entre ces deux domaines distincts se fait par l'intermédiaire d'un ensemble de flexures, de plis-faillés et de failles d'orientation Est Ouest appelé "Flexure Saharienne".

Il s'agit donc, d'une région de contact entre deux domaines morfo-structuraux différents : l'Atlas saharien et le Sahara. Cette situation géographique confère à la région, par le contraste structural et son rôle de transition, une certaine identité géomorphologique assez particulière. (Aidaoui, 1994).



Fig.19 : Carte géologique simplifiée de la région de Biskra (Chebbah, 2007).

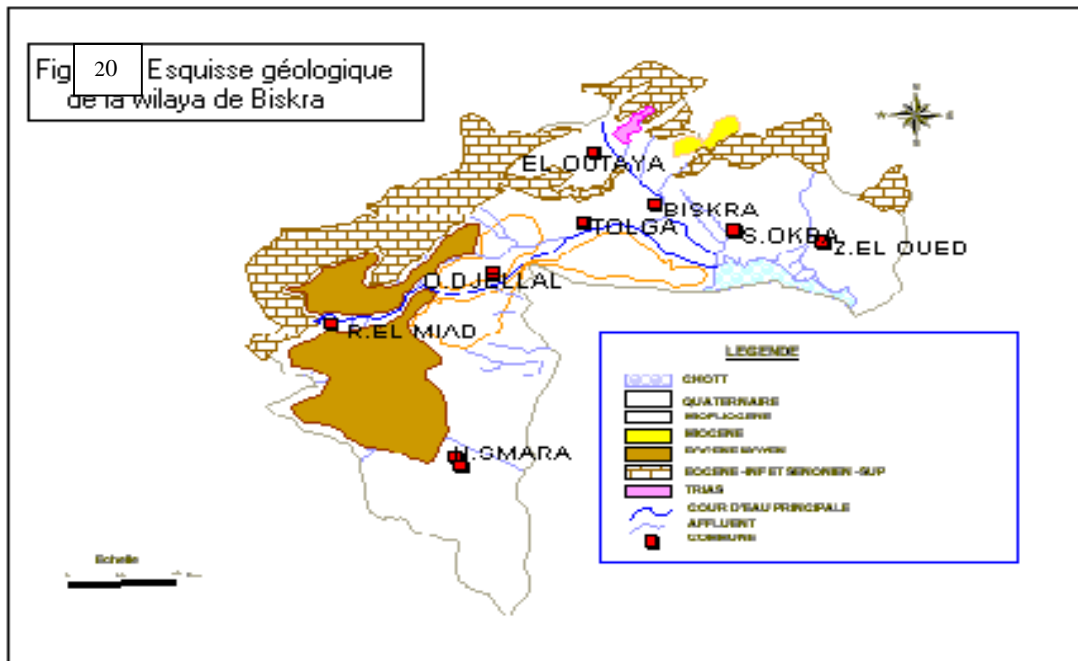


Fig. 20 : Esquisse géologique de la wilaya de Biskra.

III-1-1- Zab Chergui : Contexte Géologique et Hydrogéologique

Au Nord du Bas-Sahara, les Ziban sont donc des oasis de piémont, au pied des montagnes (Mons du Zab et l'Aurès) ; c'est une région de plaine et de cône-glacis. Les glacis plongent doucement sous une plaine alluviale, qui résulte de la conjugaison des cônes comme ceux des oueds de l'Aurès. (Aidaoui, 1994).

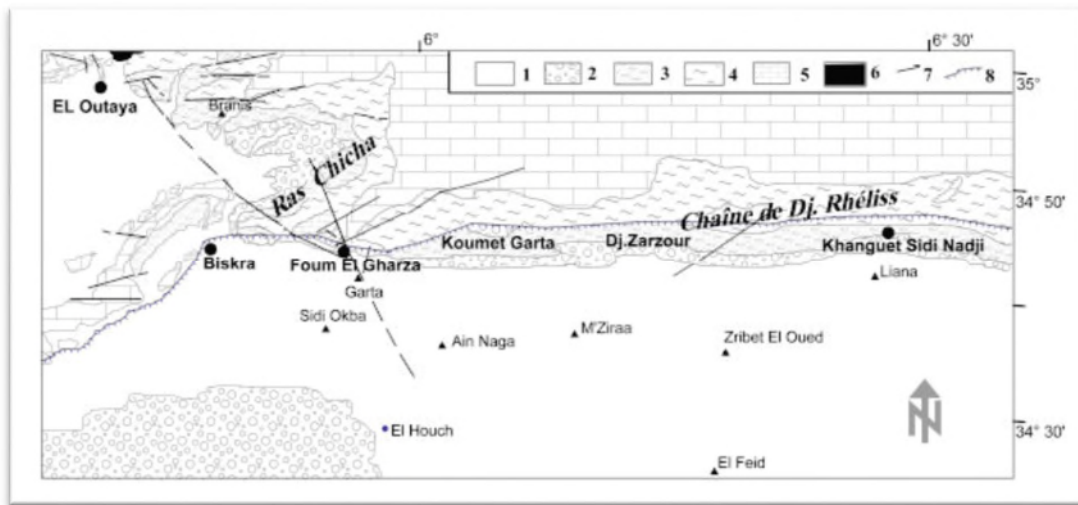
Au pied des Aurès de larges affleurements des calcaires sénoniens et éocènes plus ou moins relevés par l'accident atlasique, dans le Zab Chergui, ces calcaires s'enfoncent trop rapidement pour maintenir une nappe utilisable. (Fig.21). (Dubost, 2002).

Du point de vue géologique, le domaine saharien est commandé essentiellement par une sédimentation marine et lagunaire, il en résulte une grande variété de terrains calcaires, dolomitiques et marneux. (Aidaoui, 1994). La série néogène dans la région de Sidi Okba, traversée par plusieurs dizaines de forages, est constituée d'une alternance d'argiles, d'argiles sableuses ou sables argileux et de sables avec des passées graveleuses. Dans cette série deux sous ensembles se différencient, avec à la base un sous-ensemble argilo-sableux (ou gréseux) et au sommet un sous-ensemble argilo-sableux et graveleux (Chebbah, 2007).

La région d'étude fait partie du grand bassin versant saharien du Chott Melghir principalement drainé par oued Abdi et oued El Haï qui devient dans sa partie aval oued Biskra. La nappe du Miopliocène dite de sables constitue la ressource hydrique principale dans la région et ces eaux sont mobilisées, surtout, pour l'irrigation agricole. Son hydraulique de la nappe des sables est hétérogène; il est constitué le plus souvent de couches aquifères de diverses perméabilités et d'épaisseurs. Cette nappe est fortement exploitée dans la partie Est de la Wilaya de Biskra, notamment dans le Zab chergui (Sidi Okba, Ain Naga et M'zirâa) et sa profondeur varie de 100 à 900 m (Messameh et al 2009).

Cette plaine est découpée par les lits des oueds issus des Aurès. Les formations superficielles associées sont composées par de limons et de sables à débris végétaux. Ces dépôts ont développé des sols riches en débris organiques donnant lieu à des îlots très fertiles. La prospérité de la plaine du Zab Chergui, partie du grand bassin versant saharien du Chott Melghir, est due aux apports limoneux issus des épandages de crues de nombreux oueds des Aurès (oued Biraz, oued Abiod et oued Melah). (Aidaoui, 1994; Bougherara et Lacaze, 2009 ; ANRH, 2011).

La vaste plaine du Zab chergui représente la plaine comblée du bassin beaucoup plus vaste (le Bas-Sahara), qui s'étend jusqu'au pied du massif de l'Aurès. Le Zab chergui a ses oasis et terres de cultures dispersées dans la plaine de Sidi Okba ; Drah se situe dans une vallée, au Nord-Ouest de Sidi-Okba, à une altitude de 200 mètres ; Chetma à 116 m d'altitude. Sur les cônes-terrasses en bordure de l'Aurès, se situent : Garta à 80 mètres d'altitude, Seriana à 100 mètres d'altitude, enfin plus loin vers le Sud Sidi Okba à 60 mètres d'altitude. (Aidaoui, 1994).



1 : Quaternaire, 2 : Pliocène, 3 : Miocène supérieur, 4 : Miocène inférieur et moyen, 5 : Substratum, 6 : Trias, 7 : Failles, 8 : Accident sud atlasique.

Fig.21 : Carte géologique simplifiée du bassin des Chotts (Chebbah et al. 2012).

III-1-2- Zab Gharbi: Contexte Géologique et Hydrogéologique

A l'Ouest de Biskra s'étend le Zab Gharbi, où sont localisées les palmeraies de tous les Ziban. Ces palmeraies sont divisées par les conditions naturelles en deux parties :

- Une ligne de palmeraie, située au Nord de Ain Ben Naoui jusqu'à Foughala,
- Une ligne située au Sud, à proximité de l'axe de l'oued Djedi.

Les palmeraies d'amont sont situées dans une plaine qui correspond à un cône de déjection à l'Ouest de Biskra ; celui-ci est adossé aux chaînes de petits reliefs du Zab. Les altitudes prises aux pieds des reliefs varient entre 164 m à Lichana ; 155 à 148 mètres à Foughala et 131 mètres à El-Amri (El-Ghrous), au Sud-ouest de Tolga. En aval, la plaine s'étend au Sud du précédent, comprenant les palmeraies situées sur la rive droite de l'Oued Djedi ; les altitudes de ces palmeraies varient entre 95 et 180 mètres, l'altitude du lit de l'oued est de 100 à 25 mètres de l'Ouest à l'Est. Entre les deux lignes de palmeraies, s'étend une dépression d'une dizaine de kilomètres de largeur qui est dépourvue de palmeraies. La plaine du Zab Gharbi est caractérisée par une formation calcaro-gypseuse « deb-deb », atteignant un ou deux mètres d'épaisseur. (Aidaoui, 1994).

Les glacis du Zab occidental sont dominés par une série de massifs isolés de moindre importance (Djebel Bourhezal 500 m). Les torrents dévalant les flancs de ces massifs ont un effet limité, d'autant que ces Djebels ne reçoivent en moyenne que 150 mm de pluie par an en raison de leur faible altitude et de leur position d'abri sur le flanc sud de la chaîne atlasique, d'où l'absence de grands cônes de déjection et de sols enrichis par l'épandage des crues. L'absence de subsidence a laissé les formations calcaires de l'Eocène inférieur, réservoir important d'eau souterraine, proche de la surface d'où l'importance de la salinité et des encroûtements gypseux. Cette situation est restée très longtemps défavorable aux cultures maraîchères, mais convient assez bien à la phoeniciculture (nappes souterraines proches de la surface). (Bougherara et Lacaze, 2009).

III-1-3-la plaine d'El-Outaya

Le bassin d'El-Outaya fait partie de la région de M'Doukal- Biskra qui forme une zone charnière raccordant les deux grands ensembles atlasiens : l'Atlas Sahariens et l'Aurès décalés selon un mouvement dextre ; une région qui se caractérise sur toutes les cartes quelle qu'en soit l'échelle et ceci pour les raisons suivantes :

- Parce que ses limites avec les domaines voisins sont, dans l'ensemble, nettes et lui donnent une forme approximativement trapézoïdale.
- Car elle correspond à la zone dans laquelle le domaine atlasique est le plus étroit en Algérie.
- Parce que de nombreux accidents, de directions diverses, l'ont affectée à plusieurs reprises, morcelant les structures et favorisant l'accumulation des séries néogènes puissantes et variées (Guiraud R., 1990 in Rechachi, 2010).

C'est un bassin particulier par ses dimensions réduites (30 x 70 Km), sa forme losangique limitée par des failles (E-W, NW-SE et NE-SW) ainsi que par sa position dans le domaine atlasique. Il s'agit d'une plaine subsidente orientée sensiblement E.NE-W.SW et située entre deux anticlinaux. Elle se trouve au nord de l'anticlinal du Dj.Boughzel (Biskra) et au sud du dôme de Djebel EL Melah (El-Outaya) et sous laquelle s'annoient les plis de l'Aurès. (Chebbah, 2007).

C'est une plaine qui a fonctionné comme un bassin de sédimentation pendant tout le Néogène. Et si, aujourd'hui, il ne remplit pas ce rôle dans sa partie NE, au contraire à la partie SW de nombreux oueds apportent leur alluvions et il forme aussi un sous-bassin fermé au niveau de

Bled Selga. Au niveau des zones basses, les alluvions deviennent plus argileuses et sont souvent salés ou hyper-salés. (Chebbah, 2007). (Voir fig.4 b page21).

C'est dans ce bassin, près du village de Branis, que le continental terminal (Miopliocène) a été signalé pour la première fois dans les Aurès par Fournel. C'est aussi dans ce bassin que les termes de la série néogène ont été différenciés, ultérieurement, par Laffitte. Il s'agit d'un bassin néogène, bien développé, constitué à la base par un Miocène laguno-marin (Bled Zemla, Branis, El-Outaya), recouvert par du Messinien (Pontien) gréseux fluviatile, puis par des poudingues pliocènes (Ras Chicha). Les termes supérieurs, plus particulièrement pliocènes, sont fortement inclinés vers le centre du bassin où ils disparaissent sous une épaisseur considérable du Quaternaire ; leur relèvement à la périphérie du bassin indique que celui-ci a été affecté par des mouvements les plus récents du Quaternaire basal (Chebbah, 2007). Les dépôts alluvionnaires du quaternaire dont se sont formés les sols de la plaine proviennent des formations géologiques de nature gypso-calcaire et salifère (sel gemme, argile brun rouge tortoniennes, argile gypseux helvétienne, etc) des massifs érodés qui entourent la plaine (Fig. 22a). Ces formations constituent des sources potentielles de sels solubles, de gypse et de calcaire qui vont se jeter dans la plaine. Au nord-est de la plaine, les affleurements de grés, de sable, de marnes (Helvétien) et de gypse constituent les massifs érodés de Dj.Foum Zgag, Dj.Mohar, ainsi que du Trias (ancienne formation de la région) formé d'argiles gypsifères et salifère se manifeste en grand dôme de Dj.Malah. Au sud-ouest et Nord-Ouest, les affleurements composés de calcaire massifs, de dolomie et de marnes sont représentés par les massifs érodés de Dj.Gouara, Dj.Oum Djenib. Au sud, les affleurements de marnes et marno-calcaires constituent l'essentiel des massifs érodés des Dj. Boughzal, Dj.Guibene et Dj.Tenia.(Fig. 22b). Les accumulations éoliennes forment les nebkas pièges où le sable est piégé par des touffes de végétation clairsemée sont bien représentées surtout dans la partie ouest de la plaine. (Abdelhafid, 2011).

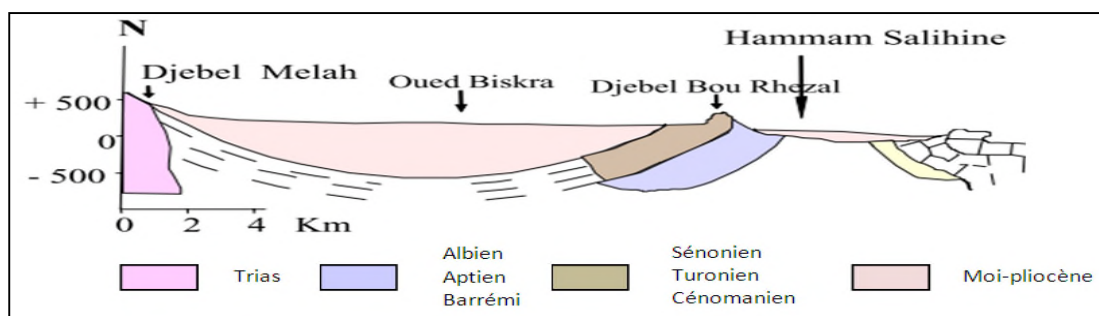


Fig. 22a: Diapir de sel d'El-Outaya
(Source : Abdelhafid, 2011 ; d'après cartes hydrogéologiques ANRH, 1980)

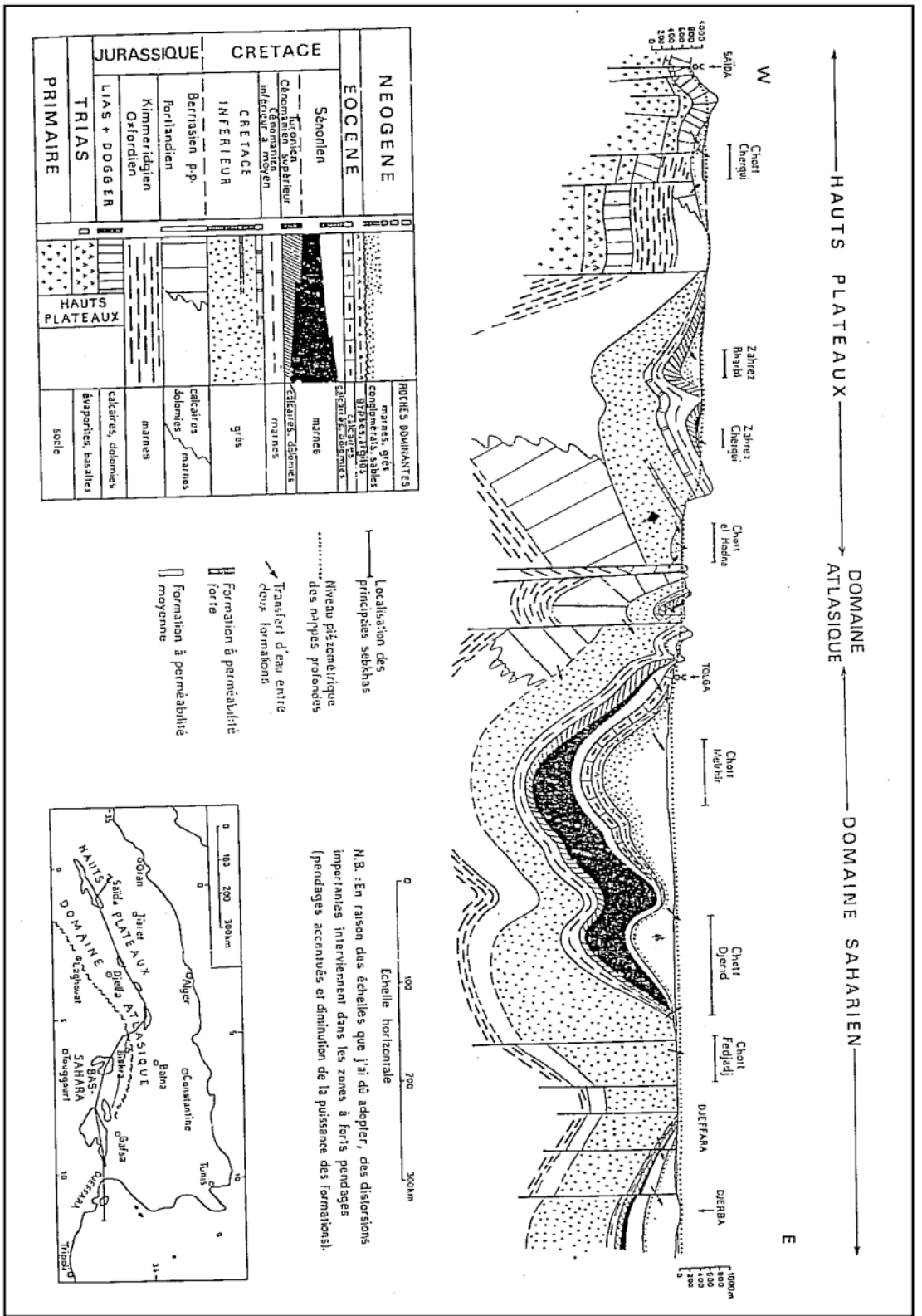


Fig. 22 b: Coupe hydrogéologique schématique des différents domaines dans la région de Biskra

(d'après GUIRAUD, R., 1973)

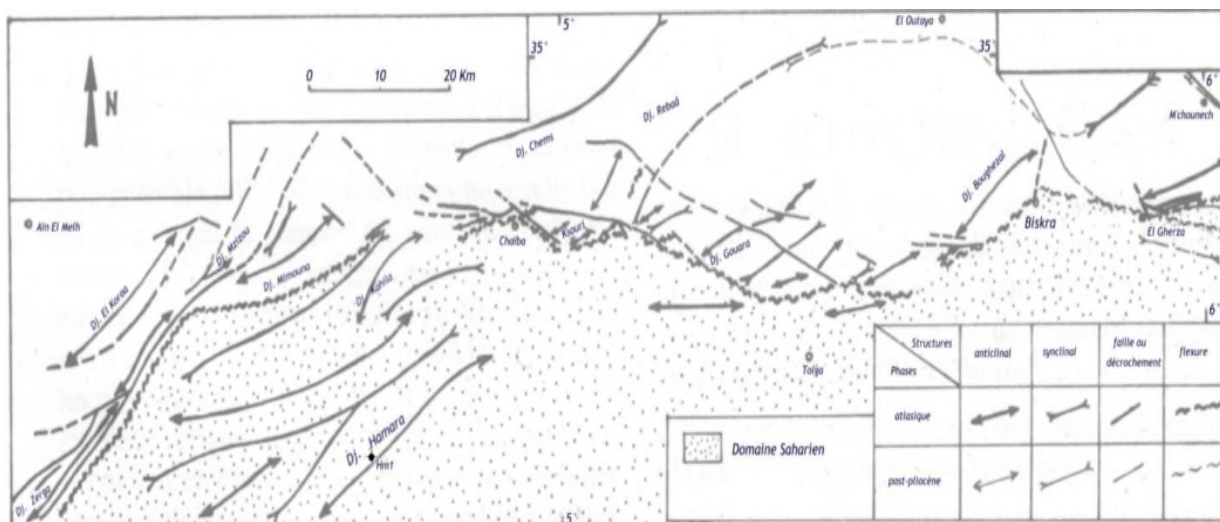


Fig.23: Tracé de l'accident sud atlasique au Sud du Hodna (d'après Guiraud 1990)

III-2- Cadre lithostratigraphique

Les différentes formations décrites sont tirées de quelques coupes géologiques et de logs de forages. Les cartes utilisées dans cette étude sont : la carte géologique de Bistra 1/200000 utilisée en coordonnées géographiques et la carte hydrogéologique de Biskra 1/200000 (carte publiée en 1979 par la direction des études du milieu et de la recherche hydraulique utilisée en coordonnées UTM 31), ainsi que d'autres cartes, à titre d'exemples, réalisées par Laffite (1939), Guiraud (1973, 1975, 1990), ANRH (1980) et Chebbah (2007, 2012).

L'extension de certaines nappes dépassant de loin la zone étudiée, les changements de facies très fréquents sur des horizons, ainsi que des influences des structures géologiques limitant notre zone nous oblige à faire une description géologique de toute la région. On distingue de bas en haut :

III-2-1- Le Trias:

Il affleure au Nord d'El Outaya, au Djebel El Melah, le plus connu au Nord de l'Afrique, Il s'agit d'un dôme salifère triasique, long de 4 km, dont les sommets dominant la plaine d'El Outaya de plus de 300 m. (Brinis, 2011). Le Djebel el Melah d'El Outaya, comme celui du Metlili, correspondent à des extrusions de type pseudo-diapirique, localisées dans les zones de convergence de plusieurs accidents importants. (Guiraud, 1975). Il est caractérisé par la conservation de sel gemme en affleurement, qui forme la masse de cette montagne, où il est

associé à des lambeaux dolomitiques liasiques ou à des petits affleurements d'argiles bariolées (fontaines des gazelles, Branis et Djemoura) est, au milieu desquels on trouve les cristaux fréquents de ce faciès, tels que : l'aragonite, l'anhydrite, la dolomie, le quartz bipyramide et l'hématite. (Chebbah, 2007 et Hamel, 2009). Le Trias est, souvent remarquable sur le terrain par son faciès évaporitique. (Boutouga, 2012).

Sur la marge septentrionale de la plate forme saharienne, il est formé à la base d'une série grés-argileuse de plus de 400 mètres d'épaisseur, surmontée d'une formation, essentiellement, composée d'évaporites (sel massif et anhydrite), d'argiles et de carbonates appelée "le salifère principal".(Chebbah,2007).

L'attribution de ces terrains au Trias est confirmée par la tectonique qui montre que le sel gemme vient de la profondeur, car il a remonté avec lui des fragments de sa couverture, entre autres des dolomies du Lias. L'abondance du sel qui caractérise cet affleurement est dû au fait que cet époinement étant récent ; ce diapir est post Miocène, le sel n'a pas eu le temps d'être dissous. (Chebbah, 2007 et Hamel, 2009). Les «Montagnes de sel » d'El Outaya et du Metlili représentent par ailleurs d'éventuelles ressources non négligeables, peu ou pas exploitées pour l'instant. (Guiraud, 1975).

III-2-2-Le Lias:

On le rencontre dans un endroit très restreint au Nord-Est d'El Outaya où il est caractérisé par une sédimentation dolomitique (dolomies bréchoïdes). Comme le Trias, le Lias est inconnu en position normale et quand on le rencontre, il est emballé dans le Trias sous forme de lambeaux constitués d'argiles schisteuses (Menaâ, centre Aurès) ou de dolomies (El Outaya) foncées éventuellement pyritifères souvent fissurées, parfois bréchoïdes ; constitue à la bordure sud et nord-ouest du Djebel El Melah des paquets en relief pouvant atteindre 500 X 200 m ; il en existe également plusieurs blocs de 50 m à 150 m dans le massif, notamment à son point culminant. A l'Ouest de l'Aurès (Atlas saharien oriental), il est représenté par des calcaires jaunes et bleus à Bélemnites et Foraminifères du Toarcien inférieur. Par contre, sur la marge septentrionale de la plate forme saharienne, il est formé de calcaires oolithiques et de dolomies et se charge en anhydrite en allant vers le sud. (Chebbah, 2007 et Brinis, 2011).

Dans l'Atlas saharien, le Lias débute par un niveau carbonaté. Il est formé par une série inférieure comportant des calcaires et des dolomies massives. La série supérieure est essentiellement argileuse. Le Dogger montre une série à faciès argilo-gréseux dépassant

parfois les 2000 mètres d'épaisseur. Le Malm présente des faciès d'influence marine sous forme de sables et de grès, d'argiles et de calcaires. (Chabour, 2006).

III-2-3-Le Jurassique:

Aucun affleurement du Jurassique n'est à signaler dans toute la région de Biskra, Il n'est visible qu'entre Biskra et Batna (Boutouga, 2012), au cœur de l'anticlinal de djebel El Azreg, situé au N-W de la vallée d'Oued el- Abiod, où ont été identifiés les étages, du centre vers la périphérie, tels que : le Kimméridgien, Portlandien et le Berriasien. La série débute par une succession marno-calcaire et devient de plus en plus carbonatée vers le sommet. Ce sont les terrains les plus anciens visibles en position normale. L'ensemble de ces terrains carbonatés est mentionnée sur la carte géologique de Laffite, par J7, du fait de la difficulté de les subdiviser à cause de la rareté des fossiles qu'ils contiennent. L'ensemble de l'unité qui va de la base du Kimméridgien au sommet du Berriasien est désigné sous le terme Jurassique supérieur. (Hamel, 2009).

-Le Kimméridgien : Il est subdivisé en Kimméridgien inférieur, et Le Kimméridgien supérieur. Il s'agit des terrains les plus anciens reconnus en position normale dans le massif de l'Aurès où il forme une boutonnière entre les vallées de l'Oued Abdi et de l'Oued Abiod (anticlinal de Dj El Azreg). Il se scinde en deux ensembles bien distinctes avec : - Un ensemble carbonaté basal, d'une épaisseur de 250 à 300 m, qui se rapporte au Kimméridgien inférieur. Il est formé de calcaires marneux, de marnes jaunâtres, de calcaires silicifiés multicolores à intercalations de marnes rouges surmontés de calcaires, de marnes et de calcaires bréchoïdes à débris de crinoïdes, d'échinides et de bryozoaires et à cristaux de quartz. Ensuite viennent des conglomérats à intercalations marneuses à débris d'organismes récifaux associés à des bélemnites, des calcaires et des calcaires marneux ou granuleux. Cet ensemble se termine par une alternance de calcaires et de marnes. - Un ensemble marneux sommital, d'une épaisseur de 400 m, monotone admettant dans sa partie médiane des intercalations de calcaires marneux à lamellibranches. Cet ensemble forme le cœur de l'anticlinal de Dj. El Azreg. (Chebbah, 2007 et Brinis, 2011).

-Le Portlandien et le Berriasien: Cette formation, d'une épaisseur de 250 à 300 m, se présente sous deux faciès bien distincts, mais qui passent progressivement de l'un à l'autre, formant entre eux un passage latéral progressif avec un faciès calcaro-marneux au NW et un faciès dolomitique au SW du massif aurésien : - L'ensemble calcaro-marneux, peu fossilifère, est formé de calcaires en bancs siliceux blanchâtres violacés surtout à radiolaires et de marnes

à ammonites pyriteuses admettant quelques intercalations de calcaires argileux et de calcaires pisolithiques à brachiopodes, lamellibranches, polypiers et échinodermes à leur sommet. - L'ensemble dolomitique est formé de dolomies azoïques à rares passées de calcaires et de marnes à bélemnites et forme en majeure partie le flanc sud de DJ. El Azereg. Au-delà de l'accident sud atlasique, les dépôts jurassiques ne sont connus qu'au Sud tunisien. Ils sont formés une alternance de dolomies, de calcaires et de marnes avec des gypses à brachiopodes, crinoïdes, échinidés, gastéropodes et lamellibranches attribués au Bathonien - Kimméridgien. (Chebbah, 2007).

III-2-4-Le Crétacé:

Le Crétacé affleure dans l'Atlas saharien et sur les bords du Sahara. L'importance du Crétacé vient, premièrement, du fait de l'étendue des affleurements très importantes et de la grande extension qui a permis le dépôt de séries sédimentaires sur une aire très étendue et qui sont le siège d'importants aquifères au Sahara.(Chabour, 2006).

Deux séries s'individualisent dans les formations crétacées : une série gréseuse basale du Crétacé inférieur (Valanginien-Berriasien - Albien) d'une puissance de 2000 m environ, comportant parfois des lentilles de marnes ou de calcaires et une série marno-calcaire sommitale du Crétacé supérieur (Cénomaniens – Maestrichtien-Danien) d'une puissance de 3000 m. (Chebbah, 2007 et Hamel, 2009).

III-2-4-1-Le Crétacé inférieur :

Pendant le Crétacé inférieur l'Atlas Saharien Oriental dans la région comprise entre le Hodna et les Aurès correspondait au prolongement septentrional de la plate-forme saharienne. Il était soumis alternativement à des influences marines et deltaïques (Chabour, 2006). Il est caractérisé par une prédominance de faciès gréseux et par une épaisseur considérable pouvant atteindre 2000m ; on distingue de bas en haut :

A. Le Valanginien :

Ce niveau présente dans les Aurès une succession de faciès indiquant une diminution progressive de la profondeur de la mer (milieu de sédimentation). Il ne se rencontre qu'au centre du massif de l'Aurès (Dj El Azreg). Il a une épaisseur de 150 à 200 m et subdivisé en trois parties: La partie basale du (Valanginien inférieur) est formée d'argiles et qui n'affleure qu'au niveau de Dj El Ezreg (centre des Aurès). Ces argiles présentent des ammonites

pyriteuses et à petits cristaux de gypse. La partie moyenne du Valanginien est caractérisée par une intercalation des calcaires à Ostracées et des grès. La partie supérieure: formée de grès et de calcaires pisolithiques. (Chebbah, 2007 et Brinis, 2011).

Le Valanginien est formé d'argiles blanches ou jaunes verdâtres à ammonites pyriteuses et à petits cristaux de gypse contenant, par endroits, à leur sommet des bancs calcaires qui se chargent en grès auxquels se superpose une alternance de marnes, de grès et des quartzites à bélemnites permettant quelques intercalations de calcaires à ostracées, de lumachelles et des calcaires pisolitiques. Plus à l'Ouest, il est représenté par des marnes à huîtres et de lumachelles. Son épaisseur est de 150 à 200 mètres. Au-delà de l'Accident Sud Atlasique, il devient lagunaire et il n'est connu que dans le Sahara tunisien. Cet étage est caractérisé surtout par des Céphalopodes et Ammonites. (Chebbah, 2007 et Hamel, 2009).

B. L'Hauterivien :

La présence d'algues dans ce niveau a été signalée par R.Lafitte, ce qui témoigne d'un milieu de sédimentation très peu profond. (Brinis, 2011). Cet étage est caractérisé par la disparition des fossiles. (Hamel, 2009). Deux faciès se distinguent dans l'Hauterivien de l'Aurès : un faciès calcaro-gréseux caractérisé par des calcaires pisolitiques à algues au SW et un faciès gréseux dolomitique peu fossilifère au NE. Il est formé de calcaires coquilliers (mollusques, échinidés), de calcaires pisolitiques (ou oolithiques), de calcaires gréseux et de grès friables à stratifications entrecroisées avec parfois des quartzites et des dolomies au sommet de la série. D'une épaisseur d'environ 450 m, ces différents termes montrent d'importantes variations de faciès (latérale ou verticale) et correspondent à des dépôts peu profonds (côtiers). (Chebbah, 2007).

C. Le Barrémien :

Cette période est caractérisée par une régression maximale. Dans l'Atlas Saharien, le Barrémien se compose essentiellement d'une mégaséquence argilo-gréseuse continentale et d'alternance de calcaires plus ou moins dolomitiques. Dans le Nord-Est de la plateforme saharienne, il est constitué par des grès rouges avec des intercalations argileuses. (Chabour, 2006). Au sud de la plaine d'El-Outaya, à Koudiat El Leham (anticlinal de djebel Boughezal), se voient sur 20m d'épaisseur, des argiles rouges légèrement gréseuses sans fossiles marins mais avec du bois fossile, démontrant l'origine continentale et subaérienne de cette formation. Selon (Laffite, 1939), ce lambeau représente les strates les plus anciennes visibles dans cet

anticlinal et vu sa faible épaisseur, il ne doit représenter que le Barrémien, qui termine la série sédimentaire crétacée qui affleure dans la région de Biskra.

Il affleure très largement dans les Aurès (DJ. El Azreg) et représente une période régressive. Il est constitué de grès à base bréchique, de calcaires, de marnes gréseuses et de dolomies massives, avec par endroits des calcaires marneux ou gréseux. Les grès sont très diversifiés (moyens, grossiers, à graviers) et souvent à stratifications entrecroisées. Les marnes ou argiles sont multicolores (vertes, rouges, ocre ou brunes). Au SW de l'Aurès, il est à dominance de grès à dragées et d'argiles rouges contenant, à leur sommet, des lentilles de gypse. Au NW, on trouve des quartzites à la base et des marnes marines fossilifères au sommet. Vers le N et le NW les quartzites de base s'intercalent avec des calcaires marins à foraminifères ou à céphalopodes. Son épaisseur diminue du Sud (400 m) au Nord (250 m), et près de la ville de Biskra (Dj. Bou Rhezal), il n'est représenté que par quelques mètres d'argiles rouges à bois fossiles. (Chebbah, 2007). Alors qu'au niveau de Dj. ElAzreg, en plus des quartzites, il y a une présence de petits lits de marnes bariolées qui deviennent de plus en plus nombreuses au sommet (bancs ne dépassant pas les quelques décimètres) et les grès deviennent exclusivement des grès à grains fins, et la stratification entrecroisée devient de plus en plus rare. Le faciès continental devient moins net. (Hamel, 2009).

D. L'Aptien : il affleure dans tous les anticlinaux de l'Aurès où il est caractérisé par un régime de sédimentation lagunaire avec quelques invasions marines, visible seulement vers Chaiba, il est représenté par des argiles, marnes versicolores, anhydrites, calcaires dolomitiques et dolomies sur une épaisseur de 60m environ. A Koudiat El Leham, il est représenté par des calcaires à orbitolines et des tubes d'annélides, sur une vingtaine de mètres d'épaisseur environ. Dans l'Atlas saharien, l'Aptien, partout, se termine par une barre calcaro-dolomitique qui est un excellent repère morphologique et stratigraphique. Dans la plate-forme saharienne, l'Aptien présente un faciès lagunaire avec intercalations marines : argiles et marnes, anhydrites, calcaires dolomitiques et dolomies. Dans la région de Biskra, sa puissance est d'environ 60 m. (Chabour, 2006). L'Aptien, d'une épaisseur de 250 m environ, se rencontre dans tous les grands anticlinaux de la région (Dj. Metlili, DJ. El Ezreg, Ahmar Kadou, Bou Rhezal.). Il est formé de marnes à ammonites, de calcaires marneux, de marnes à bancs calcaires, de calcaires à intercalations marneuses, de calcaires gréseux ou massifs à orbitolines ou polypiers et se termine par une alternance de calcaires et de marnes. Il est formé d'un Aptien inférieur marneux à échinidés, ostracés, brachiopodes et rares ammonites et d'un Aptien supérieur à rudistes et orbitolines et se termine par un niveau marno-calcaire. Vers le

SE du massif de l'Aurès, le caractère gréseux des faciès s'accroît avec la présence d'une importante alternance de couches gréseuses et de calcaires à la base. Plus au Sud (Dj. Bou Rhezal) seul l'Aptien supérieur est présent avec des calcaires tendres à orbitolines et qui sont plus clairs que ceux du Nord (Dj. El Azreg). Sur la marge septentrionale du Bas Sahara, il est formé de dolomies et de calcaires à orbitolines avec des intercalations argileuses au sommet. Vers le Sud, ce sont les argiles qui prennent de l'importance dans la série. (Chebbah, 2007). Le faciès continental est toujours présent dans cet étage. (Brinis, 2011). Son épaisseur est d'environ 100 m et ces différents termes forment ce qu'on appelle la « Barre aptienne ». (Chebbah, 2007). Son épaisseur augmente aux environs de Chélia pour atteindre les 400 m. (Hamel, 2009).

E. L'Albien : il débute dans l'Aurès par des alternances de grès et de marnes atteignant souvent 150 à 200m d'épaisseur, devenant bariolés à rougeâtres vers le Sud-ouest. Par la suite, les calcaires tendent à se substituer aux grès, tandis que les faunes pélagiques font leur apparition. Il affleure dans la dépression de l'anticlinal du djebel Bourhezal et au Nord -Est de Chaiba, à la limite nord du Bas Sahara, constitue en majeure partie par des grès rouges ou grès avec intercalations d'argiles rouges, sa puissance est d'environ 250m. Il est très difficile, au niveau de l'Atlas saharien de le différencier de l'Aptien ; l'Albien inférieur est argilo-gréseux (épaisseur 350 m) alors que l'Albien supérieur est calcaro-dolomitique (350 m). Au sud dans la plate-forme saharienne il est constitué en grande partie par des grès avec des intercalations d'argiles. L'Albien supérieur annonce la transgression marine qui va durer du Crétacé supérieur à l'Eocène. (Chabour, 2006).

L'Albien est très répandu, comme l'Aptien, dans les grands anticlinaux de l'Aurès ainsi que sur la marge septentrionale de la plate forme saharienne. Dans le domaine atlasique (Aurès), Il se présente sous deux faciès bien distincts : - Un faciès marno-gréseux basal formé d'une alternance, 150 à 200 m, de grès grossiers et de marnes contenant quelques bancs de calcaires à ammonites ou de quartzites au NE qui passe à des argiles bariolées et des grès rouges au SW du massif. - Un faciès carbonaté sommital représenté surtout par des calcaires à céphalopodes au NE passant à un faciès marneux gréseux au NW comparable au faciès basal, et à des calcaires subrécifaux à algues calcaires et orbitolines au SW. Dans l'anticlinal de Dj. El Azreg où il est le plus développé, il est subdivisé en trois termes : - A la base une alternance de grès et de marnes avec de rares intercalations de bancs de calcaires, d'une épaisseur de 200 m, avec une rareté de fossiles. Ces niveaux comportent des moules de Gastéropodes et des Brachiopodes. Le changement latéral de faciès est marqué uniquement par un changement de

la granulométrie des grès qui devient de plus en plus fine en allant vers le N-E. - Viennent ensuite des assises peu différentes des précédentes et marquées par une tendance à la substitution des grès par les calcaires, l'ensemble est d'une épaisseur de 50 m. - Le niveau supérieur est constitué d'une alternance de calcaires lités et de marnes noires d'une épaisseur de 40 m. (Hamel, 2009). Prés de Biskra (Dj. Bou Rhezal), il est formé d'une alternance de grès friables, de marnes sableuses et (ou) gypseuses rouges, de calcaires dolomitiques ou des dolomies contenant quelques passages de lumachelles, de calcaires et d'argiles calcaires. La série la plus complète s'observe au environ de Dj Metlili. (Brinis, 2011). Sur les confins atlasiques, l'Albien présente une évolution progressive entre un faciès argilo-carbonaté à l'Est et un faciès gréseux à l'Ouest comparables à ceux rencontrés dans le massif de l'Aurès. A l'Est, d'une épaisseur de 160 m, il est formé de calcaires bioclastiques, oolithiques et glauconieux à orbitolines, de grès fins micacés et d'argiles noires. Par contre à l'Ouest, d'environ 100 m d'épaisseur, il est constitué de grès fins sableux à pélitiques entrecoupés d'argiles bariolées et de dolomies. Plus au Sud (Sahara septentrional), le faciès gréseux est représenté par des grès et des sables fins à très fins passant à des argiles multicolores admettant à leur sommet des passages dolomitiques. Par contre le faciès argilo-carbonaté est formé de calcaires dolomitiques, de calcaires marneux et de dolomies compacts (micro)cristallins localement argileux et anhydritiques à milioles, mollusques et gastéropodes et dans lequel, on enregistre une diminution progressive des carbonates et des épaisseurs du Nord vers le Sud. Et selon aussi, une coupe relevée par R. Laffite, Au Nord-Ouest de Biskra, à Koudiat El Leham, et au Nord-Est de Chaiba montre un Albien inférieur sous un faciès continental, formé d'une alternance de grès sableux et de marnes, et un Albien supérieur sous un faciès sub-récifal, formé d'une alternance de calcaires dolomitiques et de lumachelles. La puissance totale est de 250m environ. (Chebbah, 2007)

III-2-4-2- le Crétacé supérieur :

Les dépôts du Crétacé supérieur correspondent à un cycle sédimentaire marin qui se caractérise par l'alternance des formations dolomitiques et calcaires avec des dépôts argilo marneux contenant parfois du gypse ou de l'anhydrite. (Chabour, 2006). Il forme l'essentiel des affleurements mésozoïques dans la région. Il est bien développé dans le massif de l'Aurès et ses régions limitrophes. Il présente d'importantes variations de faciès et d'épaisseur et un développement manifeste de carbonates aux dépens des marnes du Nord au Sud. (Chebbah, 2007).

A. Le Cénomaniien :

Le Cénomaniien inférieur et moyen est principalement marneux ou marno-calcaire dans l'Atlas saharien. Cette série est très fossilifère au niveau du Djebel Boughzal. On note des dépôts lagunaires (gypses et anhydrites). L'épaisseur est très variable (200 m au niveau du Djebel Boughzal). Les forages d'Ouled Djellal et Sidi Khaled donnent des formations composées par des argiles dolomitiques grises à vert foncé avec des passées d'anhydrites massives, de dolomies brunes et de calcaires argileux gris ou clairs. A Ouled Djellal l'épaisseur est d'environ 300 m. (Chabour, 2006).

Il est représenté par une épaisse série marine, avoisinant les 700 m d'épaisseur, marno-calcaire à sa base et marneuse à son sommet. Dans la partie occidentale de l'Aurès (Dj. Metlili, El Kantara), il est formé d'alternances de calcaires gris jaunâtres à violacés, de marnes et de calcaires marneux à passées lumachelliques que surmontent des calcaires dolomitiques à orbitolines ou des dolomies blanches saccharoïdes. Au centre et à l'Est du massif (Dj. El Ezreg, Ahmar Khaddou), aux marnes noires surmontant les argiles bariolées et grès rouges albiens se superposent des alternances de marnes et de calcaires marneux à orbitolines et il se termine par des calcaires à radiolites, huîtres et échinidés. A l'Est de Biskra (flanc sud d'Ahmar Khaddou), le Cénomaniien est représenté par des marnes à ammonites et des calcaires à ostracées, huîtres et polypiers au sommet. Par contre à l'Ouest (Dj. Boughzal où l'épaisseur est réduite : 200 m), il est formé d'une alternance de marnes et de calcaires à ostracées et radiolites et se termine par des marnes à huîtres contenant, à leur sommet, des bancs gypseux. Sur la marge septentrionale du Bas Sahara, le Cénomaniien, d'une épaisseur de 450 à 500 m, est formé de calcaires gris lumachelliques ou bioclastiques à glauconie, de marnes grises ou noires à l'Est (Negrine) et de marnes pélitiques, de calcaires argileux, de dolomies cryptocristallines admettant des niveaux anhydritiques ou argileux à ostracodes surmontés d'une alternance d'anhydride, de calcaires argileux ou crayeux parfois dolomitiques et de marnes pyriteuses à l'Ouest (Ouled Djellal). Plus au Sud (Bas Sahara - Daias orientale), deux séries se distinguent dans le Cénomaniien et se prolongent jusqu'au confins tunisiens ; une série inférieure, de 50 à 60 m, formée de marnes dolomitiques grises localement anhydritiques ou ligniteuses à intercalations d'anhydrites, de calcaires marneux ou dolomitiques, de dolomies et d'argiles beiges et une série supérieure, de 120 à 135 m, riche en anhydrite formée d'argiles grises ou vertes, de marnes grises, de calcaires dolomitiques et de dolomies. (Chebbah, 2007).

B. Le Turonien:

Au Turonien, le régime marin persiste dans le Bas Sahara et la mer présente le maximum d'extension. Au pied sud des Ziban, le Turonien est composé par des calcaires cristallins, calcaires marneux et des calcaires dolomitiques. Sa puissance varie entre 300 et 400 m. Il est très homogène de part et d'autre de la flexure Sud Atlasique. (Chabour, 2006).

Le Turonien est l'étage qui occupe les plus larges surfaces à l'affleurement parmi tous ceux du Mésozoïque dans tout le massif de l'Aurès et sa périphérie. Dans les zones périphériques, il est formé de récifs et de calcaires à rudistes, polypiers et algues calcaires (100 à 300 m), alors que dans les zones axiales, il est surtout représenté par des marnes et des calcaires à céphalopodes et échinidés (600 à 800 m).

Dans la partie occidentale de l'Aurès (Dj. Metlili, El Kantara), il débute par des calcaires bréchoïdes à rudistes et nodules siliceux qui sont surmontés par des alternances de marnes et de calcaires à oursins, gastéropodes et polypiers et se termine par des calcaires graveleux et ferrugineux. Au centre et au NE du massif (DJ. El Azreg), il est formé de calcaires compacts à rudistes et polypiers qui passent par la suite à des alternances de marnes à échinidés et de calcaires marneux ou marnes calcaires. Dans la partie la plus orientale Dj. El Azreg, on enregistre un développement plus important des marnes au dépend des calcaires. Au SE flanc sud d'Ahmar Khaddou, il est formé de calcaires à rudistes, polypiers et algues admettant quelques intercalations de marnes ou de calcaires marneux. Prés de Biskra (Dj. Boughzal), il est formé de calcaires, de calcaires marneux ou dolomitiques, de marnes et de gypse au sommet. Sur la marge septentrionale du Bas Sahara, il est formé de calcaires bioclastiques, de marnes grises à blanches entrecoupées de bancs de calcaires marneux à l'Est et de dolomies parfois argileuses, de calcaires dolomitiques et de marnes blanches avec manifestations à tous les niveaux de la série des bancs d'anhydrite à l'Ouest. Plus au Sud (Bas Sahara), il est formé d'une barre carbonatée, d'une centaine de mètres d'épaisseur, appelée " Barre turonienne " où s'alternent des faciès calcaireux et dolomitiques (calcaires, dolomies, calcaires dolomitiques, marnes dolomitiques et calcaires marneux). (Chebbah, 2007).

C. Le Sénonien :

Il s'agit d'une sédimentation marno-calcaire à lumachelles. La série marneuse est souvent gypseuse. A Ouled Djellal, le Sénonien inférieur est composé de calcaires gris ou blancs alternant régulièrement avec des marnes grisâtres parfois gypseuses. Sa puissance est de 300 à 400 m, alors que le Sénonien supérieur présente à la base une alternance de calcaires marneux avec des marnes et des dolomies (250 m) et au sommet une série à dominante carbonatée, composée de dolomies et de calcaires marneux à passées d'anhydrites blanches et argiles (250 m). Dans l'Atlas saharien, le Sénonien est très réduit, dans la partie orientale. (Chabour,

2006). A l'inverse des formations sous-jacentes, le Sénonien n'affleure pas que dans les anticlinaux mais bien aussi dans les synclinaux de la région. Il est formé d'une épaisse série marine, 1500 à 2000 m, marno-calcaire présentant une certaine homogénéité d'ensemble avec une réduction Nord – sud des épaisseurs. Dans la partie occidentale de l'Aurès (El Kantara, Beni Ferrah, 1000m), il est formé de marnes noires à gypse contenant quelques bancs de calcaires crayeux blanchâtres surmontées de calcaires bioclastiques ou graveleux à inocerames, test de mollusques, échinidés, bryozoaires et algues calcaires du Coniacien - Campanien. Ensuite vient une alternance de calcaires à bryozoaires, huîtres et gastéropodes et de calcaires argileux ou dolomitiques lités et se termine par des marnes bariolées ou rouges et des phosphates du Maestrichtien. Au centre et dans la partie orientale du massif (DJ. El Azreg, Ahmar Khaddou) il est formé de marnes contenant quelques bancs de calcaires marneux coniacien-santonien, des calcaires à inocerames, lumachelles et marnes noires à ostracés campaniennes et s'achève par des calcaires crayeux blanchâtres à orbitolines et des calcaires massifs à bryozoaires et inocerames maestrichtiens. Au Nord de Biskra (Dj. El Melah d'El Outaya), le Sénonien est représenté par des marnes noires et des calcaires crayeux campaniens et par des calcaires massifs à inocerames et échinidés maestrichtiens. A l'Ouest de Biskra (Dj. Boughzal), il est formé de calcaires massifs ou bréchoïdes (ou encore pseudo-oolithiques) à radiolarites surmontés d'une alternance de marnes et de calcaires argileux jaunes verdâtres campaniens et de calcaires bioclastiques en bancs souvent dolomitiques à passées de marnes, de calcaires argileux ou de silex maestrichtiens. Par contre à l'Ouest (flexure saharienne, Dj. Rheliss), il n'est représenté que par des marnes noires et des calcaires massifs cristallins à bryozoaires campaniens et d'une alternance de calcaires crayeux à ammonites, de calcaires à bryozoaires et de calcaires marneux maestrichtiens. Sur la marge septentrionale de la plate forme saharienne, deux faciès sont reconnus dans le Sénonien : un faciès lagunaire à la base et un faciès carbonaté au sommet. Le faciès lagunaire, souvent représenté par des argiles rouges ou vertes à gypse, est constitué de plusieurs niveaux d'anhydrite et (ou) de sel gemme, de calcaire argileux, et de marnes ou argiles dolomitiques intercalés dans le faciès argileux principal. Le faciès carbonaté, attribué au Maestrichtien, est formé d'alternances de calcaires crayeux sublithographiques, de dolomies, de calcaires dolomitiques, de marnes grises glauconieuses et ligniteuses, d'argiles rouges souvent dolomitiques et d'anhydrite à foraminifères, algues, miliolles, ostracodes, gastéropodes, bryozoaires et débris d'échinodermes; et s'achève par un banc d'anhydrite repère séparant le Maestrichtien de l'Eocène inférieur sus-jacent. Dans les zones périphériques du bassin, le Maestrichtien devient complètement carbonaté et les épaisseurs diminuent progressivement

vers le centre du bassin (+ 100 m en périphérie et environ 50 m au centre).

III-2-5-Le Paléogène (Nummulitique) :

Le Paléogène est aussi bien représenté en affleurement que le Sénonien surtout au SE de la région d'étude, car on le trouve dans tous les synclinaux du versant sud du massif de l'Aurès et du Sillon présaharien. Quoiqu'il présente de nombreuses variations de faciès et une nette réduction des épaisseurs du NW au SE, il se compose principalement de deux séries bien distinctes :

- Une série marine à la base (Danien – Lutétien supérieur)

- Une série continentale au sommet (Eocène supérieur - Oligocène). (Chebbah, 2007).

- **Série marine du nummulitique (paléogène marin):** C'est dans le SE de l'Aurès (synclinal de Ouled Rechaich, flexure Khanguet Sidi Nadji - Séiar et Chaîne de Rheliss) que le paléogène marin, conservé surtout dans les dépressions synclinales, est le plus développé. Dans le synclinal d'Ouled Rechaich, il est formé de marnes blanches à minces bancs de gypse ou de silex admettant à leur sommet quelques intercalations calcaires surmontées d'un complexe marno-calcaire phosphaté paléocène. Ce dernier est formé de marnes blanches à petits bancs de calcaires marneux ou de calcaires à lit de phosphate glauconieux et se termine par une alternance de calcaires, de marnes blanches avec un banc de phosphate à leur sommet et de calcaires marneux à silex (160 m). Ensuite vient un ensemble éocène formé de calcaires massifs à silex auxquels se superposent des calcaires, des marnes et des calcaires marneux à gypse et qui se termine par des calcaires et des marnes jaunes à lits centimétriques phosphatés. Entre Séiar et Khanguet Sidi Nadji, le Paléocène est formé de calcaires localement brèchiques et de marnes à la base et par des calcaires, des calcaires marneux ou dolomitiques, de brèches calcaires et de marnes blanches à bancs phosphatés au sommet. Quand à l'Eocène, il est représenté par des calcaires massifs, calcaires marneux ou à gypse et de marnes noires passant latéralement à des argiles rouges. Au niveau de la chaîne de Rheliss dont tout le flanc sud est formé de terrains paléogènes, le Paléocène est formé d'alternances de marnes blanches et de calcaires à gastéropodes, et lamellibranches, l'Eocène inférieur de marnes blanches et l'Eocène moyen (Lutétien) de calcaires marneux et marnes à silex, nummulites et operculines et de calcaires à silex avec des marnes à gypse au sommet. Dans la partie occidentale de L'Aurès (El Kantara), le Paléocène est formé de calcaires et de calcaires marneux à gastéropodes, miliolles et lamellibranches de marnes jaunes et de calcaires marneux ou dolomitiques à gypse; l'Eocène inférieur est formé de marnes rouges de grès et de conglomérats consolidés et l'Eocène moyen (Lutétien) de calcaires et de marnes à

gastéropodes et lamellibranches admettant quelques passages gréseux ou contenant des lentilles conglomératiques à la base. A l'Ouest de Biskra, seul l'Eocène est présent. L'Eocène inférieur est formé de grès et d'argiles sableuses passant à des marnes verdâtres et à des calcaires à la base et des calcaires argileux et marnes blanches à nodules de silex et de calcédoine au sommet. L'Eocène moyen (Lutétien) est formé par des calcaires argileux, de marnes et de calcaires à nummulites et operculines. Sur la marge septentrionale de la plate forme saharienne, le Paléocène est probablement absent ou non identifié; le Maestrichtien est directement surmonté par l'Eocène inférieur. Ce dernier, d'une épaisseur de 120 à 160 m, est divisé en deux séries successives : une série basale à Algues et une série sommitale à Nummulites. La série à Algues, est constituée de dolomies, de calcaires dolomitiques et des calcaires oolithiques ou lumachelliques admettant des intercalations marneuses à la base, et sont à nummulites, operculines, milioles, gastéropodes, oursins, lamellibranches, bryozoaires, pectens et globigérines. La série à Nummulites, est formée de dolomies à silex intercalées de calcaires crayeux à tests d'oursins et d'huîtres et de calcaires dolomitiques grises à nummulites, operculines et des débris phosphatés.(Chebbah,2007).

-Série continentale du nummulitique (paléogène continental) :

Le Paléogène continental (Eocène supérieur et Oligocène) est représenté par des dépôts rouges souvent grossiers et dont leur épaisseur ne dépasse pas 200 m. Il se rencontre soit dans des synclinaux en concordance sur le Lutétien et supportant par endroit en concordance apparente le Burdigalien, soit en discordance sur tous les termes des séries plus anciennes. Dans la partie occidentale de l'Aurès (Synclinal d'El Kantara), il est formé de marnes rouges et de conglomérats grossiers à gastéropodes que Laffitte rattache à l'Aquitaniens et non à l'Oligocène. Au NW, la série conglomératique repose directement en discordance sur le Lutétien. Plus au Sud (Khanguet Sidi Nadji et Séiar), la série est complètement détritique (grès, sables et conglomérats). Sur la plate forme saharienne, à l'Eocène inférieur marin se succède un Eocène moyen à supérieur lagunaire formé de gypse à intercalations d'argiles grises vertes ou blanches gypseuses, de calcaires, d'argiles dolomitiques et de dolomies jaunes avec par endroits des passées sableuses et sont à débris d'ostracodes, de mollusques et de milioles. Ces faciès, qui représentent le prolongement des séries de L'Eocène moyen des Ziban, s'amincissent vers le sud (100 à 120 m dans les confins atlasiques, 20 à 30 m à Oued Rhir) et les couches gypseuses tendent à disparaître complètement où seules des argiles et des calcaires persistent et passent latéralement à des faciès détritiques attribués au Miopliocène dans l'Oued Rhir (SW de Touggourt). (Chebbah, 2007).

III-2-6-Le Néogène :

Dans la région de Biskra et ses régions limitrophes (l'Atlas Saharien, Aurès, chaîne de Rheliss) les terrains néogènes occupent une grande superficie. Les affleurements principaux se localisent en bordures de bassins (piémonts et dépressions où ils sont souvent recouverts par une faible épaisseur de formations quaternaires et entaillées par des petits ravins). Par contre, dans les centres de ces bassins ces dépôts néogènes sont enfoncés sous d'épaisses formations récentes du quaternaire qui viennent les couvrir en discordance. La série néogène bien développée en affleurement, notamment, en bordures septentrionales des bassins, repose souvent en discordance, selon les endroits et les niveaux atteints par l'érosion post-tectonique, sur des formations d'âges différents (Oligocène, Eocène, Crétacé supérieur).

La plupart des auteurs s'accordent à donner à cette série néogène, la superposition suivante :

- A la base des argiles vertes ou brunes et des calcaires aquitano-Burdigalien.
- Des argiles, souvent, brunes à intercalations de bancs gypseux langho-serravaliens.
- Des argiles rouges gypseuses tortoniennes.
- Des grès ou sables bruns-rouges messéniens.
- Au sommet, des poudingues rouges pliocènes.

En réalité, cette superposition correspond au schéma très simplifié des grands ensembles qui présentent sur le terrain d'importantes variations latérales et verticales de faciès. (Chebbah, 2007).

- Le Miocène marin :

Les formations du Miocène marin sont peu épaisses, Le Miocène repose en discordance sur les terrains anciens marins. L'ensemble de la faune qu'il contient indique un âge Burdigalien. Les principaux affleurements dans la région d'El-Outaya où il est formé de couches de calcaires dans la partie Est et par des mollasses riches en fossiles dans la partie Ouest. (Hamel, 2009). Le miocène marin affleure au nord de Biskra, sur le flanc nord de djebel Modiane, djebel Maghraoua et à l'est de la région de Branis. Il est représenté par des calcaires rouges à gypse et silex. Plus au Nord, à sebâa mgataâ, le miocène est formé de molasses marno-calcaires riches en pectinidés et en mollusques. Au-dessus, viennent des marnes sans fossiles avec gypse diffus. L'épaisseur totale est d'environ 200 à 300 m.

- Le Miocène Continental:

Au-dessus du Miocène marin, viennent des assises continentales très développées au Sud de l'Aurès où elles acquièrent une épaisseur considérable. A El-Outaya, l'étage présente des couches rouges d'une épaisseur de 200 à 300 m. (Hamel, 2009).

*** Le Miocène Supérieur :**

Il affleure seulement dans la dépression de l'anticlinal du djebel Bourhezal. Il est représenté par des argiles et des marnes multicolores souvent très sableuses, quelques niveaux de poudingues s'intercalent dans cette série, au pied des montagnes. Au sud de la zone montagneuse, dans la plaine de l'oued Djedi, le miocène supérieur n'affleure pas, mais partout où il a été reconnu par sondage, il se présente sous forme d'un dépôt continental détritique : argiles, sables, graviers et marnes.

*** le pliocène :**

Il repose sur les formations miocènes avec une légère discordance et forme de vastes affleurements dans la partie Sud-est de la région. Il comprend différents dépôts : près de la zone montagneuse, le pliocène présente une alternance de poudings, de bancs de grès et d'argiles sableuses. Au Nord de l'oasis de Mekhadma, sous la couverture quaternaire, apparaissent des couches rouges sableuses et gypseuses lagunaires.

Au pied des monts du Zab, et au sud de l'oued Djedi, le Miopliocène est composé de poudings, bancs de grès et argiles sableuses, passant à des couches rouges sableuses et gypseuses dans la plaine, toute la partie Sud-Est est couverte, au sommet, par une croûte calcaro-gypseuse de quelques mètres d'épaisseur dite « croûte saharienne » recouvre les anciennes formations. (Chabour, 2006).

III-2-7- Le Quaternaire:

Les terrains récents sont aussi largement répandus à la périphérie de l'Aurès qu'ils sont rares dans le centre du massif ; là ils sont représentés par des éboulis et des terrasses, tandis qu'à la périphérie, ils forment de larges nappes alluviales d'une épaisseur considérable.

-Récents : cailloutis et éboulis au pied des montagnes ; dunes de sables ; alluvions sableuses et caillouteuses des lits actuels d'oueds.

-Moyens : travertins de sources aux environs des sources Oumache, M'lili, et Magloub ; alluvions sableuses et argiles ; Formation dite "deb-deb "(croûte calcaro-gypseuse

superficielle, composée par l'accumulation par évaporation des sels contenus dans l'eau) dont le dépôt se poursuit sans doute encore de nos jours.

-Ancien : poudings ; grès dépôts sableux et argileux, représenté par une terrasse bien développée dans la partie Est vers l'oued Biskra. (Chabour, 2006).

III-2-8-Tectonique :

Comme cité précédemment, la région de Biskra se situe dans une zone séparant deux domaines géographiquement et géologiquement distincts : l'Atlas saharien surélevé au Nord et le Sahara, pays effondré, au Sud.

La structure morphologique actuelle de la région de Biskra est l'héritage du grand mouvement orogénique Alpin qui s'est manifesté en Algérie par la formation des chaînes atlasiques. L'observation de la carte géologique, montre que la région Nord est un pays montagneux, tandis que le sud est un pays effondré qui fait partie du bas Sahara. Le passage entre ces deux domaines distincts se fait par l'intermédiaire d'un ensemble de flexures, des plis, des failles et des failles orientées d'Ouest en Est appelée "Flexure Sud Atlasique". Il existe aussi deux systèmes de failles de directions différentes Nord-Ouest /Sud -Est et Sud -Ouest / Nord-est.

Les failles Nord-Ouest /Sud -Est sont connues sur l'ensemble de l'Atlas saharien. La flexure ou l'Accident Sud Atlasique (ASA) s'est développé lors de la phase paroxysmale pliocène et post-pliocène de la surrection de l'Aurès. Cette phase est également responsable de toutes les déformations du continental néogène (Miopliocène). Suite à la phase pliocène, des effondrements le long des accidents tectoniques ont eu lieu; l'érosion intense des reliefs ainsi surélevés, commence à combler les dépressions provoquées par les mouvements tectoniques. En effet, à mesure que se produisait l'exhaussement des zones atlasiques et aurésiennes, il s'est créé un affaissement méridional : le sillon sud aurésien, réceptacle des produits de démantèlement des reliefs naissants. C'est ainsi que nous trouvons au nord de la flexure le point culminant de l'Atlas (djebel Chelia : 2326m) et au Sud les dépressions les plus profondes de l'Algérie : les chotts Melghir et Merouane (-40m). Dans la région d'Oued Djedi, on voit bien, sur les monts du Zab des structures qui affectent les séries de l'Eocène et du Secondaire. Ces structures orientées Nord-Est /Sud-Ouest présentent des anticlinaux souvent déversés vers le sud -est comme par exemple l'anticlinal de djebel Boughzal à l'ouest de Biskra. La flexure saharienne se remarque dans le piémont sud des monts du Zab dans les palmeraies de Tolga et les forages montrent bien l'enfouissement du Crétacé et de l'Eocène, sous le Tertiaire continental, en direction du Sud et du Sud-Est. Toutefois la subsidence est

bien moindre que sur le flanc sud des Aurès ou la flexure est extrêmement bien marquée, sur le bord nord de la cuvette du chott Melghir.

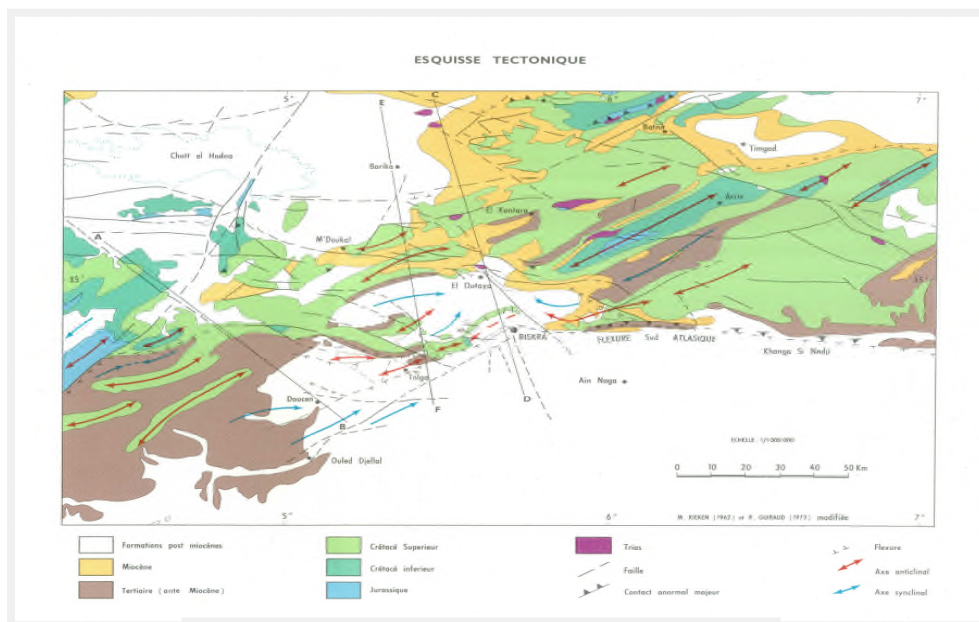


Fig24: Esquisse structurelle simplifié

III-2-9-La Paléogéographie :

Au **Trias**, l'Aurès était une zone de lagunes et d'évaporites où se déposaient des argiles, du gypse et du sel. L'influence marine s'accroît durant le **Lias inférieur** et des mouvements intenses se manifestent, favorisant une sédimentation plus profonde marquée par des marnes à ammonites.

Les calcaires à filaments du Dogger témoignent d'un milieu franchement ouvert au **Jurassique supérieur**. L'influence marine progresse et montre des faciès pélagiques ; alors qu'au **Kimméridgien**, les faciès sont de mer calme peu profonde.

Durant le **Berriasien moyen** et le **Valanginien inférieur**, une abondante sédimentation argilo-gréseuse montre que les apports détritiques proviennent des deltas du Sahara septentrional, tout en provoquant une régression de la mer vers le nord ou le Nord-est.

A l'**Hauterivien**, le dépôt des dolomies épaisses, parfois minéralisées, donne comme résultat l'installation d'un régime de plate-forme continentale. À partir du Barrémien, terme le plus ancien visible dans la région d'étude, la sédimentation a été continue sur le socle saharien et dans le géosynclinal de l'Atlas saharien. Cependant, le régime de sédimentation a été variable au cours du Crétacé et de l'Eocène. Sur la surface d'érosion post albienne, la mer s'étend

rapidement au Cénomaniens pour envahir le Sahara jusqu'au Hoggar. Cette mer est d'abord peu profonde au Cénomaniens où elle dépose des couches de marnes riches en bancs de gypse et d'anhydrites, intercalées de bancs de calcaires et de calcaires-dolomitiques. Durant toute l'époque turonienne, le régime marin persiste partout uniformément. Avec le Sénonien, alternent de nouveau, tantôt un régime lagunaire de courte durée, tantôt un régime marin donnant des couches calcaires de faible profondeur. La mer demeure au cours de l'Eocène inférieur dont les couches suivent en concordance le Sénonien, ce sont des calcaires blancs à silex. La mer quitte ensuite la région, et le régime lagunaire de l'Eocène moyen amène le dépôt d'épaisses couches de gypse et d'anhydrites.

À la fin de l'éocène moyen, des mouvements orogéniques en 2 phases très rapprochées de directions différents provoquant la surélévation de toute la région.

La première a provoqué de faibles plis de direction NE-SW sur toute l'étendue du plateau saharien et dans l'Atlas. La deuxième, localisée au Nord d'Oued Djedi, a donné des plissements de direction ENE-WSW.

A la fin du Pliocène, une nouvelle orogénique bouleverse la région de direction E-W, cette phase a provoqué au Nord d'Oued Djedi un pli très long surélevant les anticlinaux préexistants. L'érosion et la sédimentation continentale reprennent sans interruption jusqu'à nos jours.

De cette description, on constate que la région de Biskra s'individualise nettement au Crétacé supérieur comme au Jurassique en montrant un caractère de zone haute ou parfois peut être comme zone frontale de la plate forme continentale saharienne bien soulignée par des formations récifales ou périrécifales. (Chebbah, 2007).

La géologie de la région d'étude se caractérise par sa situation dans une zone de transition entre les formations et les structures de l'Atlas saharien et celles de la plate-forme saharienne. La région hérite, en général, de la structure et de la tectonique atlasique : plis d'orientation NE-SW. Le passage des formations alpines aux structures plates du Sahara se fait par l'intermédiaire d'une flexure appelée Accident sud atlasique. Les principaux aquifères sont contenus dans les formations du Crétacé inférieur, Crétacé supérieur et les formations du Mio-Plio-Quaternaire. (Chabour, 2006).

III-3- Cadre Hydrogéologique - les principales aquifères des Ziban

Généralement les ressources en eau représentent l'une des principales richesses sur lesquelles repose toute action de développement économique et social. Au Sahara, les

ressources en eau sont, surtout et largement, dominées par les eaux souterraines qui sont essentiellement constituées par :

- Les eaux renouvelables localisées dans les inféro-flux du versant sud des Aurès (région Nord de Biskra), du Hoggar Tassili à l'Est et de la région de Bechar-Tindouf à l'Ouest.
- Les eaux non renouvelables représentées par les deux grands réservoirs des deux bassins sédimentaires : le complexe Terminal (350 000 km²) et le Continental Intercalaire (600 000 km² ou aquifère albien avec capacité en eau de 50000 milliard de mètre cube). Ils se situent en partie ou en totalité dans les wilayas de : Biskra, Laghouat, Ouargla, El Oued, Ghardaïa, Adrar, Illizi et Tamanrasset (Khadraoui, 2006 ; Bouziane et Labadi, 2009).

Schématiquement, les potentialités en eaux décroissent régulièrement d'Ouest en Est, d'Ouled Djellal à la frontière tunisienne contrairement au gradient aux potentialités de fertilité des sols. (Belguedj, 2008).

Les premiers forages albiens construit à Biskra est en 1956 est ce de Sidi Khaled avec une profondeur de 2500 m, suivi par ce de Ouled Djellal en 1974 avec une profondeur de 2138 m avec un débit total de 104 l/s répartie en destination d'eau potable (AEP) de 30 l/s et pour l'irrigation des palmeraies (74 l/s), ensuite il est détourné vers la consommation domestique.

En 1978 et avec la persistance de la sécheresse, dans la partie extrême Sud-ouest, plusieurs forage ont été construit (Ouled sassi-Ouled harkate –sidi Khaled-Ouled Djellal-Doucen). A partir 1984 et devant les résultats obtenus dans les palmeraies de Ouled Djellal, Sidi Khaled, l'opération a été généralisé dans l'ensemble des palmeraies notamment ceux de : Tolga-Elhajeb -Bouchagroun- M'lili-Oumeche- Foughala. (Bouziane et Labadi, 2009).

Le développement agricole qu'a connu la wilaya est en grande partie du a la disponibilité de potentialités en eau de surface et souterraine. Cette disponibilité en eau a facilité le recours à l'irrigation des grands périmètres. Pour compenser les méfaits de l'aridité du climat, les agriculteurs bénéficient de dotations importantes atteignant 7000 m³ /ha/an. Par ailleurs, les besoins en eau pour l'agriculture sont liés à l'accroissement des terres agricoles irrigables. (Sedrati, 2011). Et bien que, ce taux va sans doute croître après le lancement de quelques forages réalisés dans le cadre du PNDA et la GCA depuis l'année 2000. (Benzouche et Chehat, 2010).

Les figures 25 et 26, montrent le château d'eau souterrain du Sahara algérien (Dubost, 2002) ainsi que l'état de sollicitation des nappes. On remarque une augmentation très significative des ouvrages entre les deux périodes considérées (1970 et 2000).

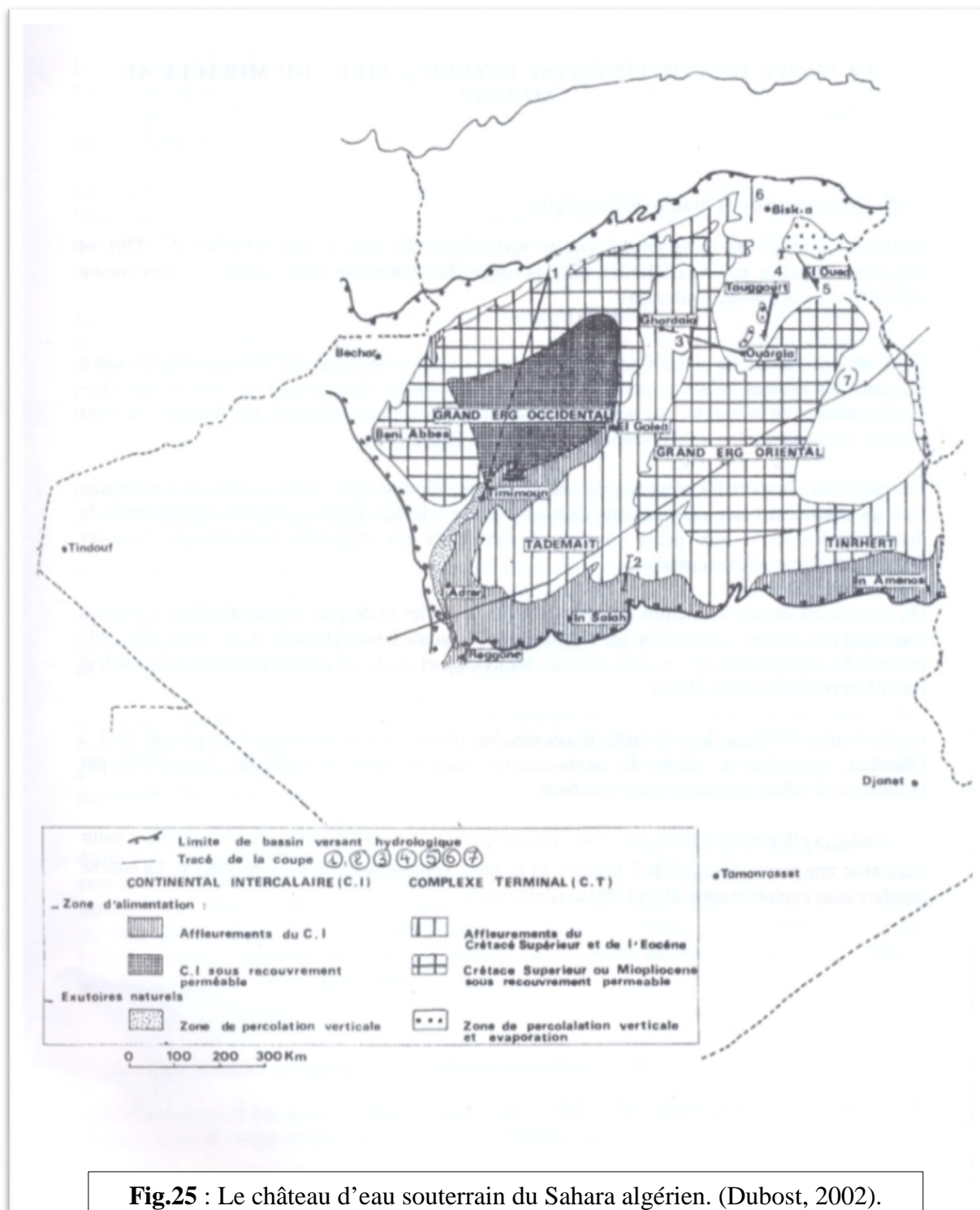


Fig.25 : Le château d'eau souterrain du Sahara algérien. (Dubost, 2002).

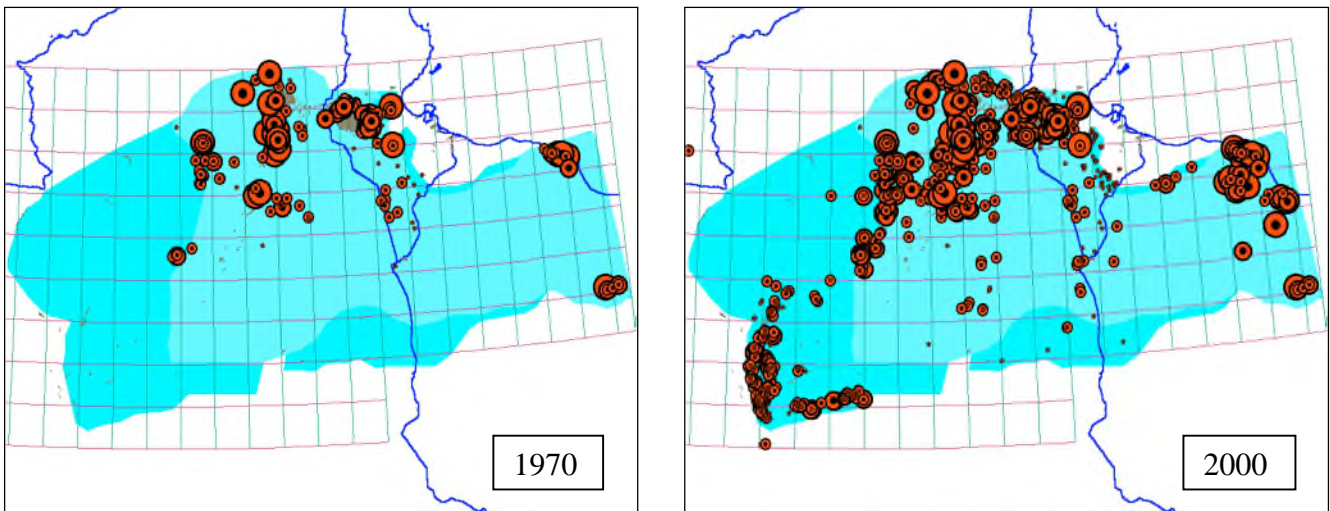


Fig. 26 : Prélèvements par forages dans le SASS (1970 – 2000).

La disposition des formations sédimentaires dans la cuvette du Bas-Sahara favorise ainsi une circulation souterraine des eaux précipitées sur les affleurements aux auréoles concentriques du pourtour. L'alternance des terrains perméables et imperméables assure, en outre, leur mise en charge à mesure qu'elles s'écoulent vers les parties déprimées. Ces conditions géologiques particulièrement favorables sont à l'origine de la formation des nappes souterraines qui alimentent, entre autre, les oasis. Les études géologiques et hydrogéologiques ont permis de mettre en évidence l'existence de plusieurs réservoirs aquifères d'importance bien distincte de part leur constitution lithologique, leur structure géologique et les facilités d'exploitation qu'ils présentent. Ces aquifères appartiennent au Quaternaire, au Miopliocène, à l'Eocène inférieur et le Sénonien supérieur (Maestrichtien) et à l'Albien. (Bouziane, 2009). L'hydrogéologie se distingue par la superposition de quatre nappes principales d'étendues importantes avec leurs eaux, souvent chargées et dont leurs continuités spatiales restent à prouver. (Chebbah, 2007).

De point de vue **hydrogéologique**, la wilaya de Biskra se distingue par trois zones (ANAT, 2002) :

Zone Est : se caractérise par les nappes suivantes :

- ✓ **Quaternaire** : cette formation est constituée par des dépôts alluvionnaires qui renferment une nappe phréatique de faible profondeur, de faible débit et de mauvaise qualité d'eau à l'exception de la nappe d'Oued Biskra ;
- ✓ **Miopliocène** : c'est la nappe la plus sollicitée dans cette zone. Elle se caractérise par une profondeur moyenne de l'ordre de 400 m, d'un débit de 15 l/s et d'une qualité chimique moyenne à bonne ;
- ✓ **Pontien** : c'est un aquifère important, exploité dans la partie Sud de la zone, il se caractérise par une profondeur qui va jusqu'à 900 m, d'un débit moyen de 30 l/s et d'une qualité chimique moyenne ;
- ✓ **Maestrichtien** : cette formation est exploitée dans les zones montagneuses à une profondeur moyenne de 300 m. cet aquifère présente un débit de l'ordre de 20 l/s et une bonne qualité chimique de l'eau.

Zone Nord : se caractérise par les nappes suivantes :

- ✓ **Quaternaire** : cette formation est faiblement exploitée dans cette zone. Elle se caractérise par une faible profondeur, un faible débit et une mauvaise qualité chimique de l'eau ;
- ✓ **Miopliocène** : cet aquifère est exploité dans la plaine d'El-Outaya à une profondeur allant jusqu'à 250 m. il se caractérise par un débit de 15 l/s et une qualité chimique moyenne ;
- ✓ **Maestrichtien** : il est exploité dans les zones montagneuses, à une profondeur comprise entre 300 et 800 m, il se caractérise par un débit moyen de 20 l/s et de bonne qualité chimique de l'eau ;

Zone Ouest : se caractérise par les nappes suivantes :

- ✓ **Quaternaire** : est représenté essentiellement par la nappe phréatique de l'Oued Djedi, qui représente la ressource la plus importante pour l'irrigation des palmeraies de Sidi Khaled et Ouled Djellal. La profondeur de cette nappe varie entre 20 et 90 m avec un débit moyen de 20 l/s et une qualité d'eau mauvaise à moyenne et bonne au sud de Lioua ;

- ✓ **Miopliocène** : cet aquifère est exploité au sud de la région de Tolga, a une profondeur allant jusqu'à 150 m, il se caractérise par un débit de 15 l/s et la qualité chimique de l'eau est moyenne ;
- ✓ **Eocène inférieur** : c'est l'aquifère le plus sollicité dans la région des Ziban, sa profondeur varie de 90 à 500 m au sud de Tolga, il se caractérise par un débit moyen de 20 l/s et une qualité d'eau moyenne ;
- ✓ **Sénonien supérieur** : il est séparé de l'éocène inférieur au sud de la wilaya (Oumeche et M'lili) par une épaisse couche de marne et d'argile, où il atteint la profondeur de 1000 m, il se caractérise par un débit jaillissant de 25 l/s et d'une qualité chimique moyenne de l'eau ;
- ✓ **Albo-Barrémien** : c'est un aquifère très profond (plus de 2000m), il se caractérise par des eaux chaudes dont la température peut dépasser les 60 °C et une mauvaise qualité chimique de l'eau.

On peut conclure que cette variation hydrogéologique peut être résumée comme suit :

III-3-1-les formations aquifères à nappe libre, semi libre à semi captive

1. La nappe phréatique du quaternaire

Elle est localisée dans les accumulations alluvionnaires du Quaternaire. Elle est mieux connue au niveau des palmeraies de Tolga et des Oueds (nappes d'inféro-flux), sa profondeur varie de 0 à 10 m ; son réservoir de composition hétérogène est constitué par des matériaux détritiques (de blocs, de galets, de graviers et de sables). Son substratum est formé d'une épaisse formation argileuse, parfois, il apparaît sous forme de lentilles de sables en discordance avec les couches d'argiles. Elle est, surtout, alimentée par les eaux de précipitations, les infiltrations des oueds et les eaux d'irrigations. La catégorie des eaux de cette nappe est salée ou très salée, elle se classe parmi les chlorurés alcalines et sulfatées calco-magnésieuses.

2. La nappe des sables du Miopliocène

Cette nappe est constituée essentiellement par une alternance de sables, de graviers et d'argiles. Elle est fortement exploitée, surtout dans la zone de Biskra, par un nombre très important de forages destinés essentiellement pour l'irrigation des terres agricoles. La nappe du Miopliocène admet une épaisseur de 300 m environ. Contenant plusieurs niveaux aquifères de composition hétérogène : matériaux détritiques, des graviers et des sables dans une matrice argileuse. En profondeur, la formation devient à prédominance argilo-sableuses et repose sur une formation imperméable composée de marnes à gypse et d'anhydrite de

l'Eocène moyen, ce qui implique qu'il n'y a pas infiltration des eaux de cet aquifère vers l'aquifère inférieur puisque leur nature lithologique freine toute circulation, mais il faut noter que près de bordures des monts des Ziban, les argiles sableuses sont en contact avec les calcaires de l'Eocène inférieure. Ceci veut dire qu'il y a des possibilités d'échange entre les aquifères de sables et de calcaires fissurés, notamment là où l'épaisseur d'argile est faible. La nappe des sables est couverte d'un dépôt alluvionnaire peu épais ou d'une couche sablo-gypseuse du Quaternaire. Par endroits, le Miopliocène affleure mettant en contact direct, cet aquifère, avec la surface assurant ainsi son alimentation à partir des eaux de la surface. (Mimeche, 1998). Cette nappe a une extension considérable, elle est captée par de nombreux forages dans la plaine d'El Outaya. Son épaisseur faible sur les piémonts, augmente progressivement vers milieu de la plaine et donc vers le centre du bassin.

III-3-2-Les formations aquifères captives :

1. La Nappe des calcaires (Eocène inférieur et Sénonien supérieur) : cette nappe est localisée en grande partie dans la région de Biskra. Elle est plus exploitée à l'Ouest qu'à l'Est de Biskra à cause des faibles profondeurs relatives de captage. A l'Ouest, la profondeur varie de 15 à plus que 200 m alors qu'à l'Est, la profondeur dépasse les 400 m. Cette nappe recèle d'importantes réserves qui sont liées d'une part aux faciès et à l'état de fissuration de la roche, et d'autre part à sa recharge souterraine à partir de l'Atlas saharien. Son toit est constitué par des formations argilo-sableuses du Miopliocène au Nord et des marnes à gypses de l'Eocène moyen au Sud contribuant à sa mise en charge (Mimeche, 1998). Le réservoir de la nappe des calcaires, dite aussi nappe de **Tolga**, est constitué essentiellement de calcaire de l'Eocène inférieur du sénonien supérieur et du turonien.

2. La Nappe du Continental Intercalaire CI : cette nappe est souvent appelée « nappe albienne ». Elle est constituée de grés et d'argiles. Elle est peu exploitée dans la région, sauf à Ouled Djellal et Sidi Khaled où les formations gréseuses de l'Albien ou du Barrémien sont touchées à des profondeurs de 1500 à 2500 m. L'exploitation de cette nappe est très coûteuse en raison de sa grande profondeur et de sa température très haute, mais reste assez rentable pour l'irrigation des palmiers.

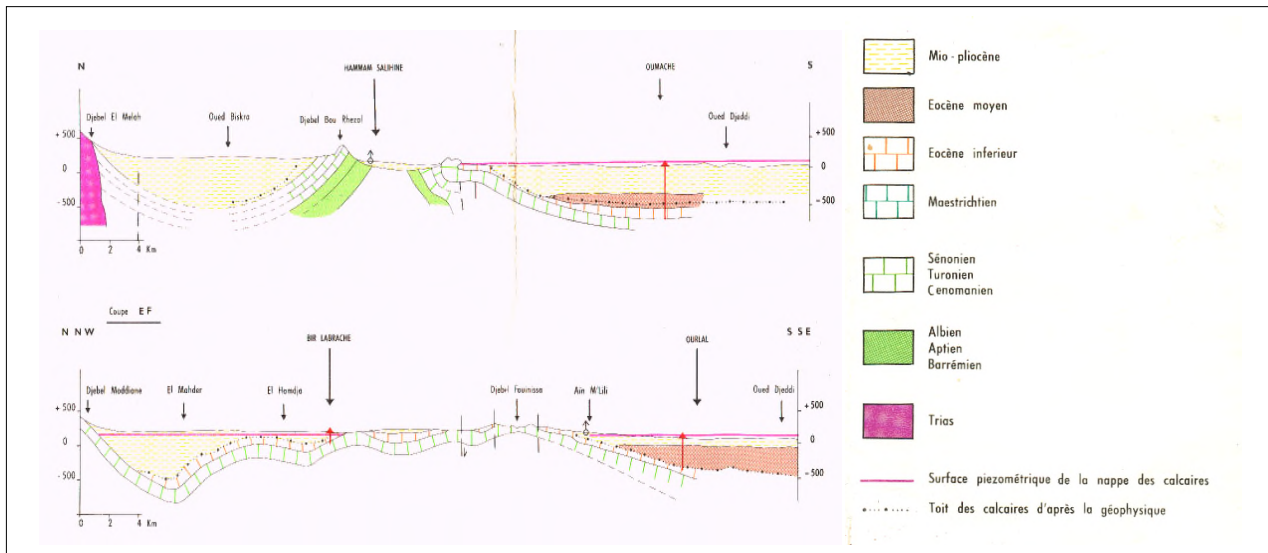


Fig.27 : Coupes hydrogéologique schématique de la région de Biskra.

(Extrait de la carte hydrogéologique de BISKRA 1/200.000).

III-4- La Répartition spatiale des ressources souterraines en eau destinée à l'irrigation

La Répartition spatiale des forages d'eau des Ziban, Selon ANRH (2008) pour une bonne analyse des résultats, il a été jugé nécessaire de subdiviser le territoire de la wilaya de Biskra en 4 zones distinctes (voir carte ci-dessous), et ce, selon la densité et la répartition spatiale des forages d'eau et qui sont comme suit :

- Zone I où on trouve les dairas de (El Kantara – Djamourah et El-Outaya) ;
- Zone II regroupe celles de (Sid Khaled – Ouled Djellal – Tolga et Foughala) ;
- Zone III comprend les dairas de (Zribet E.O – Ourllal – M'Chounech et Sidi Okkba) ;
- Zone IV affectée à celle de Biskra.

De ce fait, la wilaya de Biskra est composée actuellement de 12 Daïras regroupant 33 communes principalement à vocation agricole, ce qui explique la prédominance des quantités d'eau destinées à l'irrigation. Ceci est particulièrement important pour les Daïras de Tolga, de Zribet El Oued, D'Ourelal, d'Ouled Djellal et de Sidi Okba. Selon ce découpage la répartition du nombre des foarges recensés peut être comme suit :

- Zone I avec 298 points d'eau, soit 03% du nombre total.
- Zone II avec 3942 forages, soit 40%.
- Zone III avec 5375 forages, soit 54%.
- Zone IV avec 293 points d'eau, soit 03% du nombre total.

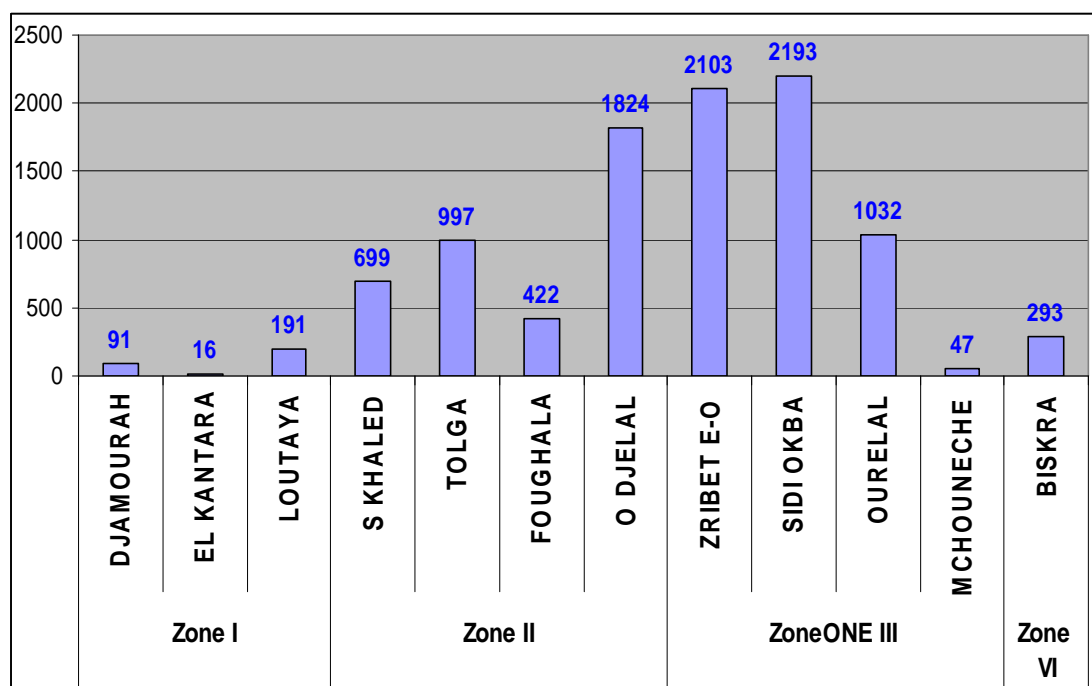
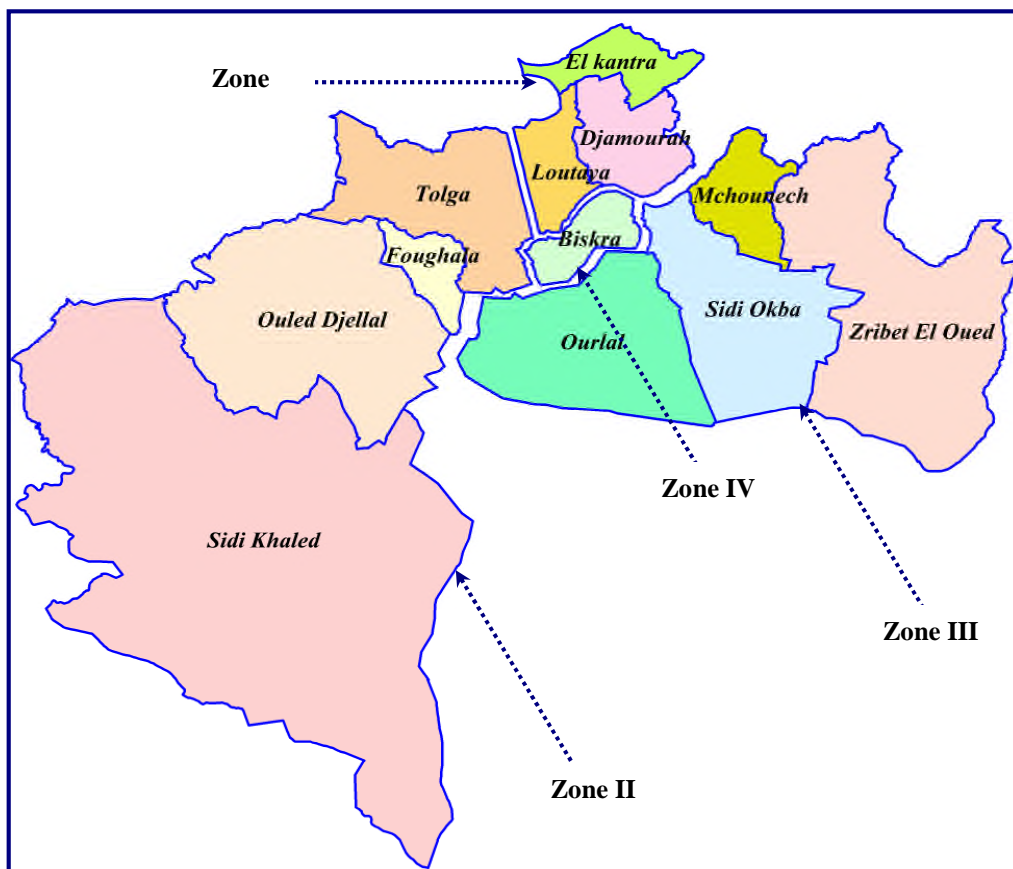


Fig.28 : Répartition du nombre des points d'eau par daïra et par zone (ANRH-2008).

Tableau 20 : Caractéristiques par Daïras, des nappes captées à travers la wilaya

Daïra	Nappe	Prof. (m)	Q (l/s)	N.S (m)	R.S (g/l)
ZRIBET	MIO-PLIOCENE	90 - 250	5 - 15	16 - 88	2 - 4
EL OUED	PONTIEN	500 - 900	20 - 30	Art	2
SIDI OKBA	MIO-PLIOCENE	90 - 250	5 - 15	04 - 46	2 - 4
	PONTIEN	500 - 900	20 - 30	Art	2
OULED DJELLAL	PHREATIQUE	20 - 60	1 - 4	03 - 10	2 - 4
	MIO-PLIOCENE	90 - 250	5 - 15	10 - 20	2 - 4
	EOCENE INF	90 - 500	5 - 40	10 - 50	0,5 - 4
	ALBIEN	1700 - 2600	60 - 120	Art	2 - 3
SIDI KHALED	PHREATIQUE	20 - 60	1 - 3	03 - 10	2 - 4
	EOCENE INF	90 - 500	5 - 40	90 - 120	0,5 - 4
	ALBIEN	1500-2500	40 - 120	Art	3
BISKRA	PHREATIQUE	20 - 60	1 - 3	03 - 10	2 - 4
	MIO-PLIOCENE	90 - 250	5 - 15	10 - 15	2 - 4
	EOCENE INF	90 - 500	5 - 40	20 - 50	0,5 - 4
	ALBIEN	2500	25	Art	3
TOLGA	PHREATIQUE	20 - 60	1 - 3	02 - 05	2 - 4
	EOCENE INF	90 - 500	5 - 40	ART - 50	0,5 - 4
	ALBIEN	1700 - 2600	60 - 120	Art	2 - 3
FOUGHALA	PHREATIQUE	20 - 60	1 - 3	03 - 05	2 - 4
	MIO-PLIOCENE	90 - 250	5 - 15	07 - 10	2 - 4
	EOCENE INF	90 - 500	5 - 40	20 - 50	0,5 - 4
	ALBIEN	1700 - 2600	60 - 120	Art	2 - 3
OURLAL	PHREATIQUE	20 - 60	1 - 3	02 - 05	2 - 4
	MIO-PLIOCENE	90 - 250	5 - 15	06 - 10	2 - 4
	SENONO-EOCENE	90 - 500	5 - 40	Art	0,5 - 4
	ALBIEN	2500	25	Art	3
EL OUTAYA	PHREATIQUE	15 - 20	2	10	3
	MIO-PLIOCENE	90 - 250	5 - 15	20	2 - 4
EL KANTARA	PHREATIQUE	15 - 20	2	10	1 - 2
	MAESTRICHTIEN	200-800	20	20	1
DJEMORAH	MIO-PLIOCENE	150	10	10	2 - 4
	MAESTRICHTIEN	100-350	10	20	1 - 2
MCHOUNECHE	MIO-PLIOCENE	80 - 200	3 - 5	32 - 43	3 - 4
	MAESTRICHTIEN	150 - 500	8 - 30	Art - 68	1

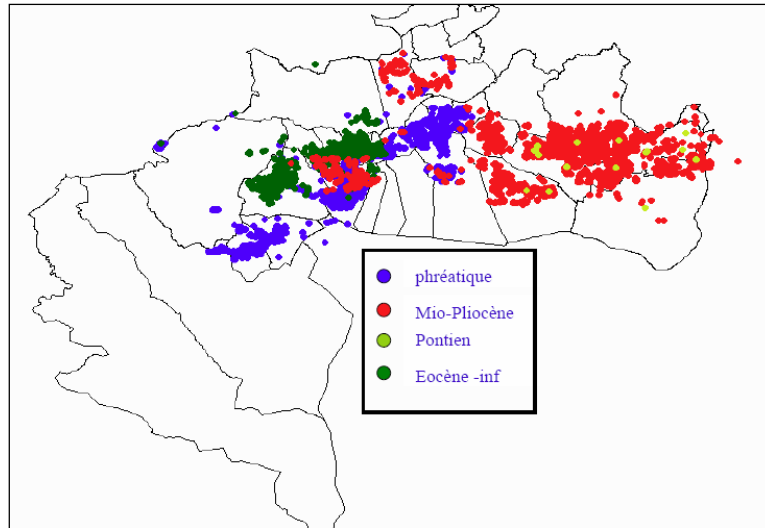


Fig.29 : Répartition des points d’eaux dans la région de Biskra (ANRH, 2011).

III-4-1- Réseau de suivi des deux nappes CT et CI dans la région de Biskra-sens d’écoulement

Selon le rapport de la mission portant le suivi quantitatif et qualitatif des ressources en eau souterraine dans la wilaya de Biskra réalisé par (Drouiche et Harrat, 2010) de la division eau du CRSTRA dans le cadre d’une convention tripartite signée entre l’ABHS, L’ANRH et le CRSTRA, la division eau participe aux travaux relatifs à la réalisation du suivi quantitatif et qualitatif des ressources en eau souterraines dans la wilaya de Biskra. De ce fait des mesures piézométriques ont été réalisées sur une cinquantaine de points. Les résultats ainsi obtenus serviront à l’élaboration d’un modèle mathématique, ce qui permettra de contribuer à la compréhension de certains phénomènes hydrogéologiques et hydrodynamiques, ainsi qu’à l’évolution des différentes nappes dans le temps et dans l’espace. Pour des raisons techniques et de faisabilité, les piézomètres ont été scindés en deux sites :

Les piézomètres du site 1 ont été implantés dans la partie Nord-est et Sud-est de la ville de Biskra. Ces piézomètres ont pour objectif de contrôler la nappe du Miopliocène qui est exploitée par un nombre très important de forages ce qui est occasionné des rabattements considérables voir inquiétants (Fig31).

En ce qui concerne **les piézomètres du site 2**, ils ont implantés dans la partie Nord-ouest et Sud-ouest de la ville de Biskra. Ces piézomètres sont servir pour le contrôle des deux nappes, à savoir du Miopliocène et de l’Eocène inférieur.

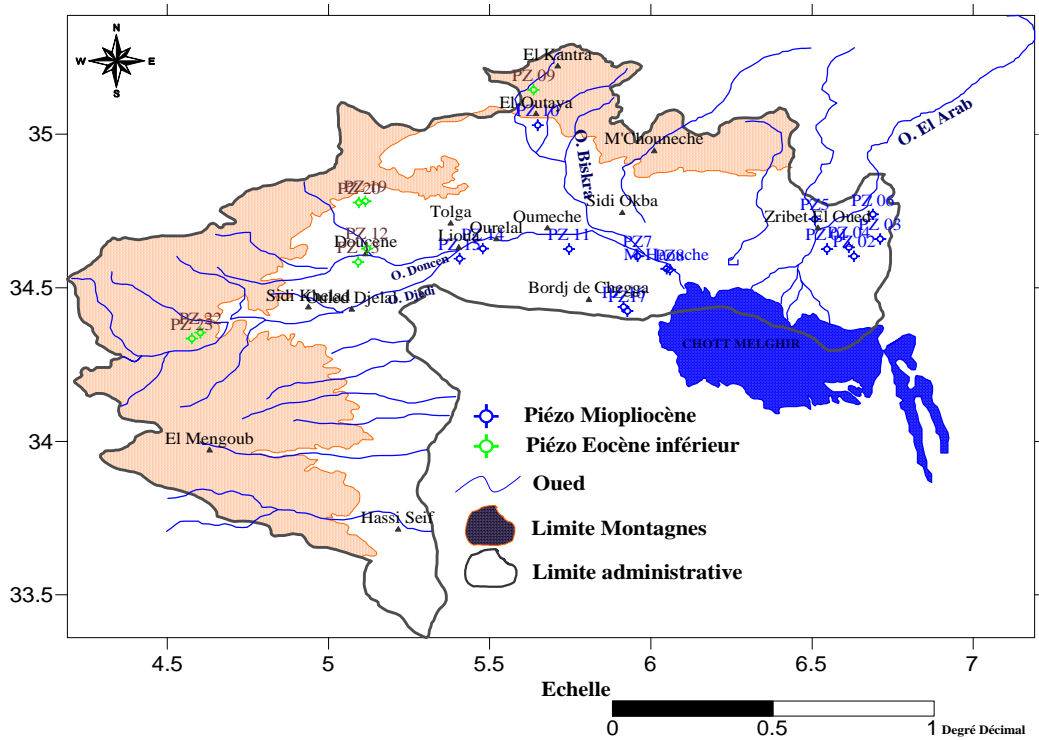


Fig.30: Carte d’inventaire des piézomètres implantés dans la région de Biskra (Novembre 2009. CRSTRA, 2010).

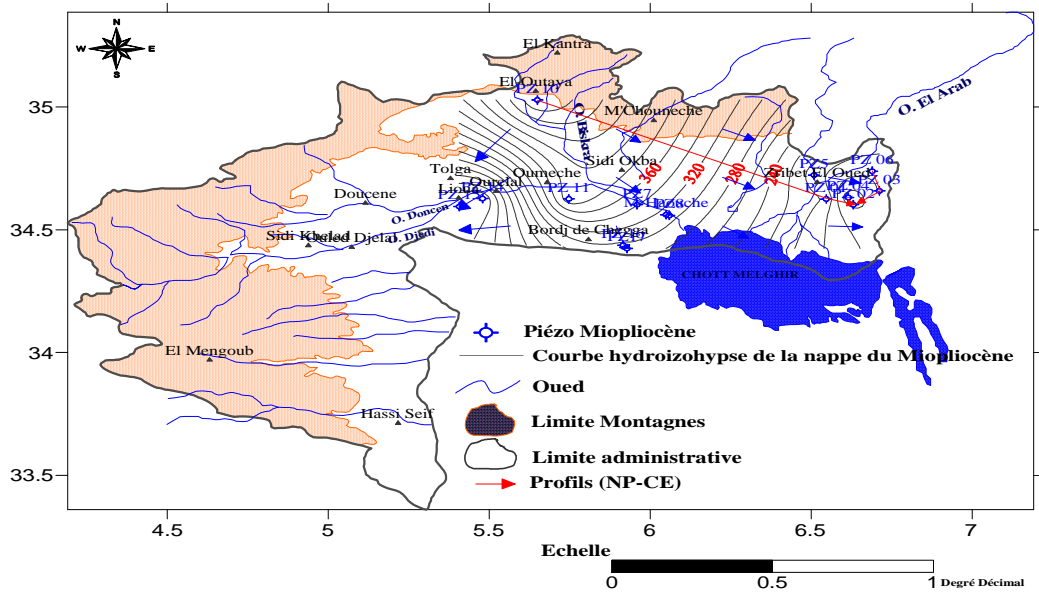


Fig. 31: Carte piézométrique de la nappe de Miopliocène de la région de Biskra (Novembre 2009, CRSTRA, 2010).

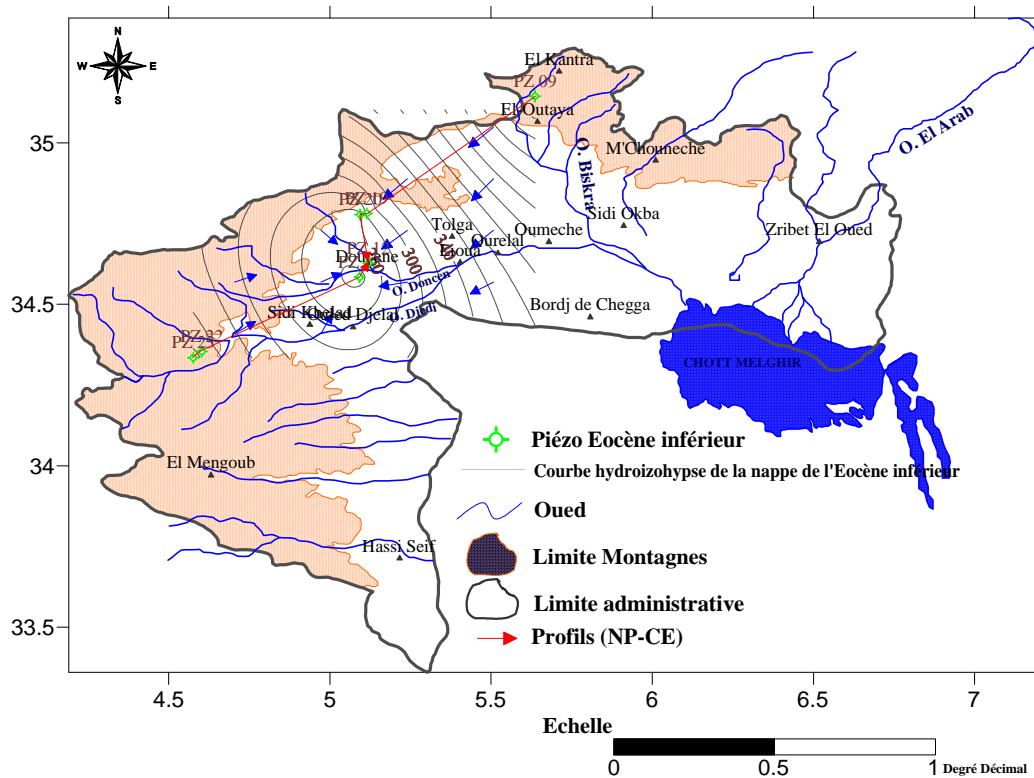


Fig. 32: Carte piézométrique de la nappe de l'Eocène inférieur de la région de Biskra (Novembre 2009. CRSTRA, 2010).

La carte piézométrique montre l'existence de deux directions d'écoulement ; l'une se dirige de Sud-Est d'El-Outaya (PZ10) vers La région du Chott Melghir, et l'autre Sud-Ouest d'El-Outaya (PZ10) vers Mkhadma (PZ15). On peut noter une troisième direction qui se fait de Zribet El-Oued vers la région de Chott Melghir. La carte indique bien l'existence d'une dépression dans la région de Chaïba où l'écoulement se converge vers cette dépression, cette dernière due à l'existence d'un champ de captage dans la région de Chaïba pour alimenter la région de Tolga en eau potable (AEP).

On peut conclure que, le système aquifère du Sahara septentrional, partagé par l'Algérie, la Libye et la Tunisie renferme des réserves d'eau considérables, peu renouvelables car fossile. Il est constitué de deux niveaux aquifères: le Continental Intercalaire et le Complexe terminal. Les réserves sont évaluées à plus de $30.000 \times 10^9 \text{ m}^3$. Les trente dernières années, ont montré un accroissement de l'exploitation de ces nappes, on est passé à un débit de 2,5 milliards de m^3/an , ce qui a entraîné une surexploitation. Cet accroissement de l'exploitation s'est accompagné d'une salinisation des eaux, d'une réduction de l'artésianisme, d'un tarissement des exutoires et risque de créer des interférences entre pays, ...

III-4-2- Hydrochimie des eaux de la région de Biskra

Quelque soit la provenance des eaux d'irrigation (rivière, barrages, nappes (forages, puits), elles contiennent des sels. Selon les résultats d'analyses des eaux prélevées au cours de l'inventaire réalisé par l'ANRH en 2011, la teneur en résidu-sec des eaux qui caractérisent la wilaya de Biskra varie selon les zones et les nappes. D'une manière générale, on enregistre des teneurs élevées (de 3.6 à plus de 16 g/l) dans les zones d'Ouled Djellal pour la nappe phréatiques et la nappes de l'Eocène inférieur et de Sidi Okba pour celle du Miopliocène.

La base de l'étude hydrochimique est la classification des eaux souterraines en faciès hydrochimiques. (Brinis, 2011). Les eaux de la nappe du Mio-plio-quadernaire de la zone Est de la plaine d'El Outaya présente une salinité assez élevée variant entre 1 et 5 g/l (Brinis et al, 2009). Selon l'étude effectuée par Chabour en 2006, en basant sur les données de l'ABHSahara, les eaux sont généralement très chargées et ont un faciès sulfaté qui provient des importantes formations évaporitiques. Les échantillons prélevés dans différents systèmes aquifères montrent une évolution spatiale à l'échelle du bassin assez homogène pour chaque système. Les données recueillies au niveau de l'ABHSahara concernant le résidu sec des eaux souterraines de la région des Ziban permet une classification régionale de la minéralisation des systèmes aquifères. Les variations spatiales de la minéralisation montrent une relative homogénéité au sein des différentes nappes et à l'échelle régionale. Les aquifères contenus dans les formations du Quaternaire ont des valeurs de résidu sec de 2.7 g/l excepté pour la région de Lioua où elles sont de 2.9 g/l. A noter que la précision des valeurs donnée en g/l et au dixième pré, ne permet pas distinguer des familles d'eau au sein d'une même formation. Pour les eaux du Miopliocène, le résidu sec est de 2 à 2.2 g/l; les fortes valeurs se trouvent à El Outaya, Lioua et Doucen. Dans la nappe carbonatée sénono-éocène, le résidu sec est de 1.8 g/l, excepté pour la zone d'El Kantara qui, se situant à la terminaison Sud-Ouest des Aurès, présente des valeurs de 1.2 g/l. Les eaux de la nappe du Continental Intercalaire présentent des valeurs variant entre 1.8 et 3 g/l.

Ces eaux relativement très chargées ont un faciès dominant sulfaté qui provient de la dissolution des importantes formations évaporitiques. La position d'un Trias évaporitique en amont des systèmes aquifères (djebel Mellah à El Outaya) fait que les eaux sont initialement assez chargées en élément tels que Ca, Mg, Na, Cl et SO₄ qui peuvent provenir de la dissolution du gypse ou de l'halite (pour Na et Cl). A cela s'ajoute les différentes couches de gypses et des anhydrites au sein des formations carbonatées, ce qui donne à ce niveau une double origine à Ca et Mg qui peuvent provenir de la dissolution des calcaires et des dolomies

(système karstique) ainsi que de celle du gypse et des anhydrites. Les échanges cationiques sont très fréquents et peuvent survenir à tous les niveaux. C'est ainsi que le Na contenu dans les minéraux argileux peut remplacer Ca et Mg, expliquant l'évolution anormale du sodium dans les eaux originellement dépourvues de cet élément et en dehors des formations évaporitiques.

En revanche, les eaux souterraines de la vallée d'oued Abdi et Bouzina (région des Aurès) appartenant aux formations carbonatées du Maestrichtien et qui s'écoulent vers le Sud-Ouest présentent de faibles minéralisations, ont un faciès bicarbonaté calcique caractéristique des systèmes karstiques. La limite sud de cette zone matérialise le passage à un autre domaine à tendance évaporitiques. Le dôme salifère d'El Outaya participe, largement, à la minéralisation (par lessivage) des eaux souterraines qui la traversent.

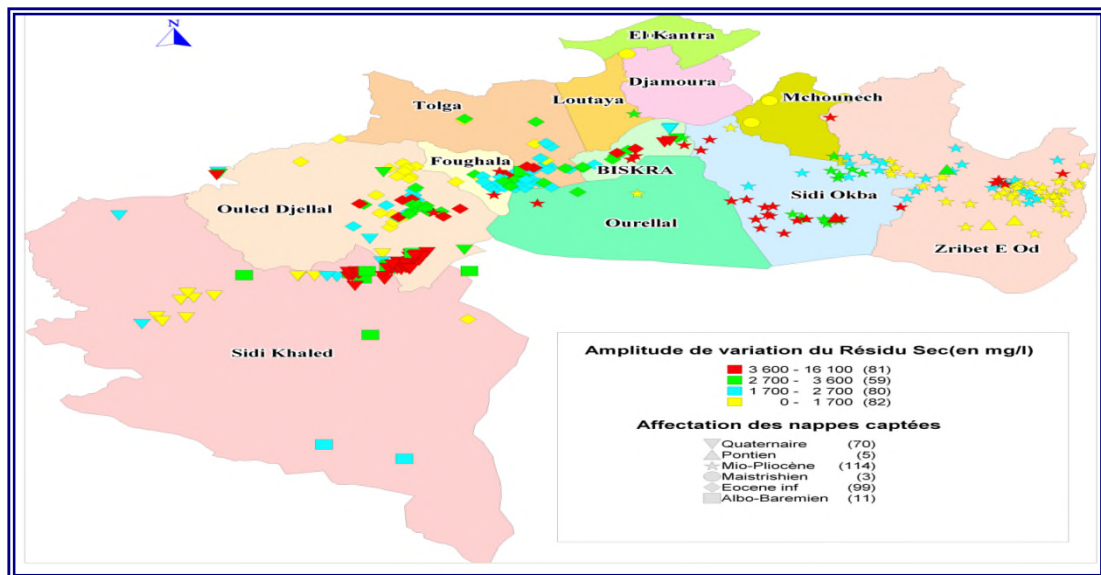


Fig.33 : Présentation de la teneur en résidu-sec des eaux souterraines de la région de Biskra (ANRH, 2011).

III-5- Conclusion

Le Bas-Sahara a désormais atteint sa structure actuelle en cuvette synclinale dissymétrique bordée à l'ouest, au sud et à l'Est par des bancs à pendages faibles tandis qu'au Nord une fosse profonde se creuse au pied de l'Aurès et redresse presque à la verticale des sédiments déposés.

L'étude géologique de la région a permis de connaître la nature lithologique des différentes formations susceptibles d'être un aquifère. La lithologie permet d'individualiser 4 unités d'aquifères principales : La nappe phréatique du quaternaire ; La nappe des sables du Mio-pliocène ; La nappe des calcaires de l'Eocène inférieur et Sénonien supérieur. Ces trois nappes constituent le complexe terminal. Ainsi que la nappe des grès profonde qui représente la nappe du continental intercalaire.

La région de Biskra se caractérise par des terrains sédimentaires allant du Quaternaire au sommet jusqu'au Barrémien à la base, le tableau ci-dessous indique les différentes unités géologiques ainsi que leur importance hydrogéologique.

Tableau21 : Les principales unités lithostratigraphiques de la wilaya de Biskra.(ANRH,2011).

Unités stratigraphiques	Unités lithologiques	Unités hydrogéologiques
Quaternaire	Sables , Argiles	Nappe phréatique
Mio-Pliocène	Sables et Argiles	Nappe des sables
Eocène moyen	Argiles gypseuses	Semi perméable
Eocène inférieur	Calcaires	Nappe des calcaires
Sénonien supérieur Maestrichtien Campanien	Calcaires	Nappe des calcaires
Sénonien inférieur	Argiles, gypse, sels	Imperméable
Turonien	Calcaire dolomitique et Dolomie	Nappe du turonien
Cénomaniens	Argiles, marnes, Marno-calcaires et gypse	Imperméable
Albien	Calcaire Marnes, Grès	Nappe du continental
Aptien	Grès, Dolomies	Imperméable
Barrémien	Grès	Nappe du continental

DEUXIEME PARTIE :
Méthodologie et Résultats.

Chapitre IV : Matériel et méthodes

IV- 1-Présentation de la zone d'étude

La région du Ziban, fait partie du Bas Sahara septentrional et se caractérise par une forte potentialité phoenicicole avec près de 5 millions de palmiers dattiers et plus de 9908 points d'eau (forage, puits et sources) inventoriés ainsi que deux barrages irrigant une surface plus de 100300 ha (DSA,2015) sous forme d'Oasis avec une polyculture en étage (palmier dattier, arboriculture et cultures herbacées ou maraîchères) ou sous forme de périmètres irrigués et d'abri-serres plus spécialisés (palmiers dattiers, céréales ou cultures maraîchères). Dans le cadre de notre étude, trois localités/ régions sont choisies afin de réaliser notre recherche.

IV- 2-L'échantillonnage

IV- 2-1- Phases et chronologie du travail_ Démarche et méthodologie

La première phase de l'étude est la prospection, investigation et description du terrain de toute la région des Ziban afin de choisir les sites, cela est fait durant l'année 2013.

La deuxième phase, le choix des localités d'études est basé sur la différenciation de notre immense région-Ziban-, à la fin, trois localités sont prises en considération ; une à l'Est des Ziban représentée par Sidi Okba, l'autre à l'Ouest représentée par Bordj ben Azouz. En ajoutant la plaine d'El-Outaya.

Le travail a commencé en l'année 2014, notre méthode d'échantillonnage est basée sur le prélèvement du sol sur un profil pédologique type de chaque station avant et après l'irrigation afin de consulter le changement du sol sous irrigation, la collecte des eaux d'irrigation est effectuée à partir des ressources (forage ou puits) destinées à alimenter ces stations par cette matière vitale. Rappelons que le choix des profils du sol étudié a été effectué sur la base des analyses physico-chimiques des eaux d'irrigation et leur faciès chimique.

A l'heure actuelle, le monde entier utilise la notion de comparaison (avant et après) comme celle dans les affiches publicitaires, même, le principe de notre travail de recherche se base sur cette notion : impact ou changement sous.....

IV-2-2-Le choix des sites :

De ce fait, on a conclu que la rationalisation des écosystèmes existants aussi bien que la mise en valeur ne peuvent être conçus que par la maîtrise du continuum eau- sol-plante-climat. Or, les eaux d'irrigation indispensables pour le développement agricole dans ces régions entraînent une évolution des sols et un changement de leur qualité. Parmi les facteurs de cette évolution, il y a lieu de citer le contexte topographique des zones irriguées, les techniques d'irrigation et surtout les caractéristiques des sols et des eaux. Dans un tel environnement (milieu très évaporant, endoréisme, sols peu fertiles), les eaux d'irrigation, quoique de caractéristiques variables selon leur origine (types d'aquifères et eaux de surface) sont de qualité médiocre et influencent fortement la qualité des sols avec des conséquences sur la productivité de l'agriculture et sa durabilité.

L'analyse des relations sol-eau et leurs conséquences sur les changements de la qualité des sols dans les Ziban (Biskra), région à grande potentialité agricole permettra de mettre en évidence les modifications ayant eu lieu selon différents scénarios : topographie, qualité des eaux d'irrigation, types de sols, techniques d'irrigation, systèmes de cultures, durée de la mise en culture).

Sols :

L'évaluation et le suivi de la qualité des sols sont fondés sur l'analyse de propriétés physiques, chimiques ou biologiques des sols, associée à une description précise du sol et de son environnement, et un recueil des pratiques de gestion de chaque site.

La mesure de la salinité totale d'un sol est indispensable afin de reconnaître le type de sol auquel on a à faire. Toutefois, comme les propriétés des sols diffèrent fortement suivant la composition chimique et la concentration des sels présents, l'identification des sels solubles, sur extrait de pâte saturée, permet de fournir des renseignements sur les principaux sels présents dans ces sols et d'envisager l'étude de l'évolution de leur salinité surtout lorsqu'ils sont soumis à une irrigation avec une eau salée. Ces sels peuvent également être dosés dans des extraits aqueux plus dilués (1/5 et autres rapport sol/eau) ; et l'extraction est plus rapide et moins consommatrice en quantité de terre (Mathieu et Pieltain, 2003).

Toutes les analyses (eaux et sols) sont effectuées au niveau du laboratoire de notre Centre Scientifique et Technique sur les Régions Arides Biskra CRSTRA.

🚧 L'eau d'irrigation :

L'échantillonnage des eaux souterraines a été réalisé de manière à obtenir un maillage le plus régulier possible, compte tenu de la disponibilité des puits et des forages en exploitation. Selon notre enquête sur terrain et la spécificité de chaque région, différents échantillons d'eau ont été prélevés de chaque localité choisie.

IV-2-3- Description de chaque région

a- Région de sidi Okba

🚧 Echantillonnage de l'eau d'irrigation

La région de Sidi Okba est une plaine à haute potentialité agricole, située au SE des Ziban, possède une SAU (superficie agricole utile) de 10025 ha dont 7513 ha irriguées soit 7.5 % de la SAU irriguée de Biskra. La répartition de la surface irriguée dans la zone d'étude est présentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau 22: Importance de l'irrigation gravitaire dans la région de Sidi-Okba

Mode d'irrigation	gravitaire	Goutes à goutes	aspersion	Total (ha)
Superficie irriguée (ha)	6219.00	1184.00	110.00	7513.00

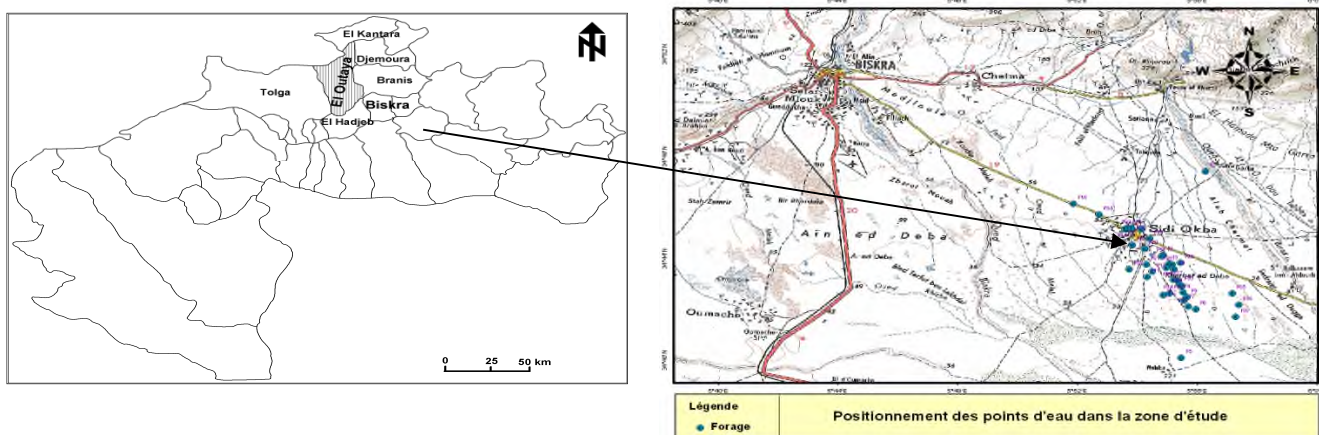


Fig. 34: Situation géographique de la zone d'étude.

Dans cette étude une trentaine de forages destinés à l'irrigation des terres agricoles dans les localités de Tajdid, Safel Tajdid, Mangae Bougtaf, Feidh el-ghareg et Garta ont été sélectionnés durant la campagne agricole 2014 (Fig.34). Deux modes d'irrigation (goutte à goutte et submersion) sont pratiquées dans cette région;

✚ Echantillonnage et Description du sol :

Deux séries du prélèvement du sol ont été pris en considération, une sur un sol nu ou non irrigué, et l'autre sur un sol irrigué ;

Tenant compte que le palmier dattier est cultivé par excellence dans cette région, notre prélèvement est selon les techniques de plantation des palmiers dattiers, soient en cuvette ou en fosse, à une profondeur de 1 à 1.5 m selon l'épaisseur de la couche sablo-limoneuse présente. Selon notre observation, au delà de 1 m de profondeur du sol, il ya le sable qui joue un rôle du drainage naturel. Quelques stations représentatives de la région sont soumises dans notre étude (Station Garta) (station mangae Bougtaf), (station Feidh elghareg), (Station Tajdid, Station Safel Tajdid, ils sont renommés localement par les fellahs Elmaleh). Elles sont représentées par quelques profils types pédologiques.

Afin de caractériser les sols, nous avons réalisé une démarche basée sur 06 sondages à la tarière répartis spatialement selon le faciès chimique et le degré de salinité de la nappe exploitée du Miopliocène. Les échantillons du sol sont prélevés sur des sols non irrigués (de référence selon les profils pédologique disponibles), ainsi que sur des sols irrigués afin de suivre le changement du sol sous irrigation. Les analyses au laboratoire sont portés sur les paramètres suivants: La conductivité électrique (1/5), pH, gypse, calcaire total et actif, et le Bilan ionique par la détermination des cations et des anions (Na^+ , K^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^-).

b- Région de bordj Ben Azouz

La région de Bordj Ben Azouz, qui nous intéresse dans notre recherche, a une superficie totale de 23.20 Km² (2320 ha) de la wilaya de Biskra soit 0.11 % avec une superficie agricole utile SAU de 1666 ha (71.81 % de la ST de Bordj ben Azouz et 0.9% de SAU totale de Biskra). Zone à vocation phoeniculture, (statistique de 2012 montre qu'il existe 4800.000 palmiers dattiers à Biskra par rapport 17000000 en Algérie).

La répartition de la surface irriguée par système d'irrigation, dont 1.64 % de SAU irriguée de Biskra, est dans le tableau ci-dessous, dont le système gravitaire par séguia est le plus mode d'irrigation pratiqué par rapport aux autres (goutte-goutte ou aspersion).

Tableau 23 : Importance de l'irrigation gravitaire dans la région de Bordj Ben Azouz

Mode d'irrigation	Gravitaire	Aspersion	Goute goutte	à Total irrigué (ha)	SAU (ha)
Superficie irriguée (ha)	1550	0	87	1637	1666

Notre étude est effectuée selon les critères suivants :

- la topographie et reliefs ;
- la présence d'eau (irrigation par puits principalement ainsi que forage),
- le réseau du drainage,
- la profondeur du sol et la présence de la croûte,
- l'état de la salinité et hydromorphie en surface.

Ces critères nous permettent de localiser 4 sites :

- 1) site 1 ; d'une palmeraie de Paul ozval existe depuis 1923 ; irrigué par puits,
- 2) site2 ; la palmeraie de Khaled Laejal et ses frères planté depuis 2001 dans le cadre de FNDA, irriguée par puits et forage, et suivi d'un sol non cultivé près d'un réseau du drainage (principale et secondaire) :

Chmora (Foughala, Bordj, Elghrous) → Ghadar → Ezarga → Lioua
 Sehaira → oued Djedi.

- 3) site3 ; Le troisième point c'est Bir attia, là où il ya une nappe phréatique proche de la surface (profondeur inférieur à 1m). Là où il ya un sol à texture fine aussi que les signes de l'hydromorphie (sol Gley), pour répondre à ce type de problème, le fellah apporte du sable à une dose d'un camion (12 tonnes) pour chaque 4 pieds du palmier dattier avec une fréquence de 5ans. Le sable est de texture grossière pour le but de retarder ou bloquer la remonté capillaire.
- 4) Site4 ; Le quatrième point est la zone d'accumulation des eaux du drainage, une dépression chotteuse Ezerga ; constitue l'exutoire nature de la nappe phréatique provient par le réseau du drainage.

C'est une zone de dépression, elle est caractérisée par un sol nu dépourvu de végétation au centre avec une hydromorphie permanente (sol Gley de couleur vert et gris) où le niveau de la nappe phréatique est à la surface, ensuite elle est entourée par une végétation spontanée de type halophyte comme *Salicornia fruticosa* (chénopodiacées), *Aeluropus littoralis* (poacées) , peu d' *Atriplex (Atriplex halimus)* (chénopodiacées) , puis une végétation cultivée spécifique ; le palmier dattier. On doit appeler l'attention sur les dispositions spéciales qu'affectent certains de ces points d'eau; ce sont tout d'abord les behour (bahr), petits lacs correspondant à

des gouffres, comme ceux que l'on rencontre dans l'Oued Righ et dans le Zab central (près Hammam-Selam). Ezerga— Source située au Sud-Sud - Ouest de EI-Bordj ; à 3 kilomètres environ. Elle forme un petit lac de 60 à 70 mètres de diamètre avec rebord périphérique de terre édifié par les habitants de Lioua pour utiliser l'afflux d'eau d'hiver plus considérable. Profondeur inconnue. (Anonyme, 1908). Sachant que les lacs ou ces zones de dépression c'est eux qui gardent le système en équilibre (zone d'accumulation des sels viennent des palmeraies à travers un réseau du drainage efficient).

Dans cette étude, une vingtaine d'échantillon d'eau destinées à l'irrigation des terres agricoles cultivées principalement en palmier dattier dans les lieux dits : Chmora, Ferme Paul Ozval, ferme Taleb Ahmed, Magtoufa, Ezerga, Bir attia ont été sélectionnés durant la campagne agricole 2014. Les eaux d'irrigation proviennent de double exploitation, principalement des eaux des puits de la nappe phréatique, ensuite viennent les forages. Deux modes d'irrigation (localisé pour les jeunes palmiers et gravitaire pour ceux âgés) sont pratiqués dans cette région; les techniques de plantation des palmiers dattiers, sont en tranchés pour les palmiers âgés et en planches pour les jeunes associées à des strates arbustes comme l'oranger, figuier, grenadier, vigne et une strate herbacées par l'orge(joue un rôle d'éponge) et la luzerne(engrais vert ou aliment de bétail), la plantation se fait après la cassure de la croute gypso-calcaire « debdeb » située à une profondeur de 2 à 4 m .

La collecte des eaux du drainage semble est plus que nécessaire afin de connaître et contrôler le bilan salin de l'eau et du sol.

Entrée eau —————> lessivage et drainage —————> sortie eau

De point de vue agronomique, selon (Askri et Bouhlila, 2010), et comme le périmètre oasien est formé par deux types de sols, l'échantillonnage est fait à partir des sols cultivés donc irrigué à l'intérieur de palmeraie et des sols non cultivés donc non irrigué à l'extérieur.

c- Région de la plaine d'El-Outaya

Selon l'étendue de la plaine, des stations/sites représentatives sont prise en considération. Deux séries de prélèvements d'échantillons de sol ont été effectuées sur sol non irrigué et non cultivé pris comme référence une avant ou au cours de l'installation de la culture annuelle (orge ou blé en général) et l'autre sol cultivé, irrigué pris comme site de suivi de la variation et changement du sol sous irrigation. Les échantillons du sol sont prélevés à l'aide

d'une tarière de 0 à 60 cm (profils à 3 horizons, profondeur estimée selon les racines des cultures qui sont généralement orge, blé et culture plein champs comme cucurbitacées pastèque et melon principalement), séchés, broyés et tamisés à 2 mm. Cette étude est une continuité des travaux déjà réalisés dans le cadre de la préparation du magister en sciences agronomique.

L'un des trois sites est irrigué à partir de l'eau du barrage fontaine des gazelles, les deux autres sont irrigués par des eaux souterraines (2 forges, F1 et F2).

Le prélèvement de l'eau d'irrigation souterraine est effectué sur une vingtaine d'échantillons afin d'avoir une image acceptable de l'impact de la qualité physico-chimique des eaux souterraines sur des sols cultivés de la plaine.

Pour caractériser la salinité des sols, on met habituellement l'accent sur la détermination de la composition ionique de la solution d'un extrait aqueux du sol (Halitim, 1988). Afin de réaliser ce but, les analyses de l'eau et du sol sont effectuées au niveau du laboratoire du CRSTRA.

IV-3- Méthodes d'analyses utilisées

La mesure de la salinité totale d'un sol est indispensable afin de reconnaître le type de sol auquel on a à faire. Toutefois, comme les propriétés des sols diffèrent fortement suivant la composition chimique et la concentration des sels présents, l'identification des sels solubles, sur extrait de pâte saturée, permet de fournir des renseignements sur les principaux sels présents dans ces sols et d'envisager l'étude de l'évolution de leur salinité surtout lorsqu'ils sont soumis à une irrigation avec une eau salée. Ces sels peuvent également être dosés dans des extraits aqueux plus dilués (1/5 et autres rapport sol/eau) ; et l'extraction est plus rapide et moins consommatrice en quantité de terre (Mathieu et Pieltain, 2003).

Le bilan ionique est déterminé pour établir le faciès de salinisation de l'eau en se basant sur le diagramme de Piper. Il permet également d'évaluer les risques de toxicité causés par certains sels. Il s'agit des cations Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} et des anions HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- . Ces concentrations en ions sont exprimées en milliéquivalent par litre. Ces éléments majeurs ont été analysés au laboratoire selon les méthodes standards. Idem pour l'analyse des eaux d'irrigation, les échantillons sont prises, stoker dans des bouteilles en plastiques marquant la date et lieu de source d'eau (barrage, forage et puits) et faire passer immédiat à l'analyse.

Le tableau suivant résume les différentes méthodes d'analyses utilisées pour les deux ressources actives (sol et eau).

Tableau 24 : Tableau récapitulatif des différentes méthodes d'analyses utilisées dans notre étude.

Analyses	Méthodes
Granulométrie	Pipette de Robinson/tamisage
pH 1/ 2.5	pH mètre (model multi 3430 SET K)
CE 1/5 à 25 °C	Conductimètre (model multi 3430 SET K)
Calcaire total	Méthode de Calcimètre de Bernard
Calcaire actif	Méthode Drouineau et Galet
Gypse	Méthode d'acétone de Richards
Cations Na⁺ et K⁺	spectrophotomètre à flamme
Cations Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺	Volumétrie par titration (présence EDTA).
Les chlorures Cl⁻	Méthode de MOHR (précipitation par nitrate d'argent en présence de chromates)
Les sulfates SO₄⁻	Précipitation au chlorure de baryum BaCl₂
Bicarbonates HCO₃⁻	Titrimétrie à l'acide sulfurique

IV- 4- Les méthodes de traitement des données

La composition ionique de la solution du sol ou des eaux d'irrigation permettra d'établir, à l'aide de critères géochimiques et de diagrammes de Piper, le type de salinité dominante.

Les calculs géochimiques ont été réalisés avec le modèle Phreeqc (version interactive 3.1.4-8929, Parkhurst et Appelo, 2013) et /ou Phreeqc2.8 (version free). Le test de corrélation de type Pearson est fait à l'aide de XLSTAT version 7.5.2. Les diagrammes de Piper, Riverside ont été construit au moyen du logiciel Diagrammes (Simler, 2013). Le test de validation du bilan ionique retenu est de 20 %.

La méthodologie du travail suivi est comme suit :

1. Les données brutes ;
2. Tester la validité des analyses : \sum cations , \sum anions et

$$\Delta = \frac{|\sum \text{cations} - \sum \text{anions}|}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}}$$

3. Gardé les échantillons tels que $\Delta < 0.15$ à $\Delta < 0.20$;
4. Correction proportionnelle des données ;
5. Fichier d'entrée corrigé : $\sum \text{cations corrigé} = \sum \text{anions corrigé}$;
6. Traitement des données avec Phreeqc, en utilisant la base de données par défaut ; phreeqc.dat
7. Transfert du fichier data sous fichier Excel ;
8. Tracer les graphes du log.

Chapitre V : Modélisation géochimique

Les qualités que l'on doit rechercher pour des terres à irriguer dépendent de celles des eaux à utiliser et des quantités disponibles. Des terres sableuses nécessitent des débits très importants mais peuvent recevoir des eaux très minéralisées, comme celles utilisées dans le sud de Tunisie qui dépassent 5 g/l. En sens inverse, les masses d'eau nécessaires sont plus réduites sur des terres lourdes, mais celles doivent être de bonne qualité et leur drainages. En général, naturellement insuffisant, doit alors être artificiellement améliorée. Là, se trouve l'une des limites pratiques de la mise en valeur des terres lourdes des zones arides. (Aubert, 1960).

L'irrigation s'accompagne, dans nombreux des cas, de phénomène de dégradation des sols par salinisation secondaire, (Cheverry et Robert, 1998). Ce phénomène est le processus de dégradation de la qualité des sols le plus rapide dans les périmètres irrigués. (Lahlou et al, 2000). Donc, La salure des sols est un des facteurs limitants les plus anciennement reconnus de l'agriculture en zone aride. (Job, 1992). Or, la salinisation secondaire désigne une augmentation progressive de la concentration des sels dans les eaux superficielles et les sols sous l'influence d'apport d'eau d'irrigation, de l'aridité du climat ou de conditions hydrologiques particulières (lessivage insuffisant, proximité de la nappe,...). Cette concentration de la solution du sol conduit à la précipitation successive de minéraux qui modifie sa composition et détermine différentes voies d'évolution en fonction de l'abondance relative des différents ions majeurs dans la solution de départ.

Dans la recherche sur les sols salés, comme dans de nombreux autres domaines, l'élaboration et l'utilisation de modèles se sont développées de façon spectaculaire depuis quelques années. Ces modèles ont pour objectifs de simuler les transferts de sels au sein du profil et/ou l'évolution de la composition chimique de la solution du sol sous l'effet d'une concentration, voire d'une dilution (Cherbuy, 1991).

La salinité et la sodicité des sols sont identifiées et qualifiées à partir de la composition ionique de la solution du sol. Ils possèdent en effet une phase liquide très riche en sels dissous qui leur confère des propriétés souvent défavorables, en particulier à l'égard des plantes. (Calvet, 2003). Dans les zones arides, plus la salinisation des sols augmentent et plus la sodisation est grande. Dans les sols à forte conductivité électrique ($> 16 \text{ mmhos.cm}^{-1}$), le gypse et la calcite, quelque soit leur teneur dans le sol, à cause de la faible solubilité, n'empêchent pas une certaine sodisation. Leur rôle devient par contre essentiel lors de l'évolution inverse (amélioration de ces sols). (Halitim, 1988).

Les sels présents dans la solution du sol ont trois origines principales :

- L'altération des minéraux est la source naturelle dominante ;
- Le transport dans le sol d'eaux chargées en sels minéraux, ainsi que l'intrusion des eaux marines dans les zones côtières ;
- Des apports parfois importants sont aussi le résultat de mauvaises pratiques d'irrigation avec des eaux saumâtres et d'épandages de divers déchets liquides d'origine agro-industrielle.

Les ions les plus fréquemment présents dans la solution du sol des sols salés sont les cations sodium, potassium, calcium, magnésium et les anions carbonates, sulfates et chlorure.

On entend par sels solubles tous les sels plus solubles à l'eau que le gypse. Leur concentration globale exprimée par la conductivité électrique qui représente en réalité la conductivité électrolytique. Pour caractériser la salinité des sols, on met habituellement l'accent sur la détermination de la composition ionique de la solution d'un extrait aqueux de sol. Depuis quelques années, des recherches sont en outre orientées vers la mise en évidence de la nature minéralogique et la morphologie des sels. Pour ce faire, trois types de diagnostic sont fréquemment utilisés. (Halitim, 1988) :

- **Un diagnostic par la diffractométrie aux rayons X.** Cette technique ne permet pas de mettre en évidence les sels mal cristallisés ou en quantités relativement faibles dans les mélanges considérés, mais elle permet, sans ambiguïté la détermination des espèces dominantes bien cristallisées (NaCl ; CaSO₄, 2H₂O ; CaCO₃ en particulier).
- **Un diagnostic à partir de considérations thermodynamiques.** Cette démarche permet de prévoir théoriquement la nature et la quantité de sels susceptibles de précipiter dans une solution de composition donnée, qui se concentre par évaporation (Droubi, 1976). Cependant, quand on compare les résultats obtenus par les rayons X et ceux découlant de la simulation thermodynamique, on peut constater parfois une certaine discordance. En effet, un certain nombre de sels prévus par les calculs ne sont pas diagnostiqués par diffractométrie des rayons X.
- **Un diagnostic à partir de l'observation au microscope électronique à balayage couplé avec une microsonde.** Cette technique constitue un bon instrument pour l'étude de la morphologie des différents sels, et surtout des relations existant entre ces derniers et les autres constituants du sol. Cependant,

cette technique a aussi ses limites. Elle ne permet pas en effet, de distinguer avec certitude les différentes phases, ou les polymorphes d'un même sel. Par exemple, il n'est pas toujours aisé de séparer les phases de Na_2SO_4 (mirabilite et thénardite par exemple) ou de MgSO_4 (épsomite et hexahydrate). Le couplage M.E.B.-microsonde est indispensable dans ce type de recherches, car d'une part, un même sel peut se présenter avec des formes très variables et d'autres parts des sels différents peuvent donner des formes de cristallisation semblables. Enfin, ce couplage permet de mettre en évidence des minéraux existant en très petites quantités comme la Barite (BaSO_4) ou la célestite (SrSO_4), qui ne sont ni détectables au rayons X, ni pris en compte dans la paragenèse des sels par simulation de l'évaporation de solutions salines.

Tous les sols salés de ces régions sont à structure non dégradée malgré une forte sodisation (domaine de la salsodisation). Le pH n'est pas très élevé. Le faciès chimique est généralement chloruré-sodique. Ce sont des sols salins à complexe sodique. Ils ont évolué dans « la voie saline neutre » par opposition à « la voie alcaline ». (Cheverry, 1974 in Halitim, 1988).

Le suivi de la qualité des sols et des eaux dans les périmètres irrigués est nécessaire pour la mesure de la durabilité du système de production. A ce titre, la modélisation des mouvements des sels dans les sols irrigués est un moyen pour prédire l'évolution de ces derniers. Donc, la compréhension du phénomène est tellement importante, nécessite le recours à la modélisation. La mise en exploitation des sols salés dans les zones arides où les eaux d'irrigation sont elles-mêmes fortement minéralisées, peut être facilitée si l'on dispose d'un moyen de prévision du devenir des sols et des eaux. (Rieu et Cheverry, 1976).

En ce qui concerne la modélisation géochimique, globalement, le modèle thermodynamique utilisé rend bien compte du fonctionnement géochimique de ces minéraux salés. En particulier, il prédit la présence de presque tous les minéraux observés et donne les grands traits de la chromatographie des ions dans le paysage. (Tardy, 1969).

Lorsqu'un minéral AB précipite au cours de la concentration de la solution du sol, A et B ne peuvent augmenter simultanément car le produit de solubilité (Q) : $Q = (A).(B)$ reste constant. Ainsi, si $A > B$, l'activité de A, (A) augmente tandis que celle de B, (B) diminue ; et inversement, si $B > A$, (B) augmente et (A) diminue. L'alcalinité est définie comme la somme des espèces réactives susceptible de neutraliser des protons et s'exprime en mol/l. Dans les eaux naturelles, l'alcalinité est principalement carbonatée. Quand la calcite précipite

(CaCO₃), l'alcalinité carbonatée et le calcium ne peuvent augmenter simultanément. Si le nombre de charge de calcium est supérieur à l'alcalinité, la molarité du calcium augmente et l'alcalinité diminue. Dans la situation inverse, la molarité en calcium diminue et l'alcalinité augmente. Ce concept d'alcalinité résiduelle appliqué à la calcite a été généralisé à la précipitation successive de plusieurs minéraux (Van Beek et al. 1973 ; Droubi., 1976). L'alcalinité résiduelle généralisée est alors calculée en soustrayant les charges de cations et en ajoutant celle d'anions impliqués dans les précipitations, à l'alcalinité. (Marlet ,2007).

V-1-Les Modèles Appliqués Aux Sols Sales

Les modèles de simulations

Le système constitué par un sol et la solution qui l'imprègne, dans une ambiance climatique donnée, soumis à une irrigation donnée, est le siège d'un ensemble de modifications physiques et chimiques tendant simultanément à aboutir à un état d'équilibre donné. (Rieu et Cheverry, 1976).

V-1-1-La conception des modèles appliqués aux sols salés

La modélisation des phénomènes de salinisation comporte plusieurs étapes :

1. L'acquisition de données à diverses échelles d'espace et de temps ;
2. Le dépouillement des résultats et la mise en évidence d'un certain nombre de mécanisme ;
3. La modélisation des mécanismes observés ; ceci conduit donc à fixer leur importance relative, puis à vérifier si la réunion de ces mécanismes permet à elle-seule de décrire les résultats expérimentaux ;
4. Enfin, l'utilisation du modèle à des fins pratiques ; cette dernière étape représente la simulation des phénomènes mais elle nécessite de rassembler, préalablement, un certain nombre de données physiques et chimiques.

La modélisation implique un choix entre plusieurs types de modèles. On oppose les modèles mécanistes aux modèles fonctionnels. (Cherbuy, 1991). Les modèles sont donc la représentation très simplifiée de phénomènes naturels soit à cause d'une connaissance encore limitée dans certains domaines, soit à cause des difficultés d'élaboration du programme, soit enfin pour des raisons strictement économiques. Les modèles déterministes et mécanistes sont actuellement les plus utilisés.

La modélisation numérique est un outil qui permet de synthétiser et reproduire des observations. Elle demande une démarche propre et des questions préalables.

Qu'est-ce que je cherche à modéliser ? Qu'est-ce que j'attends de mon modèle ? Quel logiciel choisir ? Comment évaluer la qualité de mon modèle ? Quels sont les variables qui portent une information et de quelle information s'agit-il ? (Richard, 2010).

Les sols représentent un compartiment clé des écosystèmes terrestre qui évoluent en permanence sous l'effet de forçages extérieurs (homme et changement globale notamment) ; pour pouvoir prédire ces évolutions, il est nécessaire de mettre au point des outils de modélisation capables de prendre en compte les circulations de la solution du sol pour rendre compte l'impact d'évènements climatiques extrêmes ou de pratiques culturales. (Samouëlian et al, 2007).

V-1- 2- La modélisation de l'évolution de la solution du sol

Au cours du temps, la solution du sol peut évoluer sous l'effet d'une dilution (généralement à la suite de pluies et /ou d'irrigation) ou d'une concentration sous l'effet de l'évaporation. Les principaux changements d'états sont donc la dissolution et la précipitation des sels ou d'argiles. Les auteurs se sont plus particulièrement penchés sur le phénomène de précipitation, très courant dans les zones salées des régions sèches. (Cherbuy, 1991).

La réalisation de modèle géochimique va donc permettre de prévoir l'évolution de la composition de la solution du sol, mais également, en association avec la modélisation des transferts, la répartition des sels dans le profil, qui dépend des produits de solubilité des différents composés. (Cherbuy, 1991).

Quelque soit le module considéré, il est nécessaire de caractériser les phases solides-liquides et l'interface solide-solution. (Samouëlian et al., 2007). Selon Cherbuy(1991), la plupart des modèles établissent dans un premier temps, la composition de la solution initiale, dans un deuxième temps, la composition de la solution au cours d'une concentration ou une dilution.

- **Modélisation d'une évaporation ou d'une dilution**

La modélisation de l'évaporation, essentiellement utilisée dans le cas des sols salés, permet de connaître l'ordre et l'apparition des minéraux, les quantités précipitées, les modifications induites pour la composition de la solution (le modèle EVAPOR 5Hegelson et al, 1970 ; Fritz, 1976) ; le modèle GYPSOL (Valles, 1988)). Le programme procède par petite évaporation de la solution et son état de saturation.

La modélisation géochimique et son application aux phénomènes de salinisation se sont beaucoup développées en France. Les nombreux travaux réalisés par (Droubi, 1976 ; Rieu, 1978 ; Dosso, 1980 ; Perret, 1982 ; Daoud, 1983) ont permis de bien progresser dans ce domaine.

V-1-3-Approche Thermodynamique des paramètres physico-chimiques

Quelque soit le modèle choisi, par exemple le modèle Phreeqc (Parkhurst et Appelo, 1999 ou 2013), Minteq (Gustafsson, 2001), CHESS (Van der Lee, 1998) ou encore KINDIS (Madé et al. 1994) les variables requises sont : la connaissance des compositions chimiques initiales des phases liquides et solides, et les conditions physico-chimiques du milieu. Ces modèles mécanistes se distinguent par leurs prises en compte différentes de l'interface solide-solution, et par leurs bases des données. (Samouëlian et al. 2007).

V-1-4- Application du Logiciel/ Argument géochimique

Etats des minéraux dissouts dans l'eau (étude de l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux utilisées en irrigations des sols de la région d'étude ; Ziban

Phreeqc interactive version.3.1.4-8929 est un programme de computer écrit par le langage C et C++ utilisé pour la simulation des réactions chimiques. Grâce à ce logiciel, on peut calculer les indices de saturation, la distribution des espèces aqueuses, la densité et la conductance spécifique de la composition aqueuse des solutions. Phreeqc utilise les équations de l'association ionique, Pitzer, et SIT (Specific ion interaction theory) dans les calculs. Ce programme a été l'objet d'un stage de courte durée au niveau d'INRA-PACA-Avignon.

Aussi que, on a fait recours à l'utilisation de la thermodynamique par la simulation de la concentration des ions majeurs (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{++} , Na^+ , Mg^{++} , K^+) sous effet de l'évaporation isotherme (25°C) par le logiciel « Phreeqci 2.8 » (version free de laboratoire d'hydrogéologie d'Avignon), en terme d'équilibre sels/solution. Cette simulation permette de voir une idée sur l'état des minéraux responsable de la minéralisation dans les eaux/les solutions du sol et les équilibres entre les minéraux et la solution.

V-1-5-Pratique

Après le téléchargement du logiciel Phreeqc interactive version.3.1.4-8929, nous avons appliqué les trois modèles thermodynamiques :

- Modèle Phreeqc ;
- Modèle Pitzer ;
- Modèle SIT (specific interaction theory) ;

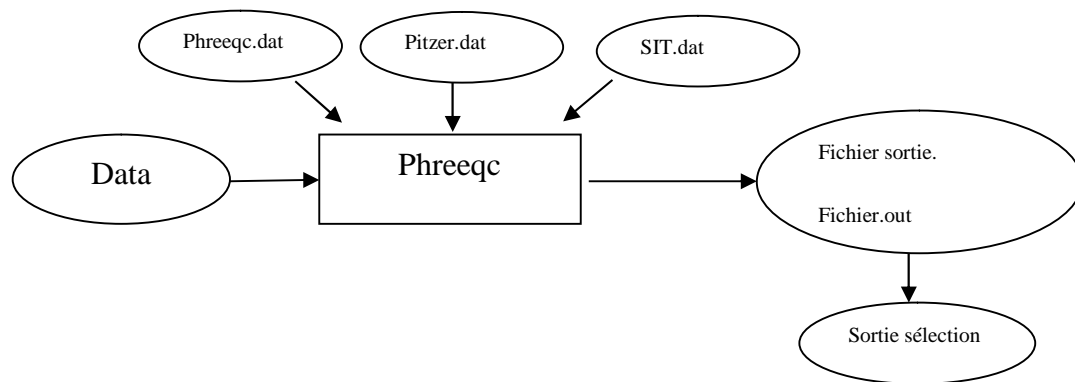


Fig. 35 : Schématisation de la procédure du travail par Phreeqc version.3.1.4-8929.

Utilisation de Phreeqc en ligne de commande :

- a) Phreeqc nom du fichier d'entrée nom du fichier de sortie nom de la base de données thermodynamique ;
- b) Phreeqc nom du fichier d'entrée nom du fichier de sortie : par défaut la base des données thermodynamiques phreeqc.dat, il ya autres choix : pitzer.dat pour le modèle Pitzer, sit.dat pour le model SIT

La méthodologie du travail suivi est comme suit :

9. Les données brutes ;
10. Tester la validité des analyses : $\sum \text{cations}$, $\sum \text{anions}$ et

$$\Delta = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}}$$

11. Gardé les échantillons tels que $\Delta < 0.15$
12. Correction proportionnelle des données
13. Fichier d'entrée corrigé : $\sum \text{cations corrigé} = \sum \text{anions corrigé}$
14. Traitement des données avec Phreeqc, en utilisant la base de données par défaut ; phreeqc.dat
15. Transfert du fichier data sous fichier Excel

16. Tracer les graphes du log

17. Exemples :

Etude de l'état des minéraux dissouts dans l'eau utilisée en irrigation des sols de la région d'étude : Cas de Sidi Okba.

L'utilisation de la thermodynamique par la simulation de la concentration des ions majeurs (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{++} , Na^+ , Mg^{++} , K^+) sous effet de l'évaporation isotherme (25°C) par le logiciel **Phreeqc interactive version.3.1.4-8929**. Cette simulation permet de voir une idée sur l'état des minéraux responsable de la minéralisation des eaux et les équilibres entre les minéraux et la solution. Elle montre que ces eaux sont saturées par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et elles sont sous-saturées pour l'halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés tendent à se précipiter par contre les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation (en dissous). (Voir l'exemple dans le tableau suivant).

Tableau 25 : Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc) des eaux souterraines (forages) de la nappe Miopliocène de la localité de Sidi Okba.

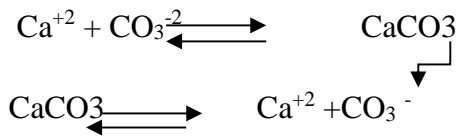
Variable	Min	Max	Moyenne
IS Halite	-5,29	-4,21	-4,82
IS Gypsum	-1,60	-0,14	-0,67
IS Dolomite	-1,48	1,92	0,57
IS Calcite	-0,80	0,85	0,22
IS Aragonite	-0,95	0,70	0,08
IS Anhydrite	-1,88	-0,46	-1,02

Degré de saturation vis -à vis de la calcite et du gypse, Application à l'étude des eaux d'irrigation de la localité de Sidi-Okba.

Les résultats des calculs sont rapporté sous forme de diagramme d'équilibre. Nous présentons les différnts états d'équilibre des eaux par rapport les minéraux de calcite et de gypse.

✚ Etat de saturation vis-à -vis de la calcite

L'équation d'équilibre de la calcite s'écrit :



Al'équilibre $a_{\text{ca}^{++}} * a_{\text{co}_3^{-2}} / a_{\text{calcite}} = K_{\text{ps calcite}}$

La calcite pure et à l'état standard $a_{\text{calcite}} = 1$

$a_{\text{ca}^{++}} * a_{\text{co}_3^{-2}} = K_{\text{ps calcite}}$

$\log a_{\text{ca}^{++}} + \log a_{\text{co}_3^{-2}} = \log K_{\text{ps calcite}} = -8.45$ à 25 °C à l'état de saturation.

$\log a_{\text{ca}^{++}} + \log a_{\text{co}_3^{-2}} > \log K_{\text{ps calcite}}$, la solution est sur saturée.

$\log a_{\text{ca}^{++}} + \log a_{\text{co}_3^{-2}} < \log K_{\text{ps calcite}}$, la solution est sous- saturée.

Selon les trois modèles thermodynamiques (phreeqc, pitzer et SIT), les points représentatifs des solutions (Fig36-a,b et c), montrent que la plupart des points d'eau sont sur saturées par rapport de la calcite, il ya quelques points qui sont sous saturées à saturées par rapport à la calcite.

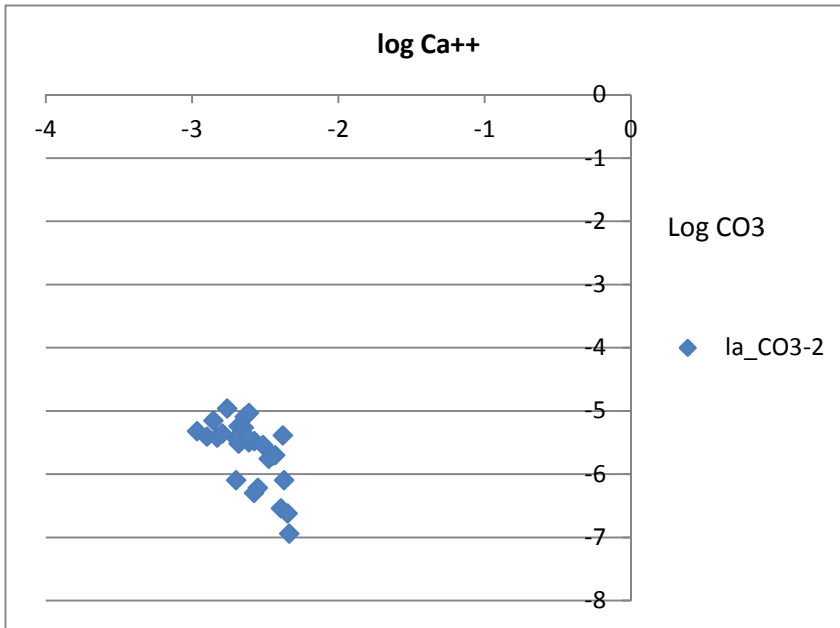


Fig. 36-a : Diagramme d'équilibre de la calcite (modèle Phreeqc) des eaux souterraines de sidi Okba. Calcite : $\log K = -8.45$.

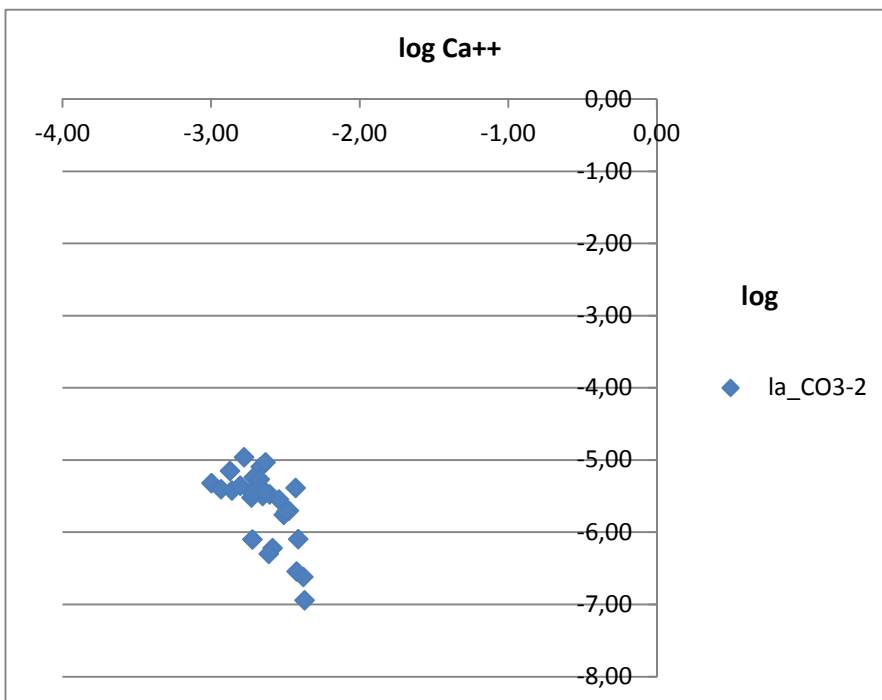


Fig.36-b : Diagramme d'équilibre de la calcite (modèle Pitzer) des eaux souterraines de sidi Okba. Calcite : $\log K = -8.38$.

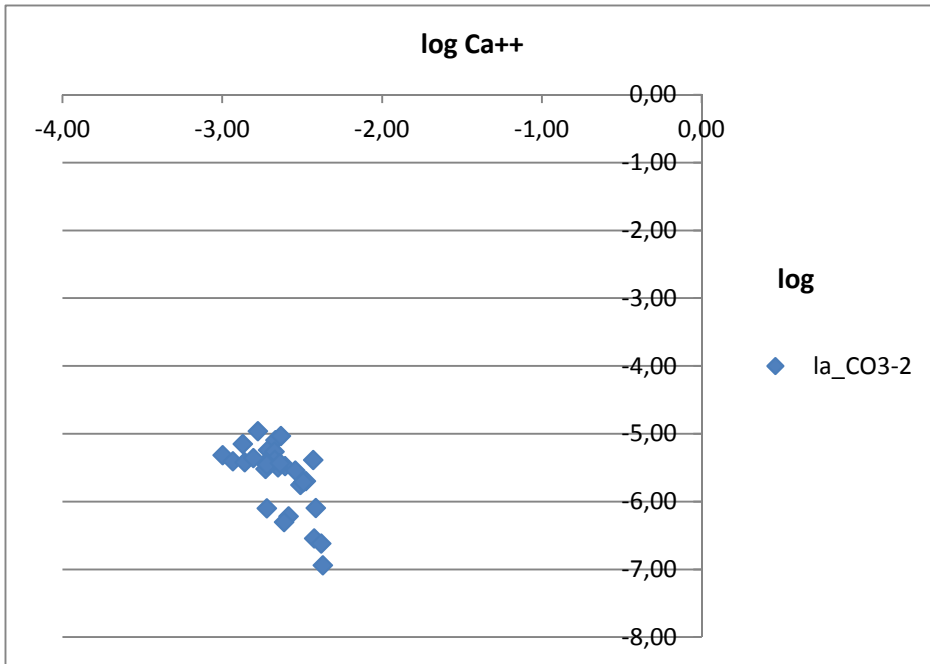
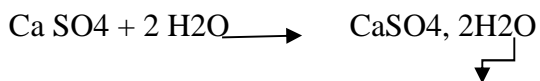


Fig.36-c : diagramme d'équilibre de la calcite (modèle SIT) des eaux souterraines de sidi Okba. Calcite : $\log K = -8.45$.

Etat de saturation vis-à-vis du gypse

L'équation d'équilibre du gypse s'écrit comme suit



Al'équilibre $\mathbf{a_{Ca^{++}} * a_{SO_4^{-2}} / a_{\text{gypse}} = K_{ps} \text{ gypse}}$

Le gypse à l'état standard $a_{\text{gypse}} = 1$

$$\mathbf{a_{Ca^{++}} * a_{SO_4^{-2}} = K_{ps} \text{ gypse}}$$

$\log a_{Ca^{++}} + \log a_{SO_4^{-2}} = \log K_{ps} \text{ gypse} = -4.58$ à 25 °C à l'état de saturation.

$\log a_{Ca^{++}} + \log a_{SO_4^{-2}} > \log K_{ps} \text{ gypse}$ la solution est sur saturée.

$\log a_{Ca^{++}} + \log a_{SO_4^{-2}} < \log K_{ps} \text{ gypse}$, la solution est sous- saturée.

Selon les trois modèles thermodynamiques (phreeqc, pitzer et SIT), les points représentatifs des solutions (Fig37-a,b et c), montrent que tous les points d'eau sont sous saturée vis-à-vis du gypse.

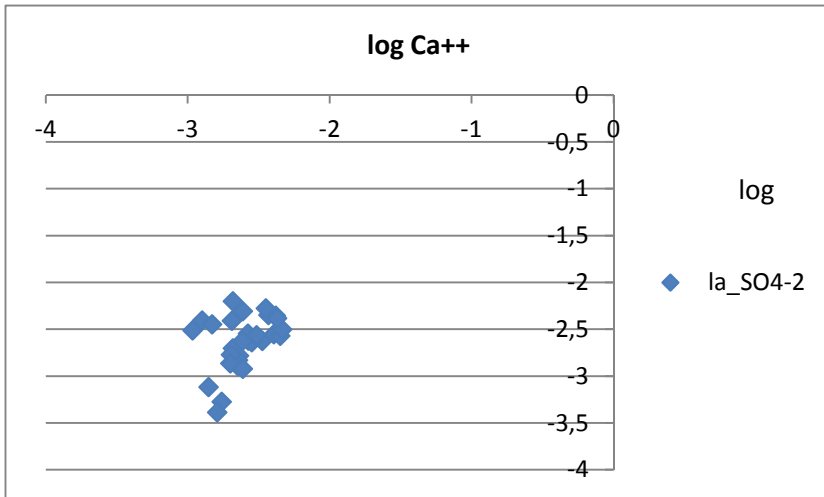


Fig. 37-a : Diagramme d'équilibre du gypse (modèle Phreeqc) des eaux souterraines de sidi Okba. Gypse : $\log K = -4.58$

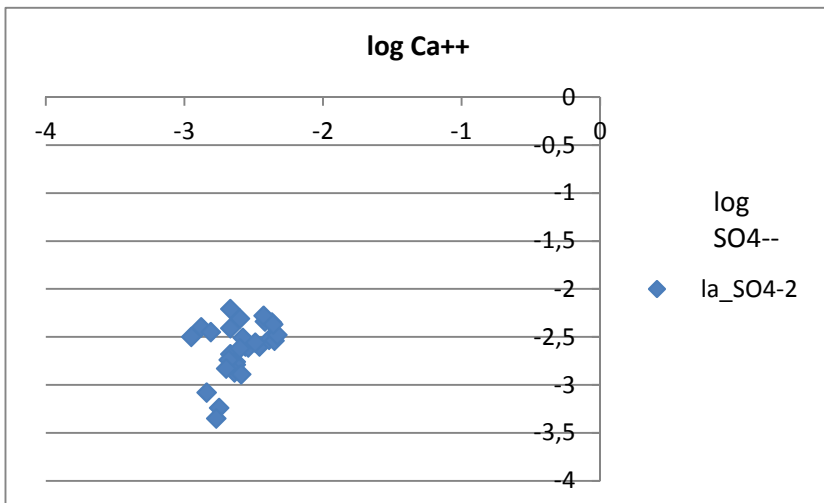


Fig. 37-b : Diagramme d'équilibre du gypse (modèle Pitzer) des eaux souterraines de sidi Okba. Gypse : $\text{Log } K = -4.58$

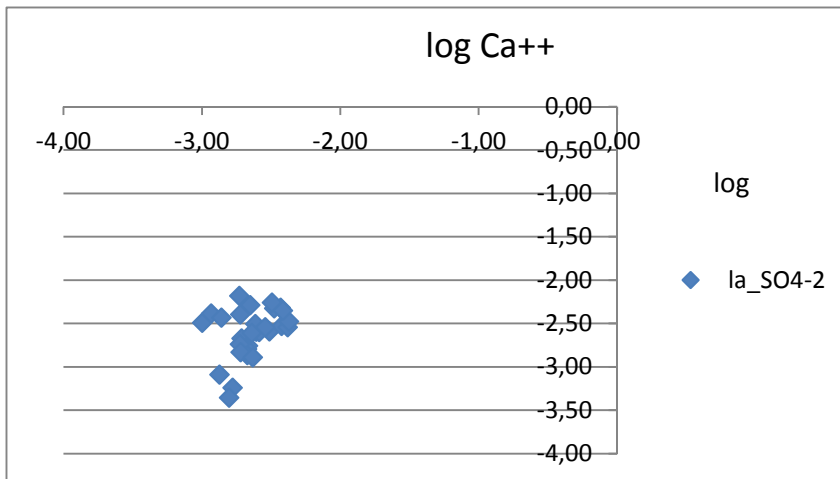


Fig.37-c : Diagramme d'équilibre du gypse (modèle SIT) des eaux souterraines de Sidi Okba .Gypse : $\log K = -4.61$

V-2- Conclusion

L'application du modèle thermodynamique a pour l'objectif la modélisation géochimique des interactions entre sols et solutions, avec application à l'étude des eaux de la région de Biskra, exemple de la zone de Sidi Okba au moyen du logiciel Phreeqc interactive version.3.1.4-8929. Elle montre que ces eaux sont saturées par rapport de la calcite et par conséquent, l'aragonite et la dolomite et elles sont sous-saturées pour le gypse, l'halite et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés tendent à se précipiter principalement la calcite, par contre les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation (en dissous) et en premier lieu le gypse.

Chapitre VI : EVALUATION ET MODELISATION GEOCHIMIQUES DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES ET DE SURFACE UTILISEES POUR L'IRRIGATION DES TERRES AGRICOLES DANS UNE REGION ARIDE : CAS DE LA REGION DE ZIBAN : Sidi Okba, BBA et El-Outaya

Introduction et état de l'art

L'eau est la clef de tous les développements socio-économiques et de la préservation d'écosystèmes sains. (Phocaidès, 2008). Toutefois, et à l'heure actuelle, le problème de l'eau est un problème majeur de la civilisation moderne. (Boulaine, 1978). Sachant que 70 à 75 % de toute l'eau utilisée dans le monde est consommée par l'agriculture (Cheverry et Robert, 1998), et ce pourcentage atteint 95 % dans plusieurs pays en développement. (Phocaidès, 2008).

Le terme « irrigation » a été défini, dans les actes de la Consultation sur l'irrigation en Afrique (Lomé, Togo, 1997), comme l'application d'eau complémentaire à celle fournie directement par les précipitations naturelles pour la production agricole. (Phocaidès, 2008). Toutefois, la réussite des productions végétales dans les régions arides dépend des eaux souterraines utilisées (Snoussi et Halitim, 1998). Néanmoins, le problème de la salinisation apparaît avec l'introduction de l'irrigation dans le bassin Méditerranéen. (Proust, 2003). Donc, La culture irriguée doit s'accommoder d'une certaine salure du sol dont dépendra le choix de la culture pratiquée. (Durand, 1983).

Récemment, la compétition pour la ressource en eau a pris un tour plus aigu. Malgré la construction, dans de nombreux pays, de grands barrages constituant des réserves d'eau importantes, l'eau d'irrigation manque. Les agriculteurs sont alors dans l'obligation d'avoir recours à des eaux d'irrigation de moins bonne qualité (eaux d'irrigation recyclées, eaux usées des villes, eaux souterraines...etc.). Par conséquent, le risque de salinisation secondaire des sols est alors accru. (Cheverry et Bourrié, 1998). De ce fait que, l'eau est un facteur limitant de la production agricole, près de la moitié des surfaces irriguées dans le monde seraient menacées par ce risque majeur ; la salinisation secondaire (Lahlou et al, 2000). D'autre part, le degré de salinisation d'une surface irriguée dépend de plusieurs facteurs, principalement la

qualité de l'eau d'irrigation, la nature du sol irrigué, les conditions climatiques et le niveau de la nappe en question.

Dans les pays très développés en fin, le risque de salinisation prend désormais une facette nouvelle. La qualité des eaux de drainage sortant des périmètres irrigués puis stockées dans des réserves d'eau soumises à évaporation y est désormais en cause. Les eaux résultant d'une activité agricole pourtant aussi traditionnelle que l'irrigation commencent à être perçues par le public, à cause de leur salinisation et du cortège d'éléments chimiques de transition ou de métaux lourds que cela implique, comme des eaux « usées » potentiellement dangereuses pour l'environnement, au même titre que certaines eaux résiduaires d'activités industrielles ou urbaines, ou encore que certaines déjections animales. (Cheverry et Bourrié, 1998). L'exemple le plus spectaculaire est celui de la vallée San Joaquin en Californie, aux USA. Des incidents récents (mortalité d'oiseaux), attribués à une teneur excessive en sélénium des eaux du réservoir de Kesterson (qui collecte les eaux de drainage de périmètres irrigués), ont ainsi conduit l'état de Californie, sous l'influence de considérations écologiques, à modifier la législation concernant la gestion de ce type d'eau dans cette région (Miyamoto, 1994 in Cheverry et Bourrié, 1998).

Plus généralement, la perception aiguë qu'ont désormais les hommes politiques du fait que l'irrigation dégrade la qualité de l'eau pour ses utilisateurs ultérieurs conduit à des négociations ardues entre Etats : entre les Etats-Unis par exemple et leurs deux voisins : le Canada et surtout le Mexique à propos de la rivière Colorado. On peut s'attendre dans les années à venir à des négociations difficiles entre la Turquie, La Syrie et l'Irak, entre l'Inde et le Pakistan...etc. les phénomènes de salinisation des sols acquièrent incontestablement une dimension géopolitique. (Cheverry et Bourrié, 1998).

Le cri d'alarme a été entendu, mais les savants doivent par exemple connaître en détail la nature des sols d'une région avant de la soumettre aux transformations radicales que provoque l'irrigation. La mise en irrigation des terres évoluant actuellement dans des conditions d'aridité, les transforme complètement, et cette modification peut être défavorable à leur utilisation. Il est donc indispensable de n'apporter l'eau qu'aux sols qui peuvent la supporter et de prendre toutes les mesures de précaution nécessaires, drainage en particulier. (Aubert, 1960).

En zone aride et subaride l'élément essentiel pour la mise en valeur agricole est l'eau, facteur limitant le plus important de la production végétale, la qualité essentielle d'un sol sera de

composer efficacement avec elle. Dans ces régions à faible pluviométrie, c'est, toujours, l'irrigation qui apporte au sol l'eau qui sera mise à la disposition de la plante. Toutes les techniques visant à la conservation des sols et à son amélioration devront par conséquent se soucier de leur porosité, de leur perméabilité et de leur pouvoir de rétention... à titre d'exemple, l'évapotranspiration dans les palmeraies, du pré-Sahara au Sahel, est de l'ordre de 1700 à 2100 mm ce qui nécessite des doses d'irrigation importantes sur le complexe végétal « palmiers dattiers et cultures sous-jacentes ». L'érosion, les apports d'éléments divers, le drainage, le lessivage...seront à prendre en considération dans l'optique de la conservation des sols. (Toutain, non daté). Si l'eau constitue maintenant un facteur limitant ; la gestion irrationnelles de cette ressource est de nature à devenir un facteur de déséquilibre de ces milieux.

En Algérie, la zone aride représente plus de 85 % du territoire national et plus de 20 % des sols irrigués sont concernés par le problème de salinité (Hartani et al, 2009). De plus, la majorité des eaux d'irrigation titrent plus de 2 g/l, ce qui accroît le risque de salinisation des sols dans ces régions (Askri et Bouhlila., 2010). Toutefois, la réussite des productions végétales dans ces régions dépend des eaux souterraines utilisées (Snoussi et Halitim, 1998), traduisant une irrigation agricole plus consommatrice d'eau (75%) (Cheverry et Robert, 1998) tel est le cas de la région de Ziban c'est-à-dire la wilaya de Biskra où elle est composée de 12 Daïras regroupant 33 communes principalement à vocation agricole, ce qui explique la prédominance des quantités importantes d'eau destinées à l'irrigation, surtout, pour les Daïras de Tolga, de Zribet El Oued, D'Ourellal, d'Ouled Djellal et de Sidi Okba.

Les ressources en eau souterraines au Sahara constituent la principale ressource en eau, elles sont essentiellement constituées par : les eaux renouvelables localisées dans les inféro-flux du versant sud des Aurès ; alors que les eaux non renouvelables sont représentées par les deux grands réservoirs des deux bassins sédimentaires : le Complexe Terminal et les Continental Intercalaire(Khadraoui,2008). Elles se localisent au niveau de différentes formations géologiques et peuvent être exploitées par des puits, forages, foggara et parfois à partir des sources libres (Khemgani, 2010).

Méthodes d'irrigations :

L'eau d'irrigation est distribuée au sol de diverses façons qui dépendent en partie du sol par ses propriétés et sa topographie, en partie de l'habileté des agriculteurs qui utiliseront l'eau. (Durand, 1983).De ce fait, les méthodes d'irrigation peuvent se classer en :

- Irrigation ne couvrant qu'une partie du terrain,
- Irrigation en billons,
- Irrigation couvrant tout le sol cultivé, par ruissellement, en planche, en bassins,
- Irrigation en pluie,
- Irrigation souterraine,
- Irrigation localisée.

Le système d'irrigation le plus utilisé dans les palmeraies traditionnelles est la submersion. Au niveau des nouvelles palmeraies, en plus de la submersion, on utilise le système localisé pour les palmiers, le fruitier et le maraîchage (en étage polyculture). Donc, le système d'irrigation est binaire selon la nature et le besoin de l'exploitation agricole.

Relation sol - eau

L'évaluation de la qualité des eaux utilisées pour l'irrigation des sols étudiés, dans l'échelle proposée par Durand (1958) pour les sols irrigables de l'Algérie, montre que ces dernières présentent une forte salinité. Les eaux d'irrigation par leur composition peuvent avoir une influence sur le sol (Coutinet, 1965). Comme, par exemple, les eaux de la nappe du Mio-Plio-quaternaire de la zone Est de la plaine d'El Outaya présente une salinité assez élevée variant entre 1 et 5 g/l (Brinis et al, 2009), leur influence de salinisation ne peut être que négative pour les sols et par conséquent sur la plus part des cultures. Du fait une analyse rigoureuse de leur physico-chimie s'avère nécessaire pour la détermination de la part de leur influence sur la salinisation des sols en question.

Tableau 26 : Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation (Durand, 1958).

Conductivité électrique (dS/m)	Concentration (g/l)	Evaluation américaine	Evaluation russe	Evaluation DURAND de l'Algérie pour
CE < 0.25	< 0.2	Faible salé	Faible qualité	Non saline
0.25 < CE < 0.75	0.2-0.5	Moyennement salée		Salinité
0.75 < CE < 2.25	0.5-1.5	Fortement salée	Risque de salinisation	moyenne
2.25 < CE < 5	1.5-3	T. fortement salée		Forte salinité
5 < CE < 20	3-7	Salinité excessive	Ne peut être utilisée sans lessivage	Très forte salinité Salinité excessive

Il faut rappeler que l'origine de chaque élément chimique, entrant dans le processus de la salinisation ou l'augmentation de la conductivité électrique, soit comme suit :

-Les ions Ca et Mg : 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 de séjour de l'eau dans l'aquifère.

- les ions Cl, Na et K : Ils sont d'origine, principalement, externe. Ils 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 de gisement (Bakalowicz, 1979).

- les ions sulfates : Les eaux naturelles contiennent, pratiquement, toujours des ions sulfates dans 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 (Bakalovicz, 1979).

Donc, le tout n'est pas de trouver l'eau. Encore faut-il que cette eau soit utilisable. Or, dans les régions arides, les eaux souterraines sont très fréquemment salées. Bien souvent le facteur de contrôle n'est plus alors la quantité, mais la qualité. (Schoeller, 1962). Autrement dit, les principaux faciès salés dans les eaux dépendent de leur origine et des transformations subies par concentration, par précipitations, par échanges avec les argiles et, éventuellement, par dissolutions.(Bouteyre et Loyer, 1992).

L'irrigation de grandes étendues est un palliatif efficace à la production agricole de base dans les pays soumis à une trop forte aridité. Mais cette technique a aussi pour inconvénient majeur d'entraîner la salinisations des sols.(Bertrand et al, 1994).

VI- Caractérisation et qualité des eaux d'irrigation

Une grande diversité de ressources hydrauliques caractérise les oasis des Ziban. Selon les régions, ce sont les oueds, les nappes phréatiques ou les nappes profondes qui fournissent

les eaux disponibles. Mais, souvent ces ressources sont utilisées couramment pour l'alimentation des oasis.

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 pérennes sont, en fait, la principale origine de l'alimentation des aquifères, notamment les nappes de l'inféro-flux. (Boutouga, 2012).

Rappelons que la région des Ziban fait partie du Bas Sahara septentrional. Elle se caractérise par une forte potentialité phoenicicole avec près de 5 millions de palmiers dattiers et plus de 9908 points d'eau (forage, puits et sources) inventoriés ainsi que deux barrages irriguant une surface de 99865.4 ha (DSA, 2013) sous forme d'oasis avec une polyculture étagée (palmier dattier, arboriculture et cultures herbacées ou maraîchères) ou sous forme de périmètres irrigués et d'abri-serres plus spécialisés (palmiers dattiers, céréales ou cultures maraîchères).

VI-1- Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation de la région de Sidi Okba ; Zab Chergui

État de l'art :

Le bassin du Zab Est de Biskra s'étend sur une superficie de 9 668 Km² avec une population de près de 349 milles habitants, comprenant six petits bassins versant (bassin versant de oued El Abiod, le bassin de Dermoun, le bassin de oued Djedi, le bassin de oued El Arab, le bassin de oued Zeribet, et le bassin de Biraz-Atrous). Sur le plan administratif, le bassin du Zab Est s'étend principalement sur la région Est de la Wilaya de Biskra. Il comprend cinq Daïra, englobant onze communes : Biskra, Sidi Okba, Chetma, Ain Naga, Zeribet El Oued, M'Ziraa, El Feidh, El Houche, El Hadjeb, M'Chouneche, Khangat Sidi Nadji. (Boutouga, 2012).

Sidi Okba est une région agricole pionnière du Zab Chergui au SE de Biskra, se caractérise par un haut potentiel agricole. Elle possède une superficie agricole utilisée (SAU) de 10025 ha dont 7513 ha irriguées avec plus de 700 forages recensés (ANRH, 2008; DSA de Biskra, 2013). En effet, une double source d'eau (barrage et forages) se manifeste, mais le recours aux eaux souterraines fait la provenance dominante de l'irrigation.

VI-1-1- Ressource en surface : Le barrage « Foum-El-Gherza » :

Le barrage de Foum-el-Gherza est un joyau hydrotechnique situé à 20 km à l'est de la ville de Biskra (figure38). Il a été réalisé durant la période 1948 -1950 sur le site le plus

approprié dans la région (S.E.G.G.T.H, 2001). Cet ouvrage d'art a permis à la région de Sidi Okba de garder sa vocation économique basée sur l'agriculture durant un demi-siècle, du fait qu'il a aidé à contrer la sécheresse qui sévit dans la région depuis une vingtaine d'années. Ce barrage a permis en outre l'extension des palmeraies.

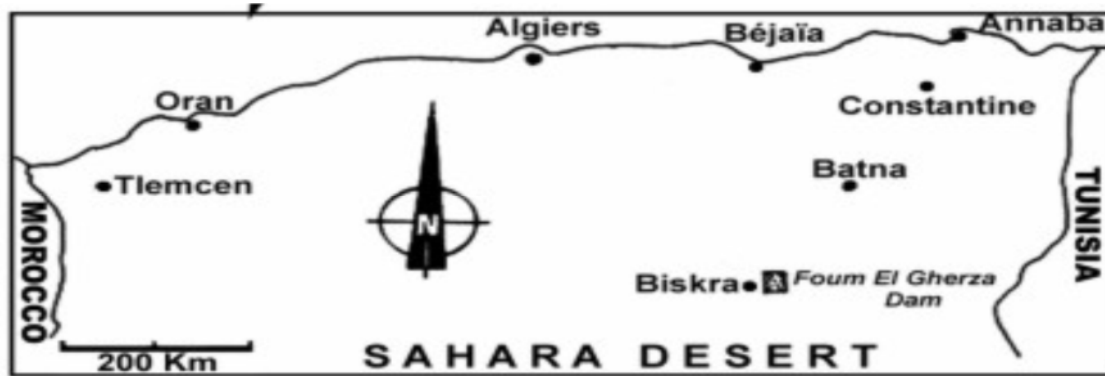


Fig.38: Situation géographique du barrage de Foum-el-Gherza Biskra, Algérie ((Toumi et Remini., 2004).

Cette infrastructure traduit l'intelligence de l'être humain étant donné qu'elle se compose de deux parties qui sont une voûte de 126m et une culée de 60m de longueur chacune. Sa hauteur maximale atteint 73m et sa capacité initiale est de l'ordre de 47 millions de mètres cubes (S.E.G.G.T.H., 2001). (Toumi et Remini, 2004).

Cet ouvrage a un très grand intérêt économique dans la région, basée sur l'agriculture durant un demi-siècle, du fait qu'il a aidé à contrer la sécheresse qui sévit dans la région depuis une vingtaine d'années ; puisque il permet d'irriguer plus de 300.000 palmiers dattiers des palmeraies de Sidi Okba, Garta, Seriana et Thouda (S.E.G.G.T.H, 2001; Remini, 2001 et Krimil, 2009). Cependant, il se trouve amputé chaque année d'un volume important estimé en moyenne à 5 millions de m³. Ces pertes sont dues au site d'implantation de cet ouvrage qui est composé de calcaires cristallins du maëstrichtien fissurés jusqu'à une profondeur de 80 m (GOUSKOV, 1952in Toumi et Remini, 2004). Par ailleurs, les oueds des Aurès acheminent vers la région des Ziban des quantités d'eau très importantes. De ce fait, le barrage de Foum El Gherza est alimenté par l'oued El Abiod où il prend sa source à une altitude de 1900 m et se jette dans le Chott Melghir. (Chabour, 2006).

Selon Aidaoui (1994), les eaux du barrage de Foum-El-Gherza, selon le calcul du SAR, sont utilisables dans tous les terrains du périmètre, car la valeur obtenue de ce paramètre SAR, n'a jamais dépassé 1.5, appartient à la catégorie S1 (0 à10), donc elle correspond aux eaux utilisables pour l'irrigation.

Depuis 2011(l'année de commencement de notre étude), période marquée par la pénurie d'eau, le recours à l'irrigation des terres agricoles de la région de Sidi-Okba par les eaux de forage est primordial car l'eau du barrage reste insuffisante. En effet l'exploitation de deux barrages sur la région ne se fait que pour l'irrigation des cultures.

VI-1-2- Ressource en eau souterraine : les forages

La région du Zab Est de Biskra présente des ressources en eau souterraines très importantes, représentées par les nappes des deux systèmes aquifères du Sahara septentrional, le complexe terminal et le continental intercalaire. (ERESS, 1972 in Achour, 1990).

Les forages qui ont été recensés au niveau de la plaine alluviale du Zab Est, n'exploitent que les eaux de la nappe de Miopliocène. La profondeur des forages dépasse 70 m à 900 m. (Boutouga, 2012). L'exploitation des eaux souterraines est la principale ressource pour l'alimentation en eau potable qu'agricole pour les habitants de la région de Biskra.

Selon notre enquête sur terrain et le recueil de quelques analyses des eaux d'irrigation souterraine (les forages) disponibles faites par d'autres organismes comme ANRH de la zone de Sidi Okba, la représentation du bilan ionique sur le diagramme de Piper montre que :

- 60% des échantillons analysés ont un faciès chloruré sodique ;
- 40% des échantillons analysés ont un faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésique ;

Ces eaux ont une classification selon le diagramme de Riverside de C4S1 à C4S3 et C5S3.

Selon l'étude effectuée par Boutouga en 2012, basée sur une trentaine d'échantillon d'eau des forages analysés au niveau de L'ANRH de Ouargla, il apparaît que le faciès le plus dominant est chloruré sodique (78,26% des échantillons) et à un degré moindre le faciès chloruré magnésien (9,1% des échantillons) ainsi que le faciès sulfaté sodique (7,28% des échantillons), avec l'apparition d'un faciès sulfaté magnésien de faible représentativité (4,55% des échantillons). La présence des eaux chlorurées magnésiennes et sulfatées sodiques peut être à l'origine d'un échange de base qui peut se produire entre le Na^+ et le Mg^{2+} .

Par ailleurs, diverses études entreprises depuis une trentaine d'années, ont montré que les eaux de cette région sont caractérisées par une minéralisation totale excessive, le plus souvent associées à une dureté élevée et des concentrations élevées en fluorures (Achour, 1990 ; Azout et Abraham, 1978 ; Pinet et al. 1961in Boutouga, 2012).

Afin de caractériser les eaux d'irrigation, une enquête est effectuée sur le terrain de la région de Sidi Okba suivie par une évaluation de la qualité physico-chimique des eaux d'une trentaine d'échantillons d'eau d'irrigation provenant de forages réalisés dans la nappe du Miopliocène, ainsi que leur aptitude à l'irrigation des terres cultivées, principalement le palmier dattier. Les analyses sont effectuées au niveau du laboratoire central du CRSTRA.

Dans cette étude, ces eaux proviennent de forages, sont destinées à l'irrigation des terres agricoles dans les localités de Tajdid, Safel Tajdid, Mangae Bougtaf, Feidh el-ghareg et Garta, ont été sélectionnées durant la campagne agricole 2014, sachant que, par conséquence, l'exploitation des nappes souterraines par sondage a permis l'installation de nouvelles palmeraies depuis quelques années seulement surtout après 2001 (dans le cadre FNDA) comme celles dans ces localités cités en dessus (Fig.39). Deux modes d'irrigation (goutte à goutte et gravitaire) sont pratiqués dans cette région, sachant que le volume d'eau destiné à l'irrigation n'est pas quantifié il est distribué selon la satisfaction de l'agriculteur d'une part et la disponibilité des facteurs de production (eau et électricité) d'autre part; les techniques de plantation des palmiers dattiers sont en cuvettes ou en fosses, à une profondeur de 1 à 1,5 m selon l'épaisseur de la couche sablo-limoneuse présente.

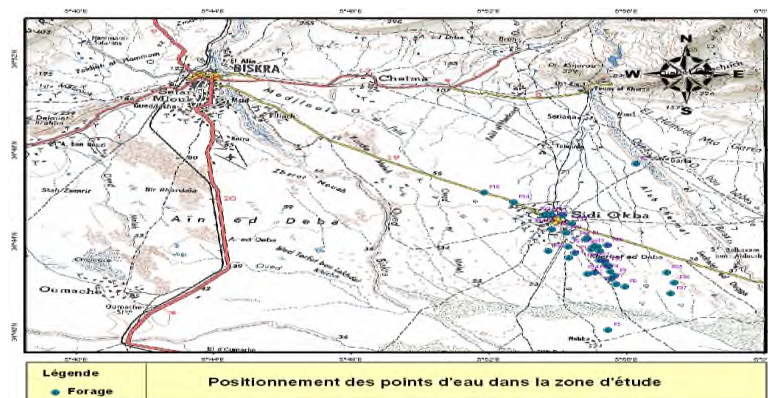


Fig. 39 : positionnement des points d'eau sélectionnés dans la zone d'étude : Sidi Okba.

Les calculs géochimiques ont été réalisés avec le modèle Phreeqc (version interactive 3.1.4-8929, Parkhurst et Appelo, 2013). Le test de corrélation de type Pearson est fait à l'aide de XLSTAT. Le diagramme de Piper a été construit au moyen du logiciel Diagrammes (Simler, 2013).

Du fait de la spécificité des caractéristiques physico-chimiques des eaux, la connaissance du contexte géologique et hydrogéologique s'avère un outil nécessaire.

Du point de vue géologique, et selon l'étude du contexte géologique et hydrogéologique détaillé des chapitres précédents, le domaine saharien est constitué essentiellement par des sédiments marins et lagunaires, depuis le Cénomaniens jusqu'à l'éocène moyen, avec une grande variété de terrains calcaires, dolomitiques et marneux (Aidaoui, 1994). La série néogène dans la région de Sidi Okba, traversée par plusieurs dizaines de forages, est constituée d'une alternance d'argiles, d'argiles sableuses ou sables argileux et de sables avec des passées graveleuses. Dans cette série deux sous-ensembles se différencient, avec à la base un sous-ensemble argilo-sableux (ou gréseux) et au sommet un sous-ensemble argilo-sableux et graveleux (Chebbah, 2007). Cette plaine est découpée par les lits des oueds issus des Aurès. Les formations superficielles associées sont composées de limons et de sables à débris végétaux. Dans ces dépôts se sont développés des sols riches en débris organiques donnant lieu à des îlots très fertiles. La prospérité de la plaine du Zab Chergui, partie du grand bassin versant saharien du Chott Melghir, est due aux apports limoneux issus des épandages de crues de nombreux oueds des Aurès (oued Biraz, oued Abiod et oued Melah). (Aidaoui, 1994; Bougherara et Lacaze, 2009 ; ANRH, 2011). La nappe du Miopliocène dite nappe des sables constitue la ressource hydrique principale dans la région. Ces eaux sont mobilisées surtout pour l'irrigation agricole. Le système aquifère de cette nappe est hétérogène; il est, le plus souvent, constitué de couches aquifères de diverses perméabilités et d'épaisseurs. Cette nappe est fortement exploitée dans la partie Est de la wilaya de Biskra et notamment Sidi Okba, et sa profondeur varie de 100 à 900 m (Messameh et al 2009).

VI-1-2-1-Hydrogéochimie

Les données statistiques des analyses physico-chimiques des eaux de forages exploitées dans la présente étude sont présentées dans le tableau 27 et leur matrice de corrélation dans le tableau 28.

Tableau 27 : Les paramètres statistiques des eaux analysées.

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
conductivité ms/cm	3,720	13,650	5,994	1,996
Ca	5,810	29,650	15,397	6,871
Mg	1,600	93,960	21,976	17,389
Na	7,630	68,100	27,532	10,632
K	0,120	0,790	0,318	0,129
Cl	14,000	85,000	36,161	14,795
SO4	2,300	50,000	21,312	12,432
HCO3	0,420	9,440	4,426	2,188
NO3	0,010	0,670	0,182	0,180
pH	6,600	7,880	7,318	0,289

Tableau 28 : Matrice de Corrélation (Pearson) des différents paramètres de la qualité chimique des eaux d'irrigation utilisées dans la région de Sidi-Okba.

	conductivité ms/cm	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	pH
conductivité ms/cm	1,000	0,803	0,833	0,715	0,034	0,645	0,677	0,051	0,436	-0,354
Ca		1,000	0,644	0,250	0,010	0,553	0,706	-0,169	0,787	-0,559
Mg			1,000	0,579	0,285	0,860	0,450	-0,115	0,319	-0,086
Na				1,000	0,061	0,402	0,258	0,478	-0,181	0,068
K					1,000	0,357	-0,024	-0,286	-0,233	0,378
Cl						1,000	0,198	-0,228	0,293	-0,103
SO4							1,000	-0,221	0,450	-0,339
HCO3								1,000	-0,308	-0,110
NO3									1,000	-0,685
pH										1,000

Les valeurs en gras montrent un niveau de signification de 0.05 (5%).

Les résultats d'analyses des paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe du Mio pliocène montrent des valeurs élevées de la conductivité électrique (3.72– 13,65 mS/cm). Elle a une corrélation significative liée, principalement, à la forte présence de calcium Ca⁺⁺,

magnésium Mg^{++} , Sodium Na^+ , chlorures Cl^- , sulfates SO_4^{--} et nitrates NO_3^- . Quoique que les eaux soient fortement salées. (Fig.40), la faible liaison entre les éléments évaporitiques est principalement due à la nature des matériaux provoquant la salinisation de ces eaux.

Le pH de ces eaux est presque neutre, il varie entre 6,6 et 7,88 avec une moyenne de 7,318; ces valeurs sont admises pour l'irrigation des terres agricoles car la faible liaison $pH-HCO_3^-$ les justifie, sachant qu'un pH compris entre 8 et 9 est généralement retenu comme limite de dégradation de la structure (Aubert, 1983).

Selon la carte de salinité établie, la CE augmente progressivement de l'amont vers l'aval de la zone d'étude, ceci dans le sens de l'écoulement souterrain. (Voir Fig.41 ; Fig. 31 de la carte piézométrique de la nappe de Miopliocène de la région de Biskra en Novembre 2009, établi par CRSTRA, 2010).

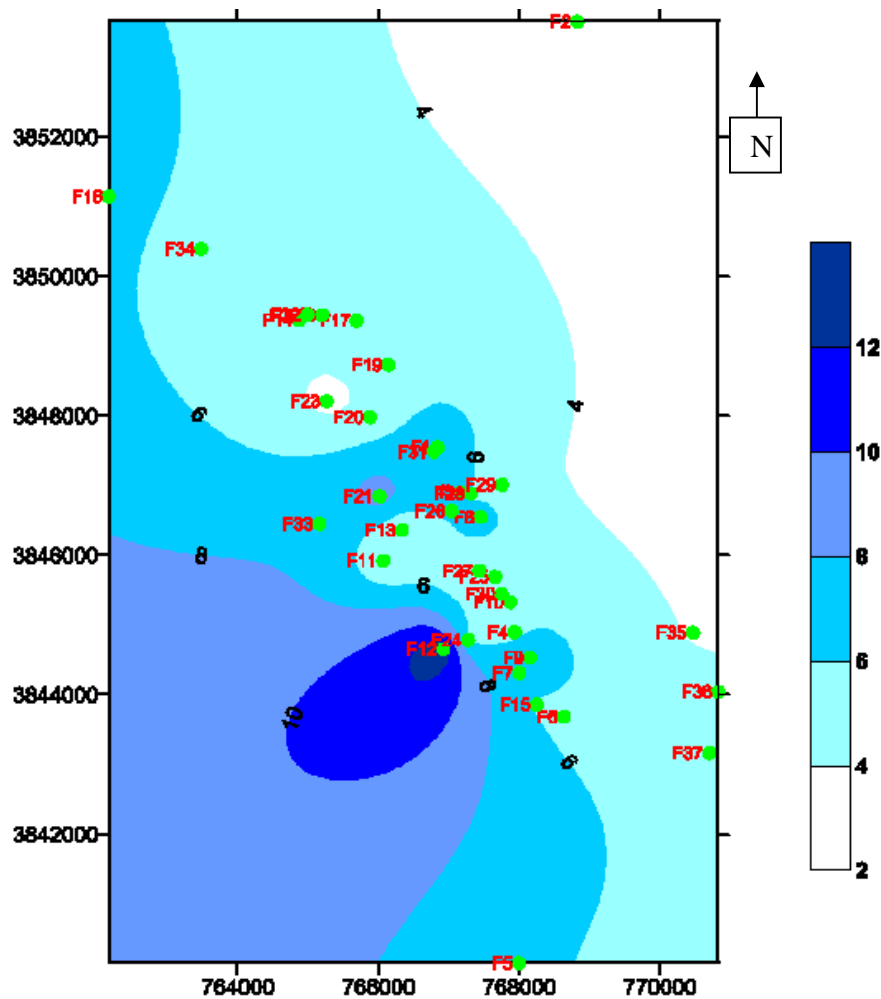


Fig. 40: Carte de la salinité (CE mS/cm) des eaux des forages de la zone d'étude ; Sidi-Okba, compagne.2014 (Rechachi et al.2016).

En outre, les mesures piézométriques réalisées au mois de Mai 2008 par la DHW et l'ANRH de Biskra, nous ont permis de dresser la carte piézométrique (Fig.41) pour bien visualiser l'écoulement des eaux souterraines de la plaine du Zab Est de Biskra. L'écoulement dans son ensemble se fait du Nord vers le Sud de la plaine, avec quelques particularités. Des courbes piézométriques très serrées dans la partie Nord-Ouest, ceci traduit un gradient hydraulique fort, dû à la topographie. Les courbes iso-pièzes sont espacées au centre de la plaine (Nord-est et Sud), avec un gradient hydraulique très faible indiquant un écoulement lent dû à la topographie plane de la région (pente faible ne dépasse pas les 3%). Les lignes de courant pour l'ensemble de la plaine sont dirigées vers la zone de dépression située au Sud-est de la région d'étude, il s'agit en fait de zone de chott de Melghir à altimétrie négative (atteignant par endroits -40 m) ; cette zone constitue le point de convergence et d'exutoire naturel de la majorité des grands oueds qui drainent la zone de Zab Est. (Messameh, 2009 et Boutouga, 2012).

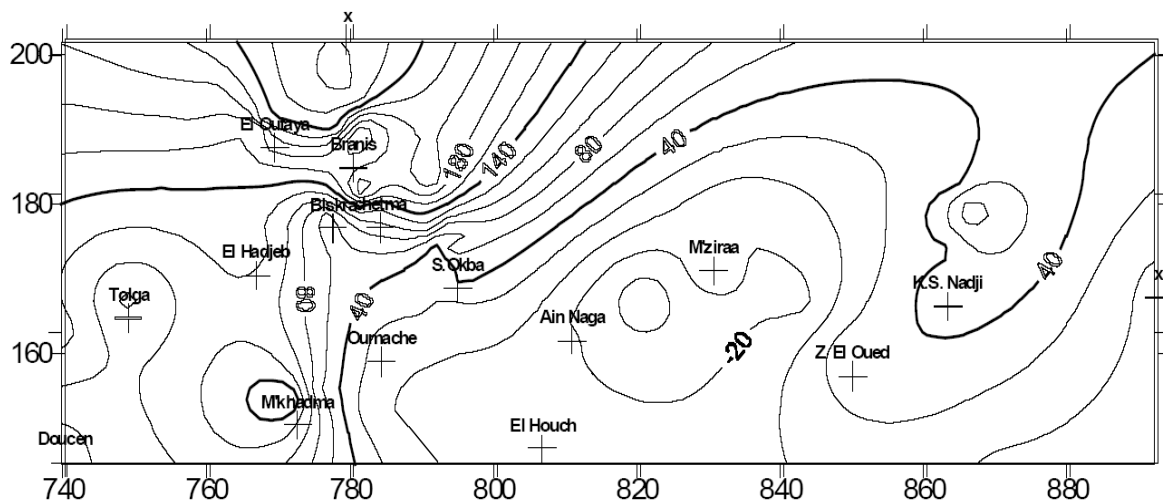


Fig41 : Carte piézométrique de la nappe du Miopliocène de Biskra (Messameh et al, 2009).

VI-1-2-2- Faciès chimiques des eaux d'irrigation

La position des points dans le diagramme de Piper montre que ces eaux appartiennent à deux principales familles d'eau : i) le faciès chloruré sodique et magnésien : 23 échantillons (forages F1, F2, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10, F12, F14, F15, F24, F25, F26, F27, F28, F29, F30 F31, F32, F36 et F37) pour la plupart situés en aval de la zone d'étude ; ii) le faciès sulfaté sodique et calcique : 7 échantillons (forages F16, F17, F18, F19, F20, F21, et 22), tous situés en amont de la zone d'étude.

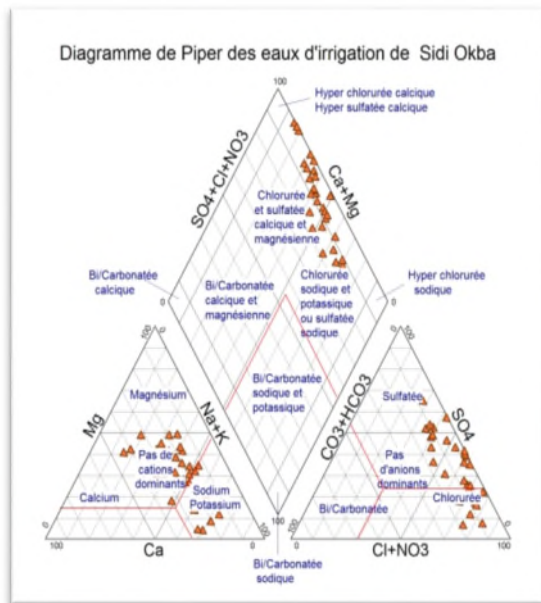


Fig42 : Diagramme de Piper des eaux d'irrigation.

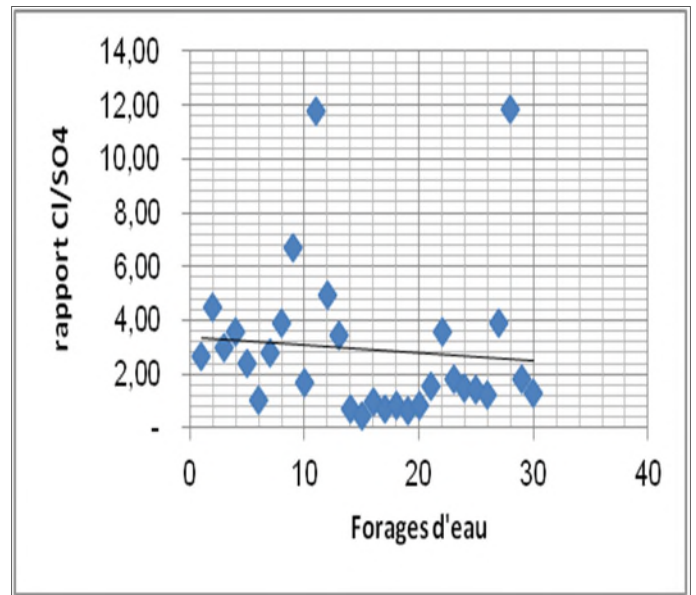


Fig43 : Représentation graphique du rapport Cl^-/SO_4^{2-}

Afin de classer les eaux et les solutions du sol, le rapport Cl^-/SO_4^{2-} est utilisé; d'une façon général, ce rapport est supérieur à 1 reflétant une salinisation chlorurée. Selon Servant et Servat (1966), ce rapport peut être détaillé comme suit :

- a. il est inférieur à 1 pour 7 échantillons d'eau (F16, F17, F18, F19, F20, F21 et 22) situés en amont de la zone d'étude, traduisant une salinisation sulfatée-chlorurée ;
- b. il est compris entre 1 et 5 pour 20 échantillons (F1, F2, F4, F5, F6, F7, F8, F9, F10, F12, F14, F15, F24, F25, F26, F27, F28, F29, F30 F31, F32, F36 et F37), traduisant un type de salinisation chlorurée-sulfatée ;
- c. il est supérieur à 5, pour 3 échantillons (F11, F13 et F35), traduisant une salinisation chlorurée.

Le premier groupe est situé en amont de la région de Sidi-Okba, les deux autres en aval. On a donc une évolution du faciès chimique des eaux dans le sens de l'écoulement, du faciès sulfaté vers le faciès chloruré.

VI-1-2-3- Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux

Le calcul des indices de saturation (Tableau 29) montre que les eaux étudiées sont saturées par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sont sous-saturées pour l'halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre. (Voir l'exemple pratique du chapitre précédent V de la modélisation géochimique).

Tableau 29 : Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013)) des eaux de forages de Sidi Okba.

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne
IS Halite	-5,29	-4,21	-4,82
IS gypse	-1,60	-0,14	-0,67
IS Dolomite	-1,48	1,92	0,57
IS Calcite	-0,80	0,85	0,22
IS Aragonite	-0,95	0,70	0,08
IS Anhydrite	-1,88	-0,46	-1,02

VI-1-2-4. Discussion, aptitude des eaux à l'irrigation

Dans la région de Sidi-Okba, l'irrigation est assurée par le pompage des eaux des forages de la nappe du Miopliocène. La qualité de l'eau d'irrigation est appréciée en utilisant le diagramme de classification des eaux de l'U.S.S.L (1954) modifié (Durand, 1983). Le report des échantillons sur ce diagramme de Riverside(fig.44) indique que la salinité, représentée par la conductivité électrique CE, est forte à très forte (C4 et C5) et la sodicité, illustrée par le SAR (Sodium Adsorption Ratio),selon Servant et Servat, (1966), et selon le degré d'alcalinisation appartient à la classe 1 où ce risque est nul (S1 : entre 0 et 4) pour 1/6 des échantillons (soit 16.66 %) et à la classe faible S2(entre 4 et 8) à moyenne S3(entre 8 et 12) pour la plupart des échantillons prélevés; ceci indique un apport très important de Na⁺ à la solution du sol traduisant un risque de sodicité pour ces eaux d'irrigation(fig.45). Tous les points d'eau ont une classification comprise entre C4S1 et C5S3 (Fig.44) traduisant une mauvaise qualité chimique de ces eaux. Par conséquent, les eaux principalement de la classe C5 ne peuvent être utilisées en irrigation que dans le cas des sols très drainants (sables et graviers) riches en calcium soluble (Dubost, 1994). Pour remédier à ce problème, en absence d'une autre ressource en eau, le remplacement du sodium par le calcium sous forme d'un amendement gypseux est conseillé avec drainage (Qadir et al, 2006). Une autre solution, complémentaire de l'amendement chimique, consiste en l'utilisation des plantes afin de diminuer la quantité du sodium par phytoremédiation ; du fait de l'augmentation de la

dissolution du carbonate de calcium du sol, ceci peut fournir du calcium, qui peut être échangé avec le sodium (Qadir et al, 2007 in Rimmer et al, 2013).

Tenant compte de la spécificité de la région de Sidi-Okba comme étant une oasis ; le palmier dattier est la culture pilote pratiquée avec un rendement moyen de 80 kg/pieds âgés de plus de 40 ans et de 120 à 140 kg/pieds âgés de moins de 40 ans selon notre estimation. La tolérance des plantes cultivées vis-à-vis de la salinité varie largement en fonction de l'espèce, de la variété, du stade végétatif et des facteurs liés au milieu (Daoud et Halitim, 1994). Néanmoins l'historique de la région et le choix stratégique du pays doivent nous orienter vers des cultures du type céréalières, maraichères et fourragères. En fonction de la salinité des eaux d'irrigation utilisées, les fellahs peuvent pratiquer quelques cultures tolérantes aux sels comme : orge, avoine, oignons, betteraves, navets, carthames, coriandre, laitue, tomate, abricotier, olivier et figuier (ANAT, 2003), afin de diversifier et d'améliorer leurs revenus. Aussi, le drainage des terres irriguées est-il très important pour contrôler et réduire la salinisation des sols car l'irrigation avec des eaux salées nécessite l'apport d'une fraction d'eau supplémentaire pour lessiver les sels (Vallès et al, 1983) afin de maintenir la composition saline de la solution de sol proche de celle de l'eau d'irrigation (Dubost, 2002). L'irrigation gravitaire utilise beaucoup d'eau, ce qui influence les propriétés du sol ainsi que le végétal avec un risque d'accumulation importante de sels dans la zone racinaire, alors qu'en irrigation localisée, le taux d'humidité dans la zone racinaire reste élevé, ce qui limite les risques d'accroissement de la concentration en sels et de la pression osmotique. (Soutter et al, 2007). Donc, la réduction du risque de salinisation et d'alcalinisation secondaire dans la région d'étude peut se faire en conjuguant des périodes d'irrigation localisée (goutte à goutte), avec des périodes d'irrigation gravitaire permettant le lessivage des sels ou encore le changement des sources d'irrigation ou en mélangeant l'eau utilisée avec une eau à faible teneur en sodium (Lenntech, 2008).

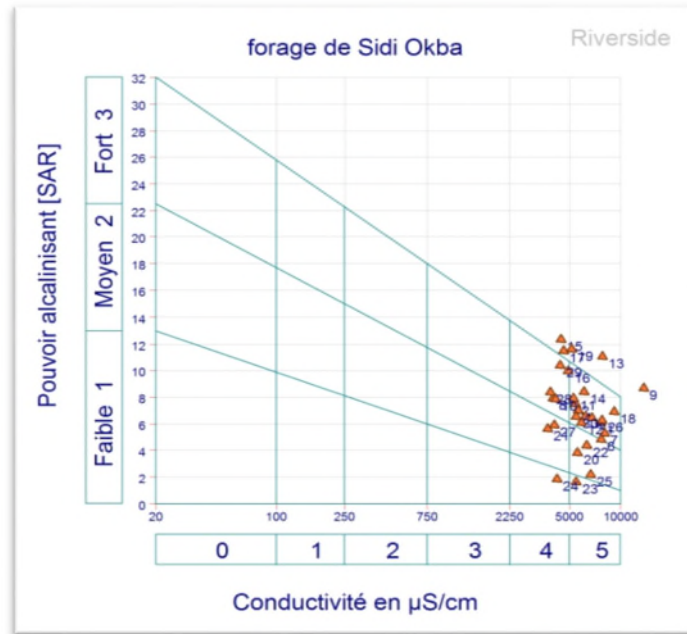


Fig. 44 : Diagramme de Riverside des eaux d’irrigation de Sidi Okba selon Manuel pour Diagrammes (Smiler, 2013).

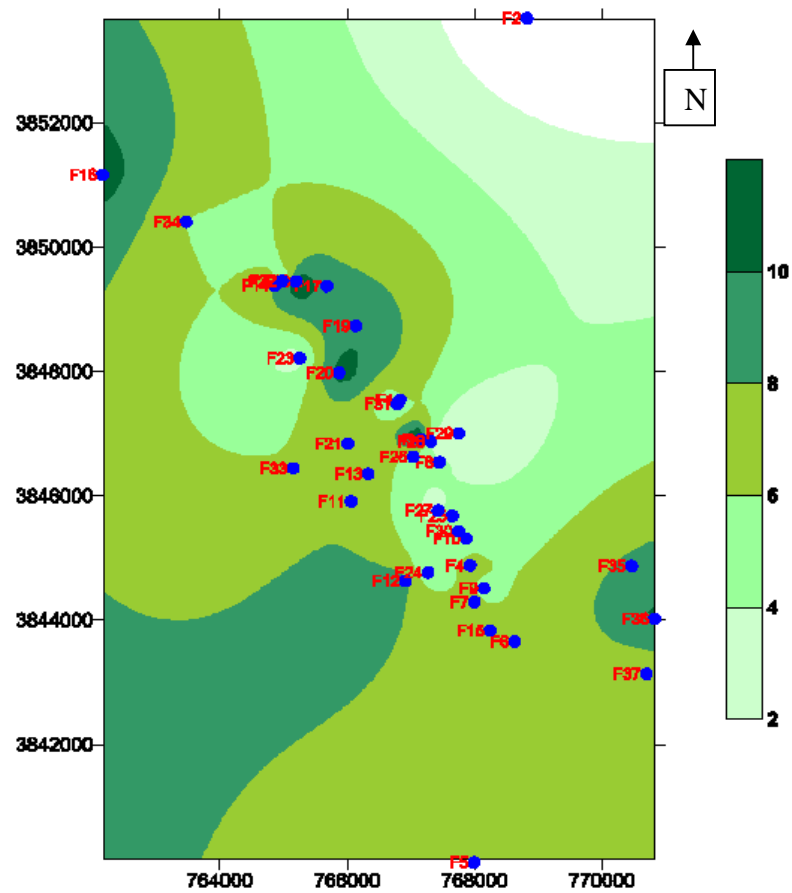


Fig. 45 : Carte du SAR des eaux d’irrigation de la région de sidi-okba, compagne.2014. (Rechachi et al.2016).

VI-1-2-5- Conclusion

Dans la région de Sidi-Okba, la nappe du Miopliocène est très sollicitée. La composition chimique de ses eaux destinées à l'irrigation des sols agricoles traduit une salinité très forte à excessive avec un SAR de faible à fort risque de sodicité (de S1 à S3).(photo.01). Deux grandes familles d'eaux se manifestent, l'une à faciès chloruré sodique et magnésien en aval et l'autre à faciès sulfaté sodique et calcique en amont de la zone d'étude. La sous-saturation en gypse, anhydrite et halite traduit la possibilité de dissolution de ces minéraux dans l'eau d'irrigation, tandis que les minéraux carbonatés se trouvent parfois proches de l'équilibre, souvent en sursaturation et tendent vers la précipitation sous forme de calcite et dolomite. Il en résulte que l'irrigation avec ces eaux reste utilisable mais avec des précautions à prendre telles que : la maîtrise des techniques liés à l'irrigation surtout le lessivage et le drainage, des techniques liées à la culture : le choix de cultures tolérantes aux sels, la phytoremédiation, l'assolement, la rotation, l'amélioration des sols par l'apport de la matière organique.



Photo01 : Bassin traditionnel d'accumulation des eaux de forages utilisées à l'irrigation des terres agricoles dans la région de sidi Okba. (Auteur, 2014).

VI-2-Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation de la région BBA ; Zab Gharbi

État de l'art :

Selon l'étude effectuée par l'équipe eau de la division eau du CRSTRA en 2012 intitulée « impact de la néo agriculture sur la qualité des eaux et des sols dans la région d'El Ghrous – Biskra », cette région ouest de Ziban se caractérise par un faciès des eaux qui varie d'un niveau d'un aquifère à un autre. Il est sulfaté calcique pour la nappe du Miopliocène. Les deux faciès dominants sont le faciès sulfaté calcique, et le faciès sulfaté sodique pour les eaux de la nappe de l'Eocène inférieur. La valeur de la conductivité électrique des eaux souterraines la plus élevée est enregistrée au niveau de la nappe du MioPliocène (5620 μ S/cm), et les valeurs les plus faibles (1711 μ S/cm) sont relatives à l'Eocène Inférieur. Toutefois, les deux nappes, restent dans la catégorie de salinité très élevée (C4S1 à C4S2).

La représentation des analyses des eaux sur le diagramme de piper montre qu'il existe :

- zone Nord : groupe Tolga : faciès sulfaté-sodique et calcique ;
- zone Sud : groupe Ouled Djellal : faciès chloruré et sulfaté calcique.

Le faciès chimique d'après le diagramme de Piper est sulfaté sodique et chloruré à sulfaté calcique et magnésien. 70 % des échantillons présentent un faciès sulfaté calcique et 30 % un faciès sulfaté sodique. (Chabour, 2006).

La région jadis à vocation principalement dattière a vu ces dernières années un développement rapide de l'agriculture maraîchère exigeant de ce fait de grandes quantités d'eau. Ceci s'est traduit par la multiplication des points de captage, avec comme résultat : une diminution de la ressource et la dégradation de la qualité des eaux. (Chabour, 2006 ; Benziouche et Chehat, 2010).

Comme toute plante, le palmier dattier est en besoin de l'eau. Dans la région de Tolga, ce n'est pas le sol mais l'eau qui constitue le capital foncier des exploitants en raison de l'importance qu'occupe cet élément dans l'activité phoenicole. L'irrigation dans certaines oasis de la région d'étude est médiocre et en aggravation, notamment avec l'augmentation des superficies et la faible, voir la stagnation, de la mobilisation des ressources hydriques dans cette région. Selon une étude économique réalisée par (Benziouche et Chehat, 2010), montre que la quasi-totalité des phoeniculteurs enquêtés (90.58%) souffrent et dénoncent l'insuffisance des quantités d'eau distribuées qui sont nettement inférieures aux normes préconisées pour une palmeraie (soit plus de 70 litres/s/ha, et le tour du jour ne dépasse pas

les 7 jours), car la dose d'irrigation distribuée ne dépasse pas 38 l/s/ha et le tour du jour arrive dans certains cas à 12 jours.

Les principales causes de ce déficit hydrique sont: le système d'irrigation traditionnel qui nécessite une réhabilitation, l'inégalité d'exploitation des eaux existantes entre palmeraies, l'absence des techniques d'irrigation économisatrices pour minimiser les pertes, la mauvaise gestion de l'eau, la facture élevée de l'énergie, et le nombre élevé des associés autour d'un seul forage. Cette pénurie d'eau s'explique aussi par la sous utilisation des ressources disponibles et le déficit évident dans la mobilisation, la méconnaissance des capacités réelles des différents forages et leur état d'évolution. D'autres parts la pauvreté en ressources hydriques par rapport aux autres régions sahariennes a été aggravée par l'évolution rapide des superficies, ces dernières années. Les profonds bouleversements hydrologiques et anthropiques, l'utilisation irrationnelle de cette ressource rare, et la faiblesse des infrastructures hydriques ont mis les oasis de la région dans une grande pénurie d'eau. Et bien que, ce taux va sans doute, croître après le lancement de quelques forages réalisés dans le cadre du PNDA et la GCA depuis l'année 2000. Néanmoins, sa faiblesse témoigne de la souffrance des oasis de la région en matière d'irrigation.

Afin de caractériser l'hydrogéochimie des eaux du système aquifère de la région d'étude, selon notre enquête sur le terrain, nous avons consulté une double source d'alimentation en eaux sollicitées en irrigation de la région de Bordj ben Azouz (BBA), l'échantillonnage des eaux touche celles de la nappe phréatique par le biais des puits et celles de la nappe de calcaire d'éocène inférieur représentées par les forages. Toutes les analyses physico-chimiques sont effectuées au niveau du laboratoire central du CRSTRA. L'étude du chimisme des eaux a pour but d'identifier leurs faciès chimiques, leur qualité ainsi que leur aptitude à l'irrigation.

Les calculs géochimiques ont été réalisés avec le modèle Phreeqc (version interactive 3.1.4-8929, Parkhurst et Appelo, 2013). Le test de corrélation de type Pearson est fait à l'aide de XLSTAT. Le diagramme de Piper a été construit au moyen du logiciel Diagrammes (Simler, 2013).

VI-2-1- Evaluation de la qualité des eaux de la nappe phréatique captée par des puits :

Les puits artésiennes sont des fosses de 4 à 6 m de profondeur où les eaux sont pompées par une pompe à moteur diesel ; viennent de la nappe phréatique d'inféro-flux (conduit à oued Djedi). Actuellement, chez les agriculteurs plutôt les phoeniculteurs de la région de Bordj

Ben Azouz (BBA), la nappe phréatique est captée par des puits traditionnels dont la profondeur varie de 4 à plus de 8 mètres. Le nombre des puits sollicités à l'irrigation dans la région de BBA dépasse 1000 puits due probablement à fort morcellement des parcelles, selon notre enquête en 2014/2015, il n'y a pas une exploitation (djnane) sans puits (langage des fellahs s'appelle Fhal, c'est lui qui nourrit la palmeraie). Le puits proche du drain est moins salé que le plus loin, selon les fellahs, la salinité peut dépasser 4 g/l, car le drainage est un lieu d'évacuation ou plutôt c'est un exutoire naturel des sels. L'irrigation se fait par submersion à raison d'une fois par semaine en été à une fois par mois en hivers selon le calendrier des fellahs.

Origine de ces puits :

Les formations quaternaires couvrent une grande partie de la plaine de cette région et contiennent la nappe phréatique de Biskra qui est très présentée au niveau des palmeraies de Tolga et au niveau des oueds (nappe d'inféro-flux), et par convention, on désigne sous le nom de nappe phréatique les aquifères superficiels dont la profondeur n'excède pas 50 mètres et dont les eaux sont généralement exploitées par des puits (de phréos : puits); son réservoir est constitué de cailloutis, de dunes de sables et d'alluvions sableuses et caillouteuses des lits actuels des oueds, ce qui indique une hétérogénéité du réservoir. A l'ouest de Oued Djedi, l'aquifère est constitué par des alluvions sableuses et argileuses alors qu'à l'Est les poudings sont relayés progressivement par un dépôt sableux ou argileux. Le substratum est formé par une épaisse couche argileuse avec intercalation de quelques niveaux de sables, de graviers et des marnes, apparaissant sous forme de lentilles de sable en discordance avec les couches d'argiles étant souvent gypseuses. (Dubost, 2002 ; Sedrati, 2011). Ces nappes sont partout présentes au Sahara dans les dépressions ou les vallées ; elles sont alimentées par les pluies, les crues, les écoulements diffus, les eaux de drainage et aussi très souvent par les remontées naturelles en provenance des aquifères plus profonds ou encore par les fuites dans les ouvrages exploitants ces derniers. Mais les nappes phréatiques n'ont pas toujours donné naissance à des palmeraies en creux, bien souvent, ce sont des puits de quelques dizaines de mètres de profondeur qui permettent d'irriguer jardins légumiers et palmeraies ; environ 500 puits dans le Zab Gharbi qui traversent le debdeb et alimentent par des motopompes les palmeraies méridionales. (Dubost, 2002).

Historiquement et selon un rapport publié en 1908, on en rencontre, en effet, de naturelles par effondrement et érosion de la carapace de debdeb, à l'AïnMothi (Bouchagroun), à l'Aïn-Shargelotan (Bouchagroun) ; à l'Aïn-Thour, du même groupe et à l'Aïn-Amara, de Tolga, elles sont dues aux travaux des indigènes, qui ont appliqué le procédé de recherches de

l'origine des sources (Ras-el-Aïoun) par puits successifs espacés en profitant toutefois de l'indication fournie par des effondrements de la carapace gypseuse. On peut observer que les vraies sources (donnent souvent naissance à de petits cours d'eau qui disparaissent « cours ou sources perdus » sur certains espaces de leurs parcours (sous le debdeb), puis se montrent à nouveau soit par les « regards » soit en émergeant sous-sol or chacune de ces réapparitions peut être confondue avec une émergence de source nouvelle. Souvent aussi les eaux provenant primitivement de vraies sources ou de réapparitions temporaires peuvent s'infiltrer par imbibition particulière ou par les fissures des roches, et constituer un réseau complexe de petits canaux souterrains et de nappes d'imprégnation (sables gypseux), pouvant encore donner à l'aval, naissance à des fausses sources. On voit qu'ainsi cette « pseudo-nappe » supérieure ou nappe des « K'ottaras » (puits) qui ordinairement se tient entre 0.8 m et 3 mètres ne peut être confondue avec une véritable nappe phréatique. C'est plutôt un réseau très irrégulier d'allure qui comprend à la fois des filets liquides, des plages d'imbibition et voire des nappes. Ces puits artésiens venus de l'infra-substratum calcaire, Il y a là trace se manifeste de l'existence d'une ligne sensiblement Est-Ouest, d'émergences souterraines venant du crétacé ou du calcaires, en contact peu éloigné (suivant la normale) avec le tertiaire continental ou avec le quaternaire ; c'est réduite d'importance une nouvelle ligne d'afflux liquide comparable à celle qui se manifeste si remarquablement dans tout le Zab-Dahri ; elle correspond sans doute à une faille. On paraît donc être ici dans une région favorable à des tentatives de forages artésiens. (Anonyme, 1908).

Actuellement, cette nappe qui se localise généralement dans les accumulations alluvionnaires, elle est alimentée essentiellement par les eaux d'infiltration des Oueds (inféroflux). Les plus importantes dans la wilaya, sont celles de l'Oued Biskra et de l'Oued Djedi. Cette nappe qui présente l'unique ressource des régions d'Ouled Djellal, Sidi Khaled et la ville de Biskra, est trop sollicitée vue sa faible profondeur et sa bonne qualité chimique, pour cette raison qu'elle est utilisée pour l'alimentation en eau potable. La profondeur de cette nappe est comprise entre 20 et 150 m avec un débit oscillant entre 05 et 20 l/s et une qualité chimique qui se situe de bonne à mauvaise selon les zones. (ANRH, 2008).

VI-2-1-1-Faciès chimique des eaux de la nappe phréatique utilisées en irrigation

Le bilan ionique est déterminé pour établir le faciès de salinisation de l'eau en se basant sur le diagramme de Piper. Il permet également d'évaluer les risques de toxicité causés par certains sels. Il s'agit des cations Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} et des anions HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^- . Ces concentrations en ions sont exprimées en milliequivalent par litre.

Pour le bilan cationique, l'eau d'irrigation est marquée par la dominance du magnésium et le calcium par rapport aux autres cations ($Mg^{++} > Ca^{++} > Na^{+} > K^{+}$). Par contre, le bilan anionique est marqué par la dominance des sulfates pour tous les puits analysés puis viennent les chlorures qui se dominent pour un seul puits (P2), après les bicarbonates en troisième lieu où on observe des faibles teneurs de HCO_3^{-} par rapport aux autres anions ($SO_4^{-} > Cl^{-} > HCO_3^{-}$). Le report des points sur le diagramme de Piper (Fig.46), montre que les eaux des puits appartiennent à une seule principale famille d'eau : faciès sulfaté calcique et magnésien pour tous les échantillons, sauf un à faciès à tendance chloruré sodique (P2, avec une CE élevée, voir Fig.49). Afin de classer les eaux et les solutions du sol, le rapport Cl^{-}/SO_4^{2-} (Fig.47) est utilisé; d'une façon générale, ce rapport est inférieur à 1 reflétant une salinisation sulfatée. Selon Servant et Servat (1966), ce rapport peut être détaillé comme suit :

a. il est inférieur à 1 pour 10 échantillons d'eau (soit 91 % des puits consultés représentés par : P1,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10,P11) situés en aval, près du réseau du drainage, de la zone d'étude, traduisant une salinisation sulfatée-chlorurée ;

b. il est supérieur à 1 pour un seul échantillon (P2), traduisant un type de salinisation chlorurée-sulfatée ;

Le premier groupe est situé en aval de la région de BBA, l'autre groupe en amont. On a donc une évolution du faciès chimique des eaux dans le sens de l'écoulement (de Magtoufa en amont vers la dépression chottouse Ezarga), du faciès chloruré vers le faciès sulfaté le plus dominant.



Fig. 46 : Diagramme de Piper des eaux des puits de la nappe phréatique de BBA utilisées en irrigation des palmeraies. (Simler, 2013).

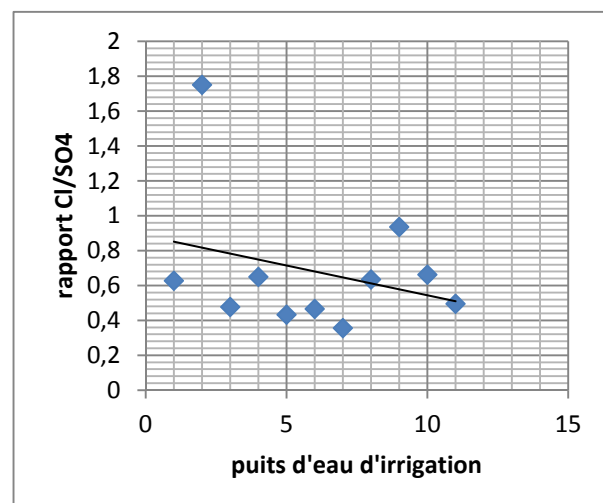


Fig. 47 : Représentation graphique du rapport Cl^{-}/SO_4^{-} des eaux des puits utilisés en irrigation à BBA

V-2-1-2-Etude de la qualité des eaux des puits (La salinité et sodicité)

La classification de Riverside est basée sur l'étude de la salinité représentée par la conductivité électrique (CE mS/cm à 25 °C), et la sodicité traduisant le danger d'alcalinisation des sols exprimé par le SAR, pour cela le diagramme de classification des eaux d'irrigation (diagramme de l'U.S.S.L (1954) modifié par Durand (1958)) est élaboré essentiellement sur la base des observations réalisées en Afrique du Nord, cette classification suppose des conditions correctes de cultures, un bon drainage et des sols suffisamment perméables.

Donc, la conductivité électrique reflète la salinité globale de l'eau associée au SAR permet de situer l'eau de la nappe phréatique étudiée dans les différentes classes de qualité selon le diagramme de Riverside. Les données statistiques des analyses physico-chimiques des eaux des puits exploitées dans la présente étude sont présentées dans le tableau 30 et leur matrice de corrélation dans le tableau 31.

Tableau 30: Les paramètres statistiques mesurés des eaux de la nappe phréatique (puits) :

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
CE dS/m	4.21	10.8	7.22	2.09
pH	7.02	7.83	7.32	0.29
Ca ⁺⁺ (meq/l)	26.85	38.88	30.91	3.54
Mg ⁺⁺ (meq/l)	15.79	69.25	32.96	14.55
Na ⁺ (meq/l)	6.48	57.60	26.40	16.82
K ⁺ (meq/l)	0.14	1.17	0.50	0.30
Cl ⁻ (meq/l)	13	50	29.21	12.26
SO ₄ ⁻ (meq/l)	28.57	92.93	46.47	18.67
HCO ₃ ⁻ (meq/l)	0.88	8.14	5.72	3.07
NO ₃ ⁻ (meq/l)	0	0.75	0.19	0.22
Cl/SO ₄ ⁻	0.36	1.75	0.68	0.39
SAR	1.14	10.08	4.65	2.85

Tableau31 : Matrice de corrélation des paramètres mesurés

	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	pH	SAR
	ms/cm										
CE	1,000	-0,036	0,609	0,852	0,643	0,810	0,489	0,026	-0,357	-0,027	0,786
ms/cm											
Ca		1,000	-0,587	0,225	-0,191	-0,219	-0,273	0,175	-0,003	-0,464	0,295
Mg			1,000	0,221	0,577	0,598	0,811	-0,461	-0,299	0,419	0,084
Na				1,000	0,583	0,715	0,310	0,295	-0,242	-0,165	0,990
K					1,000	0,612	0,556	0,030	-0,205	0,180	0,506
Cl						1,000	0,448	-0,264	-0,227	-0,030	0,645
SO4							1,000	-0,297	-0,225	0,491	0,193
HCO3								1,000	0,367	0,041	0,379
NO3									1,000	0,479	-0,196
pH										1,000	-0,224
SAR											1,000

Les valeurs en gras montrent un niveau de signification de 0.05 (5%).

Les résultats d'analyses des paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique d'inféro-flux de quaternaire montrent des valeurs élevées de la conductivité électrique (4.21– 10.8 mS/cm). Elle a une corrélation significative liée, principalement, à la forte présence de Sodium Na^+ , chlorures Cl^- , magnésium Mg^{++} , potassium K^+ et peu de sulfate SO_4^- . Quoique que les eaux soient fortement salées, la faible liaison entre les éléments évaporitiques est principalement due à la nature des matériaux provoquant la salinisation de ces eaux. Malgré l'origine des eaux (puits), mais ils ne sont pas fortement sodique sauf pour P1 et P2 située en amont de la palmeraie (zone Foughala, voir Fig. 49), loin du réseau du drainage. Mais ils sont en générale de mauvaise qualité. La présence de quantités élevées de gypse dans le sol permet l'utilisation d'eaux d'irrigations salées et/ou à fortes teneurs en sodium (Mamou, 1995).

Le pH de l'eau est un paramètre indicateur du niveau d'acidité ou d'alcalinité de l'eau. Sa détermination au préalable permet de prévenir des risques d'alcalinité et de précipitation des éléments chimiques surtout pour le colmatage (carbonate). Le pH influence la forme et la disponibilité des éléments nutritifs dans l'eau d'irrigation. Le pH est neutre à légèrement basique vu la présence des quantités faibles des bicarbonates ; l'absence d'une relation

significative entre ces deux paramètres pH-HCO_3^- la confirme. Il varie 7.02 à 7.83 avec une moyenne de 7.32 ; selon Aubert(1983), ce pH est admis pour l'irrigation des cultures.

Le SAR a une relation significative avec la CE, le sodium et le chlorure. Il varie 1.14 à 10.08 avec une moyenne de 4.62 ; de ces valeurs, on peut ressortir 3 classes du SAR, selon le diagramme de Riverside : S1 pour 5 puits ($0 < S1 < 4$) qui sont près du raseau du drainage, S2 pour 4 puits ($4 < S2 < 8$) et S3 pour 2 puits ($8 < S3 < 12$).

Donc, La qualité de l'eau d'irrigation est appréciée en utilisant le diagramme de classification des eaux de l'U.S.S.L (1954) modifié (Durand, 1958). Le report des échantillons sur ce diagramme de Riverside(Fig.48) indique que la salinité, représentée par la conductivité électrique CE, est forte à très forte (C4 et C5) et la sodicité, illustrée par le SAR (Sodium Adsorption Ratio),selon Servant et Servat, (1966), et selon le degré d'alcalinisation appartient à la classe S1 où ce risque est nul ($0 < S1 < 4$) pour un seul échantillon (P10) et à la classe faible S2($4 < S2 < 8$)à moyenne S3($8 < S3 < 12$)pour la plupart des échantillons (P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P11) ; à S4 pour les deux puits P1 et P2, ces valeurs élevées de la salinité sont observées en relation avec une position élevée et loin de la ligne ferme de Paul Ozval-Chmora , là où le réseau du drainage est présent.

De ce fait, en se basant sur le diagramme de détermination de la qualité de l'eau d'irrigation (Riverside) relative à CE et le SAR , les résultats de classement des puits révèlent l'existence les classes suivantes : **C4S1, C5S1, C5S2, C5S3 et C5S4**, selon Durand(1958), ils interprètent des qualités médiocres à mauvaises, exigent l' excludre les plantes sensibles et les sols lourds. Utilisable avec beaucoup de précautions dans les sols légers et bien drainés avec dose de lessivage et/ou apport de gypse, à déconseillé pour l'irrigation(C5S4). D'une manière générale, et selon la carte de salinité représentée par la conductivité électrique, ces eaux sont salées et de mauvaise qualité (Fig.49).

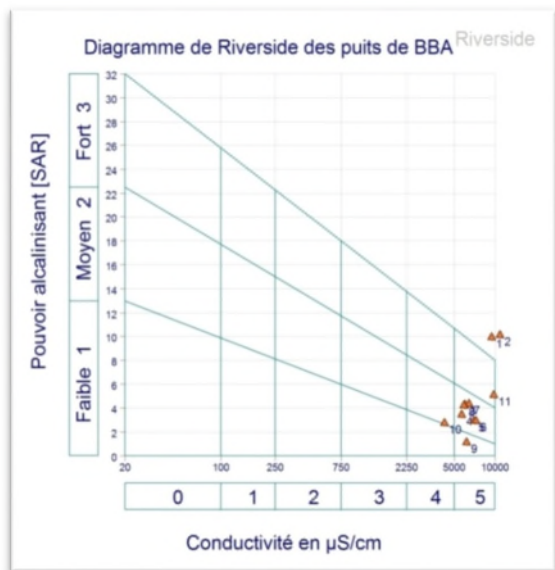


Fig.48 : Diagramme de Riverside exprime la salinité et sodicité des eaux des puits de la nappe phréatique de BBA utilisées en irrigation des palmeraies. (Simler, 2013).

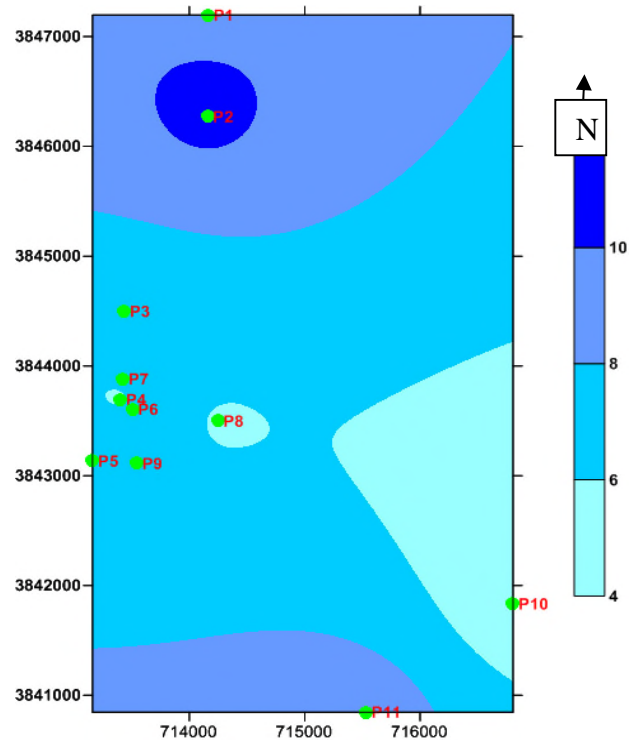


Fig.49 : Carte de la conductivité électrique (CE) en dS/m des eaux des puits de la nappe phréatique de BBA utilisées en irrigation des palmeraies.

VI-2-1-3- Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux des puits utilisés en irrigation de la région de BBA.

Le calcul des indices de saturation (Tableau 32) montre que les eaux étudiées sont saturées par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sont sous-saturées pour l'halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 32 : Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013)) des eaux de puits de BBA.

eau	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonit	IS calcite	IS dolomite
P1	-4.45	0.04	-0.3	0.28	0.43	0.9
P2	-4.35	-0.26	-0.61	0.33	0.47	1.06
P3	-5.20	-0.09	-0.43	0.33	0.48	0.88
P4	-5.10	-0.08	-0.42	0	0	0
P5	-5.26	-0.09	-0.44	0.21	0.35	0.92

P6	-5.22	-0.13	-0.47	0.17	0.32	0.9
P7	-5.32	0.01	-0.36	0.36	0.51	0.63
P8	-4.98	-0.09	-0.46	0.28	0.43	0.90
P9	-5.48	-0.13	-0.49	-0.44	-0.3	-0.41
P10	-5.33	-0.15	-0.52	0.22	0.37	0.55
P11	-4.62	0.02	-0.34	-0.74	-0.59	-0.75

Tableau 33 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans les eaux des puits sollicités en irrigation.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-5.48	-4.34	-5.03	0.38
IS gypsum	-0.26	0.04	-0.09	0.09
IS anhydrite	-0.61	-0.3	-0.44	0.09
IS aragonite	-0.44	1.12	0.13	0.31
IS calcite	0	0.51	0.25	0.33
IS dolomite	-0.75	1.06	0.54	0.56

La simulation à l'évaporation naturelle des eaux de la nappe phréatique du Quaternaire a été réalisée grâce à un modèle thermodynamique du logiciel Phreeqc Interactive 3.1.4-8929. Le calcul des indices de saturation (Tableau 32) montre que les eaux étudiées sont saturées par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite avec présence de quelques points (puits P9 et P11) de ces minéraux sous saturés. L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est varié entre -0.44 et +1.12. Pour les minéraux évaporitiques, il se trouvent sous saturation et on constate que le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est proche de saturation (état d'équilibre) même le dépasse pour quelques puits (P1, P7 et P11) conduit à leur tour de se précipiter, l'anhydrite (CaSO_4) aussi est sous saturé, alors que l'halite (NaCl) se présente largement sous saturé ($-5.48 < \text{IS} < -4.34$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les eaux contribuant à une augmentation de la minéralisation (le sodium est nettement lié avec la conductivité électrique selon la matrice de corrélation du tableau 31).

Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des eaux analysées et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se

trouvent dans l'eau à l'état d'équilibre (saturés) à sursaturation et précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

VI-2-1-4- Conclusion :

L'étude de la qualité des eaux de puits (photos 2,3) représente l'étude de la qualité des eaux de la nappe phréatique, qui ont un faciès dominant sulfaté calcique et magnésique selon leur nature géologique, ainsi d'une salinité excessive de classe C4 à C5 et très alcalines (SAR élevé). De ce fait, son utilisation nécessite de très grandes précautions et des aménagements spéciaux. L'utilisation de cette eau reste tout de même possible puisque les sols de la région sont légers (sableux-limoneux) et donc perméables à condition d'assurer un lavage fréquent des sels. La texture sableuse de ces sols a l'avantage de limiter les risques d'accumulation des sels en surface. Sachant que, et à la faveur de l'activité humaine surtout durant la période colonial, la provenance de l'eau des puits vient en amont de la ferme Paul Ozval (Aïn Suzi, la fille de cet colon-exploitant) là où est développée une nappe phréatique libre dont la profondeur varie entre 4 et 10m (selon la profondeur des puits exploités par les fellahs de cette région), en plus il y a un développement d'un réseau du drainage apparait efficace.

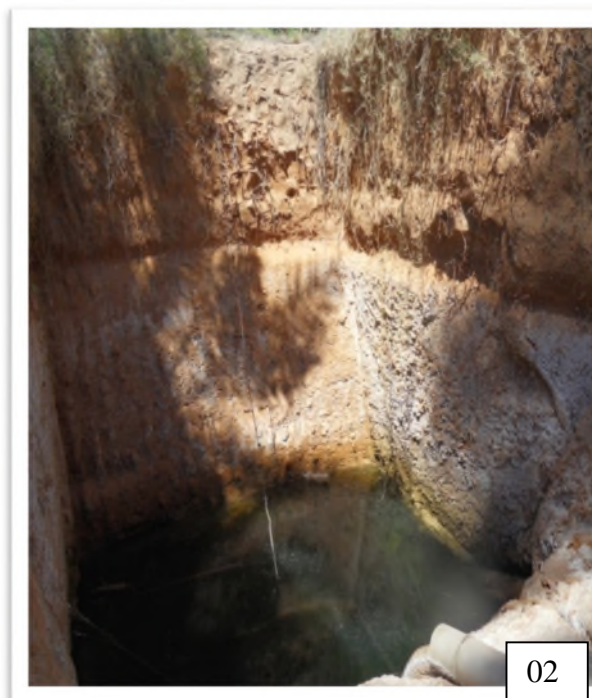


Photo 02 : Puits à ciel ouvert situé à BBA dont l'agriculteur fait l'irrigation.

Photo 03: L'irrigation des palmiers à travers un puits (chagga, tranché ouvert).

VI-2-2- Evaluation de la qualité des eaux des forages

La qualité ainsi que le faciès chimique de ces eaux sont influencées par la nature géologique de ce réservoir d'eau ; la nappe de calcaire. Or, la nappe la plus sollicitée dans la région de Tolga et par conséquent la région de Bordj ben Azouz est la nappe de calcaire d'éocène inférieur dite la nappe de Tolga. Cette nappe est constituée essentiellement de calcaires fissurés d'âge Eocène inférieur, elle est la plus sollicitée dans les palmeraies des Ziban. La profondeur de cette nappe varie de 100 m dans la zone de Tolga à 500 m dans la zone de Lioua, le débit de cette nappe varie de 10 l/s par pompage jusqu'à 30 l/s jaillissant dans les zones d'Ourlel et Lioua.

Les différents sondages réalisés dans cette région montrent qu'il existe un contact hydraulique entre la nappe de l'Eocène inférieur et celle du Sénonien Supérieur sous-jacente, et par fois elle se sépare par une mince couche de marne et de marno-calcaire dans la zone d'Oumache et M'lili où la profondeur atteint 900 m. Au Nord et au Nord Est de la wilaya cette nappe est représentée par un aquifère très important qui est le Maestrichtien et le Campanien d'une profondeur comprise entre 200 et 900m et d'une bonne qualité chimique d'eau. On note par ailleurs l'existence de la nappe du Turonien qui n'est pas exploitée. (ANRH, 2008). Cette nappe est exploitée par plus de 2000 forages à usage agricole.

Tellement les fellahs de la zone d'étude font recours aux eaux des puits, le nombre des forages exploités par ces agriculteurs est moins important car les forages sont plus coûteux selon la profondeur de la nappe.

VI-2-2- 1- La qualité exprimée par La salinité et la sodicité de ces eaux : Hydrogéochimie

Tous les eaux de forages sont regroupées dans une seule classe C4 ; eaux très fortement salées, ne convenant pas normalement pour l'irrigation dans certaines conditions, elles peuvent être utilisées en mettant en œuvre des pratiques spéciales, comme celle du drainage avec un risque de sodicité presque nul, selon la classification du Servant et Servat(1966) traduisant des eaux utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols avec peu de danger d'alcalinisation, bien que, certaines cultures sensibles au sodium puissent être gênées, sauf pour l'eau du forage F4 a un risque de sodicité moyen S2 ; exprime une alcalinisation des sols appréciable dans les sols à texture fine et surtout dans des conditions de faible lessivage, à moins que le gypse ne soit présent dans le sol. Cette eau est utilisable pour des sols à texture grossière. Ces conditions sont toutes présentes et réunies dans le sol de notre région d'étude. Malgré l'origine des eaux (nappe de calcaire), mais ils sont fortement utilisables dans la

palmeraie (zone Bordj ben Azouz), grâce à une culture très rustique et très tolérante aux conditions extrêmes du milieu : le palmier dattier variété Deglet Nour avec un rendement de qualité qui peut atteindre 200 à 300 kg /pied (moyenne de 100 kg/pied selon Messak, 2016). Notamment, on peut les utiliser dans le lessivage des sels en combiné et après un certain nombre fréquent d'irrigation par les eaux de puits, sachant qu'on peut trouver dans une même exploitation ces deux sources (puits et forage).

Selon la classification de Wilcox, les eaux sont réparties entre qualité médiocre pour les forages (F1, F2, F3, F5, F6) à mauvaise pour les deux forages (F4 et F7).

Donc, toutes les eaux des forages appartiennent à la classe C4S1 et C4S2 avec une qualité médiocre à mauvaise ; selon la classification de Riverside elles sont très salées avec absence à peu un risque de sodicité. Le SAR est de moyenne de 3.58. L'analyse statistique de tous les paramètres mesurés est indiquée dans le tableau suivant :

Tableau 34: Les paramètres statistiques mesurés des eaux des forages.

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
CE dS/m	2.71	8.02	3.99	1.97
pH	7.10	7.97	7.38	0.31
Ca⁺⁺ (meq/l)	13.63	30.86	21.14	6.61
Mg⁺⁺(meq/l)	6.07	24.45	13.45	7.66
Na⁺(meq/l)	8.15	36	15.21	10.17
K⁺(meq/l)	0.01	0.59	0.31	0.18
Cl⁻(meq/l)	10	41	21.61	12.11
SO₄⁻(meq/l)	10.18	40.63	24.94	10.23
HCO₃⁻(meq/l)	3.36	7.6	5.06	1.55
NO₃⁻(meq/l)	0	1.1	0.47	0.54
Cl/SO₄⁻	0.52	1.17	0.86	0.26
SAR	1.70	7.18	3.58	1.78

Tableau 35 : Matrice de Corrélation (Pearson) des différents paramètres mesurés.

	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3	pH	SAR
ms/cm											
CE	1,000	0,871	0,630	0,968	0,279	0,877	0,814	0,464	-0,258	-0,480	0,895
ms/cm											
Ca		1,000	0,700	0,810	0,312	0,850	0,936	0,536	0,170	-0,317	0,666
Mg			1,000	0,450	0,560	0,456	0,535	0,937	-0,276	-0,463	0,260
Na				1,000	0,079	0,928	0,793	0,267	-0,188	-0,416	0,974
K					1,000	-0,133	0,105	0,667	-0,351	-0,008	-0,057
Cl						1,000	0,841	0,263	0,086	-0,438	0,882
SO4							1,000	0,278	0,268	-0,172	0,676
HCO3								1,000	-0,326	-0,503	0,085
NO3									1,000	0,375	-0,229
pH										1,000	-0,373
SAR											1,000

Les résultats d'analyses des paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe de calcaire d'éocène inférieur montrent des valeurs moins élevées à élevées de la conductivité électrique (2.71-8.02 mS/cm). Elle a une corrélation très significative liée, principalement, à la forte présence de Sodium Na^+ , de chlorures Cl^- , de calcium Ca^{++} , de magnésium Mg^{++} et de sulfates SO_4^- . Les eaux sont fortement liées entre les éléments évaporitiques (Na^+ , Cl^- , Ca^{++} et SO_4^-), et principalement due à la nature des matériaux provoquant la salinisation de ces eaux. La toxicité par les chlorures de ces eaux est présente, du fait que leur teneur en chlore dépasse largement 10 meq/l, représentant le seuil maximum admissible pour les plantes (Ayers et Westcot, 1988).

Le pH influence la forme et la disponibilité des éléments nutritifs dans l'eau d'irrigation. Le pH est neutre à basique vu la présence des quantités faibles des bicarbonates ; l'absence d'une relation significative entre ces deux paramètres pH- HCO_3^- la confirme. Il varie 7.10 à 7.97

avec une moyenne de 7.38 ; il est en général proche de celui des eaux des puits. Selon Aubert(1983), ce pH est admis pour l'irrigation des cultures.

Le SAR a une relation significative avec la CE, avec la forte présence du sodium, du calcium et du sulfate. Il varie 1.70 à 7.18 avec une moyenne de 3.58 ; ces valeurs donnent 2 classes de SAR, selon le diagramme de Riverside : S1 pour 5 forages ($0 < S1 < 4$), S2 pour 2 forages ($4 < S2 < 8$) ; traduisant une absence à faiblement présence du risque de sodisation.

La qualité de l'eau d'irrigation est appréciée en utilisant le diagramme de classification des eaux de l'U.S.S.L (1954) modifié (Durand, 1958). Le report des échantillons sur ce diagramme de Riverside (fig.50) indique que la salinité, représentée par la conductivité électrique CE, est forte (C4) et la sodicité, illustrée par le SAR (Sodium Adsorption Ratio), selon Servant et Servat, (1966), et selon le degré d'alcalinisation appartient à la classe 1 où ce risque est nul ($0 < S1 < 4$) pour un 5 échantillon et à la classe faible S2 ($4 < S2 < 8$) pour 2 échantillons.

De ce fait, en se basant sur le diagramme de détermination de la qualité de l'eau d'irrigation (Riverside) relative à CE et le SAR , les résultats de classement des forages révèlent l'existence des classes suivantes : **C4S1**, **C4S2**, expriment une qualité médiocre à mauvaise(Fig.51) ; exclure les plantes sensibles et les sols lourds. Utilisable avec beaucoup de précautions dans les sols légers et bien drainés avec dose de lessivage et/ou apport de gypse. Ces conditions sont assurées vu les caractéristiques des sols et la vocation phoeniculture de la région d'étude.

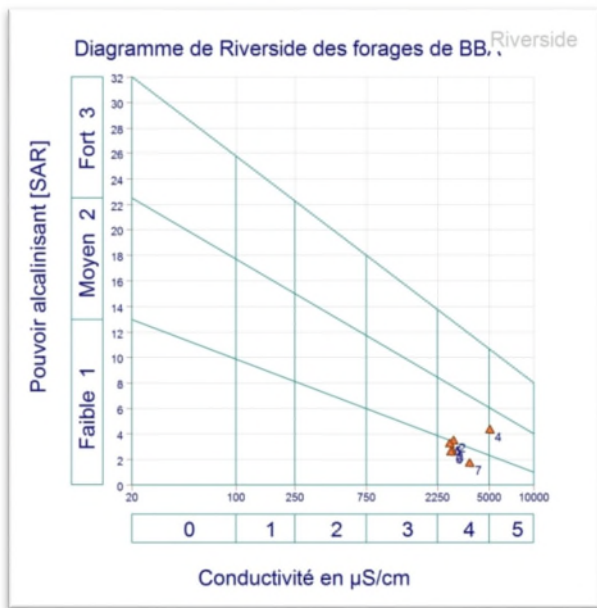


Fig. 50 : Diagramme de Riverside exprime la salinité et sodicité des eaux des forages de la nappe des calcaires de BBA utilisées en irrigation des palmeraies. (Simler, 2013).

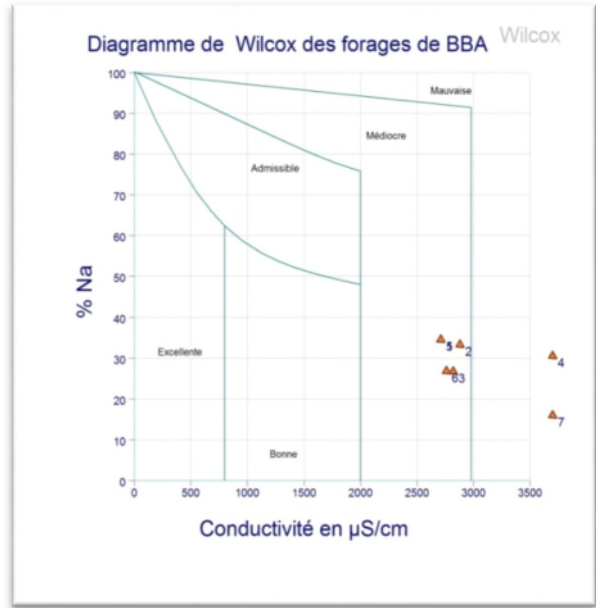


Fig. 51: Diagramme de Wilcox exprime la sollicité des eaux des forages de la nappe des calcaires de BBA utilisées en irrigation des palmeraies. (Simler, 2013).

VI-2-2- 2-Faciès chimique

Toutes les eaux de forages ont un faciès sulfaté-calcique et magnésique qui est le faciès dominant, son origine est la nature géologique de la nappe du calcaire d'écène inférieur. Donc, Les eaux sont généralement très chargées et ont un faciès sulfaté qui provient des importantes formations évaporitiques. Le faciès géochimique dominant est sulfaté calcique et sodique.

La prédominance des sulfates sur les chlorures ou l'inverse dépend essentiellement de l'état des minéraux qui génèrent ces éléments dans l'eau (équilibre, sursaturé, sousaturé). D'ailleurs, l'absence du faciès carbonaté est du en partie à sa présence dans l'eau en phase de précipitation (indice de saturation positif). Alors que les minéraux évaporitiques sont sousaturés.

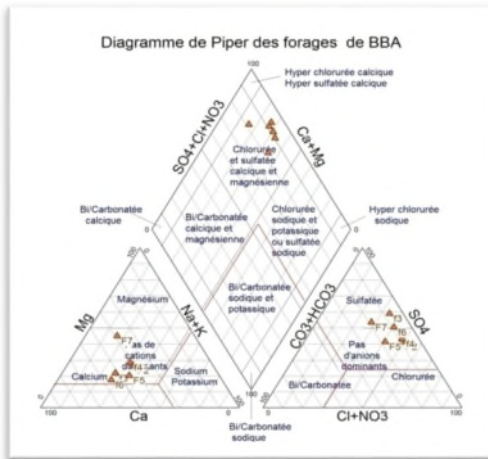


Fig53: Diagramme de Piper des eaux des forages de la nappe des calcaires de BBA utilisées en irrigation des palmeraies. (Simler, 2013).

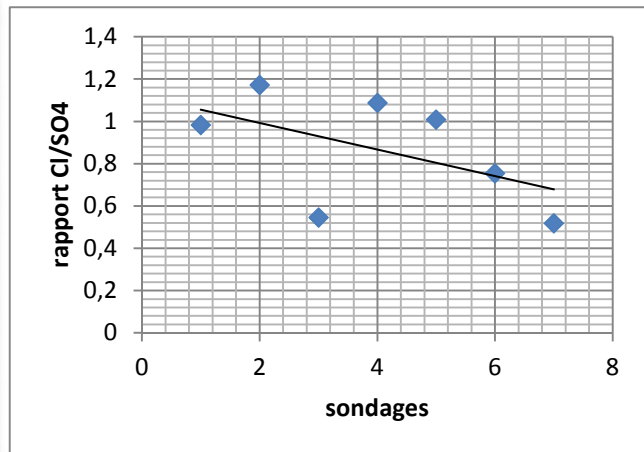


Fig52 : Représentation graphique du rapport Cl/SO4

VI-2-2- 3- Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux de la nappe de Tolga :

La simulation à l'évaporation naturelle des eaux de la nappe de calcaire a été effectuée à l'aide du logiciel thermodynamique «IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013, en termes d'équilibres sels/solution. Elle montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positif, varié entre 0.09 et +1.78.

Pour les minéraux évaporitiques, ils se trouvent tous en état de sous saturation (état de dissolution) pour l'anhydrite (CaSO_4), le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ainsi que l'halite (NaCl) se présente largement sous saturé ($-5.81 < \text{IS} < -4.64$) et il est plus dilué que celui des puits (nappe phréatique), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les eaux contribuant à une augmentation de la minéralisation (le sodium et le chlorure sont fortement liés à la CE et le SAR selon la matrice de corrélation du tableau 35).

Selon l'analyse statistiques de l'indice de saturation des minéraux présents dans l'eau d'irrigation provient des forages alimentés par la nappe de calcaire, toutes les eaux sont sous saturées par rapport les minéraux évaporitiques notamment gypse, anhydrite et la calcite, par contre elles sont sur saturés en minéraux carbonatés (aragonite, calcite et dolomite) qui se précipitent largement.

Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des eaux analysées et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se

trouvent dans l'eau à l'état de sursaturation et précipitent sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

Tableau 36 : Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013)) des forages de BBA.

eau	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
F1	-5.74	-0.71	-0.93	0.61	0.76	1.29
F2	-5.39	-0.56	-0.78	0.09	0.23	0.41
F3	-5.56	-0.25	-0.47	0.88	1.02	1.78
F4	-4.92	-0.19	-0.41	0.63	0.77	1.52
F5	-4.64	-0.11	-0.33	0.35	0.49	0.91
F6	-5.57	-0.33	-0.55	0.28	0.42	0.47
F7	-5.81	-0.42	-0.64	0.56	0.70	1.59

Tableau 37 : Analyse statistique de l'Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013)) des eaux de forages de BBA.

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-5.81	-4.64	-5.37	0.44
IS gypsum	-0.71	-0.11	-0.37	0.21
IS anhydrite	-0.93	-0.33	-0.59	0.21
IS aragonite	0.09	0.88	0.49	0.26
IS calcite	0.23	1.02	0.63	0.26
IS dolomite	0.41	1.78	1.14	0.55

VI-2- 3- Evaluation de la qualité des eaux du drainage

Les oasis irriguées avec des eaux de salinité élevée doivent être nécessairement drainées, afin que l'accumulation du sel ne provoque pas une salinisation ou une sodisation du sol. Ce réseau du drainage est un résultat issu du génie du fellah local (Laejal) où il a construit le drainage à l'intérieur de la palmeraie et le relié avec le Ghadar qui conduit jusqu'à Oued

Djedi, pour cela, une suggestion de multiplier cette expérience pour tous les fellahs de la région est plus que nécessaire selon les raisons et résultats de notre étude.

La qualité est exprimée par La salinité et la sodicité de ces eaux. La salinité des drains augmente selon le sens d'écoulement dès le drainage primaire à l'intérieur de la palmeraie jusqu'à la zone de dépression lac Ezarga. Tellement les eaux des drains sont trop chargées, reflétant des quantités importantes des eaux destinées au lessivage des sels, la qualité de ces drains ne sont pas tous illustrés sur le diagramme de Riverside.

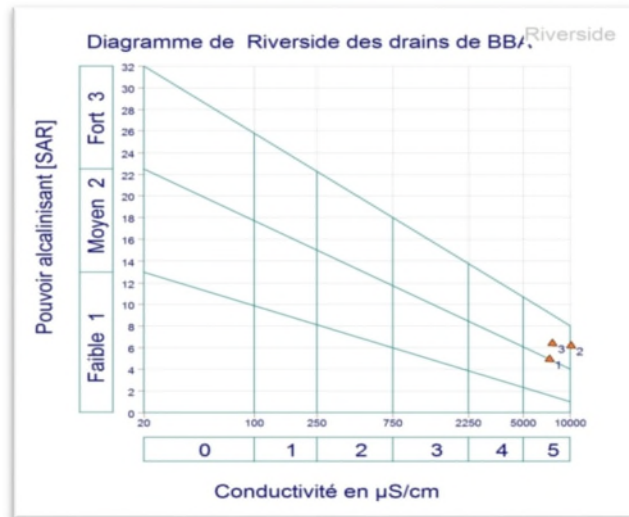


Fig.54 : Diagramme de Riverside des eaux des drainages des palmeraies de BBA. (Simler, 2013).

VI-2- 3- 1-Hydrogéochimie et faciès chimique :

Les eaux de drainages, circulant dans les drains primaires et secondaires de la palmeraie, ont une CE respectivement de 7.31 dS/m et 10.06 dS/m et un pH de 7,9 et 7.57. La profondeur du drain est maintenue à 4 m à ciel ouvert lié au collecteur (Ghadar). La CE des eaux de drainage circulant dans les drains principaux de la palmeraie varie de 7.69 à 39dS/m.

Les eaux du drainage sont trop chargées en sels traduisant une salinité excessive C5S2, C5S3, même dépasse le diagramme de Riverside (des points ne sont pas représentés sur ce diagramme sont celle du drain de Shaira et Ezarga, qui ont un taux de sel dépassant les 25g/l de sel. L'irrigation avec les eaux de la nappe phréatique (puits) ou bien nappe des calcaires (forages) a fourni des eaux de drainage dépassant CE =39 dS/m (25 g/l de sel).

Pour le bilan cationique, l'eau de drainage est marquée par la dominance du magnésium et le sodium par rapport aux autres cations ($Mg^{++} > Na^{+} > Ca^{++} > K^{+}$). Pour le bilan anionique, il est marqué par la dominance des sulfates pour tous les drains analysés ($SO_4^{--} > Cl^{-} > HCO_3^{-}$).

Afin de classer les eaux et les solutions du sol, le rapport Cl^-/SO_4^{2-} (Fig.55 ; 56) est utilisé; d'une façon général, ce rapport est inférieur à 1 reflétant une salinisation sulfatée. Selon Servant et Servat (1966), ce rapport peut être détaillé comme suit :

- il est inférieur à 0.2 pour les eaux du drain Sehaira, traduisant une salinisation sulfatée ;
- il est inférieur à 1 pour les eaux des drains à l'intérieur de la palmeraie ainsi que drain Ghadar de la zone d'étude, traduisant une salinisation sulfatée-chlorurée ;
- il est supérieur à 1 pour un seul échantillon eaux de la dépression chotteuse Ezarga traduisant un type de salinisation chlorurée-sulfatée (voir partie indice de saturation) ;

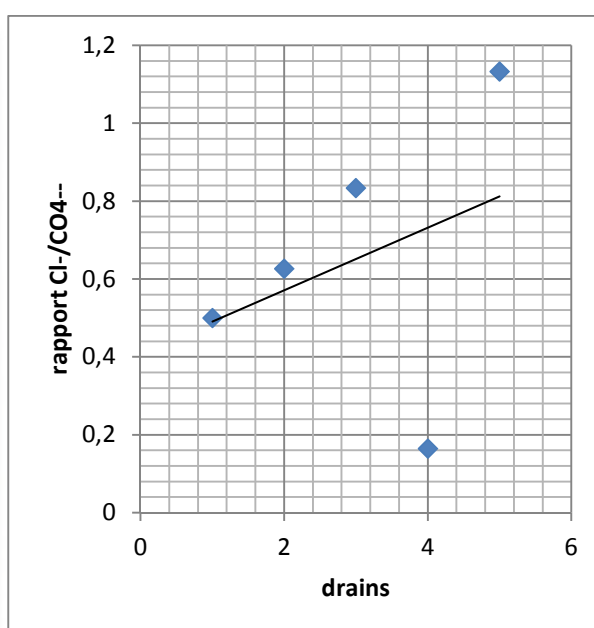


Fig.56: Diagramme de Piper des eaux des drainages des palmeraies de BBA. (Simler, 2013).

Fig55 : Représentation graphiques du rapport Cl^-/SO_4^{2-} des eaux des drains.

Le report des analyses statistiques des différents paramètres mesurés est dans le tableau suivant :

Tableau 38: Les paramètres statistiques mesurés des eaux des drains.

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
CE dS/m	7.31	77	28.21	30.35
pH	7.37	8.33	7.9	0.44
Ca ⁺⁺ (meq/l)	25.65	33.67	30.62	3.14

Mg⁺⁺(meq/l)	23.08	520.83	173.46	212.46
Na⁺(meq/l)	28.04	573.06	153.54	235.91
K⁺(meq/l)	0.66	1.54	1.03	0.41
Cl⁻(meq/l)	12.5	606.	147.1	256.91
SO₄⁻(meq/l)	25	535.12	193.45	225.83
HCO₃⁻(meq/l)	1	9.68	5.57	3.71
CO₃⁻(meq/l)	0	1.28	0.26	0.57
NO₃⁻(meq/l)	0.1	0.69	0.25	0.25
Cl/SO₄⁻	0.16	1.13	0.65	0.36
SAR	4.94	34.42	12.01	12.57

Tableau 39 : Matrice de corrélation des différents paramètres mesurés des eaux des drains de BBA

	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO₄	HCO₃	CO₃	NO₃	pH	SAR
	ms/cm											
CE	1,000	0,141	0,999	0,941	0,934	0,917	0,994	-0,768	-	0,845	0,803	0,930
s/cm								0,385				
Ca		1,000	0,176	0,451	-	0,498	0,034	0,294	0,399	0,648	-	0,468
					0,184						0,140	
Mg			1,000	0,952	0,927	0,931	0,988	-0,742	-	0,864	0,793	0,942
								0,373				
Na				1,000	0,780	0,998	0,898	-0,541	-	0,968	0,620	0,999
								0,297				
K					1,000	0,741	0,959	-0,809	-	0,623	0,845	0,761
								0,505				
Cl						1,000	0,869	-0,487	-	0,976	0,570	0,999
								0,293				
SO₄							1,000	-0,818	-	0,782	0,834	0,885
								0,417				
HCO₃								1,000	0,128	-	-	-
										0,423	0,936	0,511
CO₃									1,000	-	0,000	-
										0,085		0,314
NO₃										1,000	0,541	0,968
pH											1,000	0,586
SAR												1,000

Les résultats d'analyses des paramètres physico-chimiques des eaux de drainage provient des eaux de lessivages par irrigation montrent des valeurs élevées à très élevées de la conductivité électrique (7.31 - 77 mS/cm). Elle a une corrélation très significative liée, principalement, à la forte présence de magnésium Mg^{++} , des sulfates SO_4^- , Sodium Na^+ , potassium K^+ et les chlorures Cl^- . L'écartype de la CE est nettement élevé indique l'efficacité des drains.

Les eaux sont fortement liées entre les éléments évaporitiques (Na^+ , Cl^- , SO_4^- , Mg^{++} et Ca^{++}) dues principalement à la nature des matériaux provoquant la salinisation de ces eaux.

La composition moyenne des rejets des eaux de drainage présentent logiquement un faciès géochimique similaire à celui des eaux de la nappe.

Le pH est basique à très basique ; il est inversement lié à la présence des bicarbonates ; l'absence d'une relation significative entre ces deux paramètres pH- HCO_3^- la confirme. Il varie 7.37 à 8.33 avec une moyenne de 7.9.

Le SAR a une relation significative avec la CE et augmente avec la présence du magnésium, du sodium, du chlorure, des sulfates et de nitrate. Il varie 4.94 à 34.42 avec une moyenne de 12.01 ; ces valeurs indique SAR très élevé, selon le diagramme de Riverside : S2 à S3 pour les drains à l'intérieur des palmeraies, par contre les autres drains de Shaira ou Ezarga ne peuvent pas être illustré sur le diagramme car leurs valeurs sont très élevées. Traduisant l'efficacité des drains et le lessivage des sels des sols hors des palmeraies étudiées.

Donc, la qualité chimique de l'eau de drainage est appréciée en utilisant le diagramme de classification des eaux de l'U.S.S.L (1954) modifié (Durand, 1958). Le report des échantillons sur ce diagramme de Riverside (fig.54) indique que la salinité, représentée par la conductivité électrique CE, est très forte (C5) et la sodicité, illustrée par le SAR (Sodium Adsorption Ratio), selon Servant et Servat (1966) et le degré d'alcalinisation, appartient à la classe S2, S3 et S4 où ce risque est dangereux, il est indiqué par la sous saturation en halite.

De ce fait, en se basant sur le diagramme de détermination de la qualité de l'eau de drainage (Riverside) relative à CE et le SAR, les résultats de classement des drains révèlent l'existence les classes suivantes : **C5S1**, **C5S2**, **C5S3**, exprime une qualité très mauvaise ; si on veut les utilisées, il faut d'abords exclure les plantes sensibles et les sols lourds, et on peut les recyclées afin de les utilisées avec beaucoup de précautions dans les sols légers et bien drainés avec dose de lessivage et/ou apport de gypse. Ces conditions sont assurées vu les caractéristiques des sols et la vocation phoeniculture de la région d'étude.

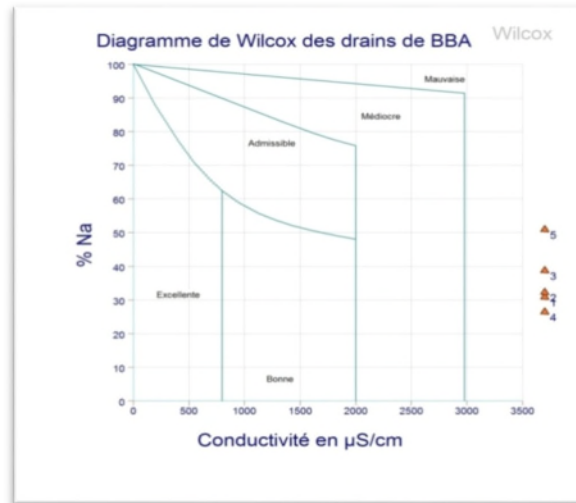


Fig.57 : Diagramme de Wilcox des eaux des drainages des palmeraies de BBA. (Simler, 2013).

VI-2- 3-2- Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux de drainage

La simulation à l'évaporation naturelle des eaux de drainage a été effectuée à l'aide du logiciel thermodynamique «modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013 ». Elle montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est varié entre 0.27 et +2.97. Ils sont plus concentrés dans les eaux de drainage que l'irrigation (puits/forage). Par contre, les minéraux évaporitiques, ils se trouvent tous en état de sous saturation (état de dissolution) pour anhydrite (CaSO_4), le gypse ($\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) ainsi que l'halite(NaCl) ; mais avec présence de quelques points de sursaturation pour ces minéraux évaporitiques (gypse et anhydrite) en suivant le sens d'écoulement des drains surtout pour la zone de dépression lac chotteuse de Ezarga, où on constate la précipitation et la formation de gypse et l'anhydrite. On constate, au cours de l'évacuation des eaux des drains, quand IS calcite diminue, IS gypse augmente.

L'halite(NaCl), au contraire des eaux d'irrigation, se présente suffisamment sous saturé ($-5.25 < \text{IS} < -2.38$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les eaux contribuant à une augmentation de la minéralisation(le sodium et le chlorure sont fortement liés à la CE et le SAR selon la matrice de corrélation du tableau39).

On constate aussi que les éléments : magnésium Mg^{++} , sulfates SO_4^{-} , Sodium Na^+ , potassium K^+ et chlorures Cl^- sont étroitement liés au processus et dynamique de formation (précipitation) ou dissolution des sels.

Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des eaux analysées et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se trouvent dans l'eau à l'état de sursaturation et précipitent sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

Tableau 40 : Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013) des eaux des drains étudiés de BBA.

eau	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
DI	-5.25	-0.29	-0.50	1.26	1.40	2.92
DII	-4.70	-0.15	-0.37	0.97	1.12	2.65
EDP(ghadar)	-4.78	-0.14	-0.36	0.79	0.93	1.86
DP(Shaira)	-4.24	0.12	-0.09	0.27	0.41	1.89
Lac Ezarga	-2.38	0.20	0.01	0.67	0.81	2.97

Tableau 41 : Analyse statistique de l'Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013)) des eaux des drains étudiés de BBA.

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-5.25	-2.38	-4.27	1.12
IS gypsum	-0.29	0.20	-0.05	0.20
IS anhydrite	-0.50	0.01	-0.26	0.21
IS aragonite	0.27	1.26	0.79	0.37
IS calcite	0.41	1.40	0.93	0.37
IS dolomite	1.86	2.97	2.46	0.55

La précipitation des minéraux suit le sens d'écoulement des drains d'amont (DI Laejal) vers l'aval (lac Ezarga) ainsi elle touche aussi les minéraux évaporitiques où on constate la formation du gypse et l'anhydrite au niveau du lac Ezarga d'où la nécessité d'installer unité de fabrication du gypse comme source d'amendement pour d'autres zones.

VI-2- 4- Etude comparative des eaux des puits, des forages et des drains

Tableau 42: Composition moyenne des différentes eaux de la zone d'étude

eau	pH	CE (dS/m)	Ca⁺⁺ (meq/l)	Mg⁺⁺ (meq/l)	Na⁺ (meq/l)	K⁺ (meq/l)	Cl⁻ (meq/l)	SO₄⁻ (meq/l)	HCO₃⁻ (meq/l)	CO₃⁻ (meq/l)	NO₃⁻ (meq/l)	Cl/so₄	SAR
F	7.38	3.99	21.14	13.45	15.21	0.31	21.61	24.94	5.06	-	0.47	0.86	3.58
P	7.32	7.22	30.91	32.96	26.40	0.50	29.21	46.47	5.72	-	0.19	0.68	4.65
D	7.9	28.21	30.62	173.46	153.54	1.03	147.1	193.45	5.57	0.16	0.25	0.65	12.01

F : forage ; P : puits ; D : drainage.

Tableau 43: Composition moyenne d'IS des différentes eaux de la zone d'étude.

Variables	forages	puits	drainage
IS halite	-5.38	-5.04	-4.27
IS gypsum	-0.37	-0.11	-0.05
IS anhydrite	-0.59	-0.33	-0.26
IS aragonite	0.49	0.41	0.79
IS calcite	0.63	0.55	0.93
IS dolomite	1.14	1.22	2.46

Selon la composition moyenne des différentes eaux de la région de Bordj ben Azouz (BBA), elles sont très fortement salées, ne convenant pas normalement pour l'irrigation dans certaines conditions, elles peuvent être utilisées en mettant en œuvre des pratiques spéciales, comme celle du drainage avec un risque de sodicité presque nul, selon la classification du Servant et Servat(1966) traduisant des eaux utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols avec peu de danger d'alcalinisation, bien que, certaines cultures sensibles au sodium puissent être gênées, sauf pour l'eau du drainage qui a un fort risque de sodicité; exprime une alcalinisation des sols très appréciable dans les sols à texture fine et surtout dans des conditions de faible lessivage, à moins que le gypse ne soit présent dans le sol. Cette eau est utilisable pour des sols à texture grossière. Ces conditions sont tous réunies dans le sol de notre région d'étude. Malgré l'origine des eaux (nappe phréatique ou de calcaire) mais ils sont fortement utilisables dans la palmeraie (zone Bordj Ben Azouz), grâce à une culture très rustique et très tolérante aux conditions extrêmes du milieu : le palmier dattier variété Deglet Nour avec un rendement de qualité qui peut atteindre 200 à 300 kg /ped. Ajoutée à un réseau du drainage très efficace.

La composition moyenne des rejets des eaux de drainage présentent logiquement un faciès géochimique similaire à celui des eaux de la nappe. L'allure générale de matrice de corrélation des drains ressemble celle des puits d'où la provenance des eaux des puits, ils jouent comme un circuit fermé.

Ils ont tous un faciès sulfato-chloruré qui est le faciès dominant origine de la nature géologique de la région de BBA (nappe du calcaire d'éocène inférieur.) Donc, Les eaux sont généralement très chargées et ont un faciès sulfaté qui provient des importantes formations évaporitiques. Le faciès géochimique dominant est sulfaté calcique et sodique surtout pour les eaux de drainage.

En effet, les résultats d'analyse des eaux de la nappe et de drainage indiquent même une sursaturation apparente des solutions par rapport à la calcite ou au gypse.

Donc, toutes les eaux appartiennent à la classe C4S1 pour la nappe de calcaire à au delà de C5S3 pour les eaux de drainage présentent une qualité médiocre à mauvaise ; selon la classification de Riverside elles sont très salées avec un risque de sodicité appréciable.

Evacuation des sels par le drainage :

Avec des eaux d'une telle salinité, le drainage des sols est absolument nécessaire. (Dutil, 1971). (Photo 04). Si le drainage du sol n'est pas suffisamment assuré on y observe aussi, fréquemment, une modification des conditions d'oxydoréduction, au bout de quelques années, avec apparition de corps réduits, sulfures par exemple, sous forme de tâches noires à faible profondeur (elles sont observées dans notre zone d'étude). Cela s'est produit dans certaines rizières sur sols très lourds de la vallée du Chélif en Algérie ou du Gharb au Maroc. (Aubert, 1963).

Le faciès chimiques des eaux des drains est similaire à celle des eaux d'irrigations quelques soit leurs provenances (puits ou forage) indiquant l'efficacité des drains. Le rapport Cl^-/SO_4^{2-} est compris entre 0.2 et 1 donc, le faciès chimique de ces eaux est sulfaté-chloruré. Les anions sont représentés par l'anion dominant SO_4^{2-} et les cations par l'ion Mg^{++} . Ces eaux renferment beaucoup de Ca^{++} et de Na^+ et dépourvue un peu de Carbonate CO_3^{2-} . Les eaux de drainages circulant dans les drains primaires des parcelles cultivées en palmiers dattier, ont une conductivité électrique CE de 7.31 mS/cm et un pH de 7.9, leur analyse constate une concentration élevé de tous les éléments chimiques en raison de lessivage des sels.

Les paramètres liés à CE des drains sont celles de la nappe phréatique (puits). Sachant que La CE du drain primaire et secondaire est le double de la CE de la solution du sol des parcelles

cultivées. Selon Dutil, (1971). Dans les vieilles palmeraies, bien irriguées et bien drainées, il apparaît que la concentration de la solution du sol est de l'ordre de 1.5 à 2 par rapport à la concentration de l'eau d'irrigation utilisée (Durand, 1958) ; mais, dans les palmeraies moins bien drainées, la solution du sol peut être 2 à 3 fois plus concentrée que l'eau d'irrigation. En valeur moyenne, et avec une concentration double au niveau du drain, on peut dire que l'exportation du sel est de l'ordre de 2/3 des apports, 1/3 reste dans le sol irrigué.

La salinité des eaux des drains est très chargées en sel reflète le lessivage des sels, ils sont classé C5S3, il ya deux points qui n'apparaissent pas sur le diagramme de Riverside (drain à CE 39dS/m de Shaira et lac chotteuse Ezarga(paysage d'aval à CE 77 dS/m où il se fonctionne comme un système concentrateur de sels ; par capillarité les sels s'accumulent en surface pendant les mois secs (avril à octobre) comme celle observé à l'oasis de Guettar en Tunisie(Job, 1992) ; les eaux des drains sont excessivement de mauvaise qualité et elles ne sont pas à réutiliser sauf dans le cas de recyclage après l'installation d'une station d'épuration à base de la phytoremédiation (voir chapitre végétation et plantes indicatrices).



Photo04 : Drain principal BBA (palmeraie de Laejal) qui collecte les eaux de drainages de Ghadar vers Ezarga. (Auteur, 2014).

VI-2-5- Conclusion

Dans la région de Bordj ben Azouz, l'irrigation est assurée par le pompage des eaux des forages de la nappe du calcaire ainsi que l'exploitation des eaux de la nappe phréatique du

quaternaire à travers des puits de profondeur varie de 4 à 8 mètre. La qualité de l'eau d'irrigation est appréciée en utilisant le diagramme de classification des eaux de l'U.S.S.L (1954) modifié (Durand, 1958 et 1983). Le report des échantillons dans ce diagramme de Riverside (fig.58) indique que la salinité, représentée par la conductivité électrique CE, est forte à très forte (C4 et C5) et la sodicité, illustrée par le SAR (Sodium Adsorption Ratio), selon Servant et Servat, (1966), et selon le degré d'alcalinisation appartient à la classe S1 pour les eaux des forages, de S1 à S4 pour les eaux des puits et drainage, ceci indique un apport très important de Na^+ à la solution du sol traduisant un risque de sodicité pour ces eaux d'irrigation. Tous les points d'eau ont une classification comprise entre C4S1 et C5S4 (Fig.58) traduisant une mauvaise qualité chimique de ces eaux. Par conséquent, les eaux principalement de la classe C5 peuvent être utilisées en irrigation dans notre région d'étude car on est dans le cas des sols drainants riches en calcium soluble (Dubost, 1994), ajouté à un réseau du drainage à ciel ouvert très efficace.

Tenant compte de la spécificité de la région de Bordj ben Azouz comme étant une oasis ; le palmier dattier est la culture pilote pratiquée avec un rendement moyen dépasse 100 kg/pieds. Or, la tolérance des plantes cultivées vis-à-vis de la salinité varie largement en fonction de l'espèce, de la variété, du stade végétatif et des facteurs liés au milieu (Daoud et Halitim, 1994). Néanmoins l'historique de la région et le choix stratégique actuel du pays doivent nous orienter vers des pratiques agricoles très rentables surtout pour le drainage des terres irriguées est-il très important pour contrôler et réduire la salinisation des sols car l'irrigation avec des eaux salées nécessite l'apport d'une fraction d'eau supplémentaire pour lessiver les sels (Vallès et al, 1983) afin de maintenir la composition saline de la solution de sol proche de celle de l'eau d'irrigation (Dubost, 2002). L'irrigation gravitaire, utilise beaucoup d'eau, est très sollicitée dans cette région surtout pour les pieds âgés, ce qui influence les propriétés du sol ainsi que le végétal avec un risque d'accumulation importante de sels dans la zone racinaire, alors qu'en irrigation localisée destinée essentiellement pour les palmiers les moins âgés, le taux d'humidité dans la zone racinaire reste élevé, ce qui limite les risques d'accroissement de la concentration en sels et de la pression osmotique. (Soutter et al, 2007). Donc, la réduction du risque de salinisation et d'alcalinisation secondaire dans la région d'étude peut se faire en conjuguant des périodes d'irrigation localisée (goutte à goutte), avec des périodes d'irrigation gravitaire permettant le lessivage des sels dans les drains qui doivent être toujours entretenus et encore le changement des sources d'irrigation ou en mélangeant l'eau utilisée de puits le plus répondue avec celle de forage à faible teneur en sodium

(presque le moitié à S1 traduisant un risque nul de sodicité). L'étude révèle une eau d'irrigation de qualité acceptable, mais qui doivent être suivies continuellement. Par contre les eaux des drainages agricoles sont très chargées en sels d'origine diverses. La mise en place d'un système de drainage dans les aménagements hydro-agricoles dès le début est nécessaire comme partout dans l'agriculture irriguée comme dans la zone de delta du fleuve de Sénégal, les oasis de Tunisie.

Dans les périmètres irrigués que dans les oasis, la salinisation secondaire a une double origine : l'eau d'irrigation et les remontées des plans d'eau souterrains. Hachicha et al. (1992) qui indiquent que l'effet salinisant des eaux d'irrigation est négligeable par rapport à celui de la nappe; les sols à drainage déficient sont, en effet, ceux qui sont les plus chargés en sels. (Ben Hassine, 2005). Sous irrigation, la précipitation concomitante de gypse pourrait aussi avoir des conséquences importantes sur les propriétés physiques par une cimentation des particules du sol sous forme d'accumulation calcaro-gypseux, tout particulièrement dans les zones où la nappe est la plus superficielle et la plus concentrée. (Marlet et al, 2007).

b

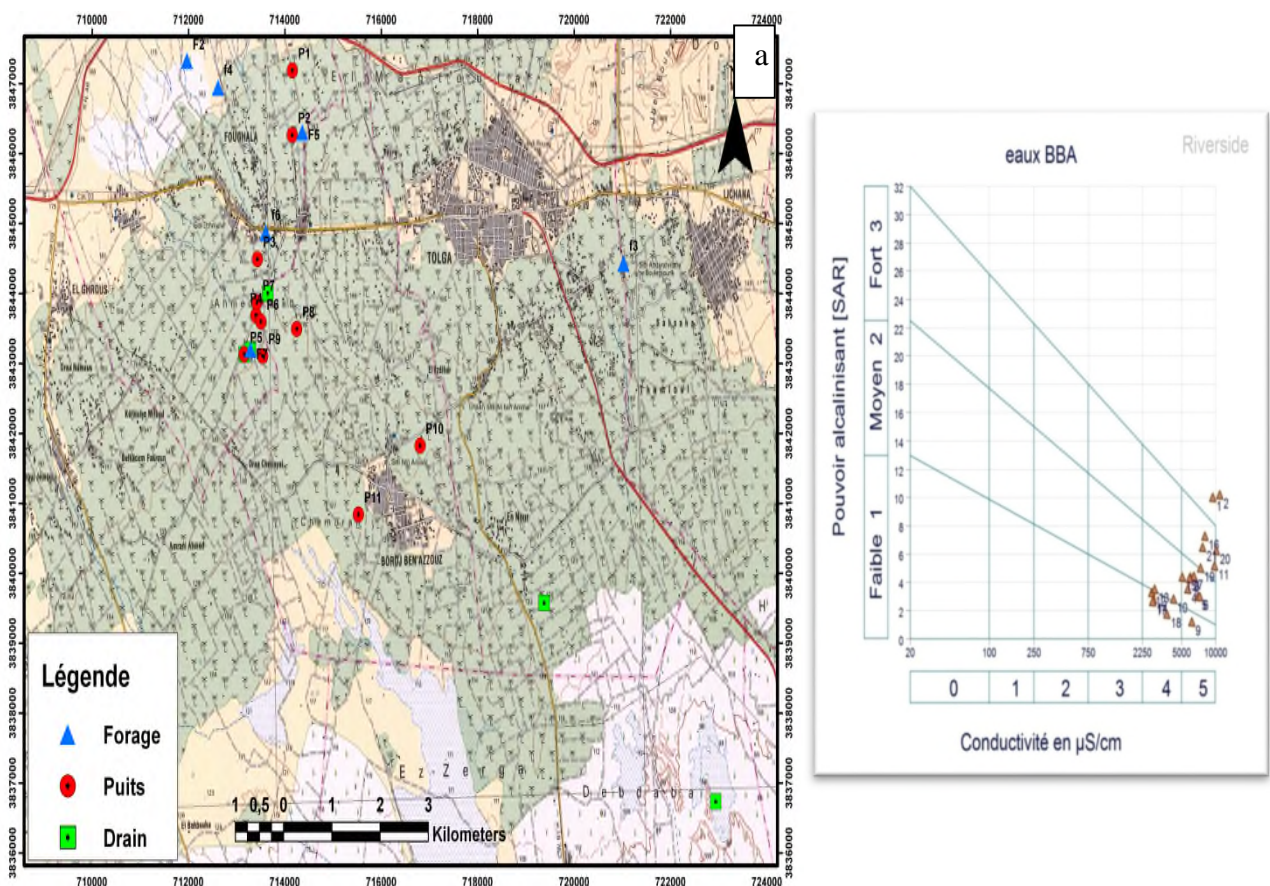


Fig.58 : Carte de positionnement (a) et Diagramme de classification (b) des différents points d'eau (forages, puits et drains) de la région BBA.

VI-3- Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation de la plaine d'El-Outaya

Etat de l'art

La plaine d'El Outaya est située à 28 km au Nord de la ville de Biskra. Elle constitue la transition entre les domaines atlasiques plissés au Nord et les étendues désertiques de la plateforme saharienne au Sud. Elle correspond à un vaste glacis en pente douce qui s'étale au sud-ouest du Djebel Maghraoua et au pied de l'Aurès à des altitudes qui s'abaissent d'une manière très régulière et presque imperceptible de 250 à 180m. Les vallées ne s'y marquent guère et la plaine est entourée de crêtes, correspondant à la tranche des couches plissées ; constituant des arêtes à flancs dissymétriques, elles culminent autour des altitudes de 415m (Djebel Boughzal) et de 483m (Djebel Maghraoua). Le Djebel Mellah présente une autre configuration : il se dresse jusqu'à 626 m sans s'intégrer dans les autres alignements ; au contraire, il constitue un dôme escarpé et raboteux. Le réseau hydrographique de la région est très peu dense, il comporte un tronc principal, Oued Biskra, qui fait partie du bassin fermé du chott Melghir et reçoit sur sa rive gauche quelques tributaires issus de l'Aurès et de Djebel Mellah. La majorité de réseau hydrographique est à sec le long de l'année, sauf lors des pluies exceptionnelles. (Chebbah 2007 ; Rechachi, 2010 ; Haouchine et al, 2010).

Les eaux d'irrigation par leur composition peuvent avoir une influence sur le sol (Coutinet, 1965). Comme, les eaux de la nappe du Mio-Plio-quaternaire de la zone Est de la plaine d'El Outaya présente une salinité assez élevée variant entre 1 et 5 g/l (Brinis et al, 2009), ces eaux souterraines selon ses grands axes d'écoulement sont caractérisées par la dominance des cations (Na et Mg) et les anions (Cl et SO₄), d'où l'influence des roches évaporitiques. Leur influence de salinisation ne peut être que négative pour les sols et par conséquent sur la plus part des cultures. Du fait une analyse rigoureuse de leur physico-chimie s'avère nécessaire pour la détermination de la part de leur influence sur la salinisation des sols en question.

La réponse aux besoins de la population locale, sur le plan d'alimentation en eau potable qu'irrigation agricole, se manifeste par une double source, l'une provient, en partie, d'un barrage réalisé à l'amont (barrage Fontaine des gazelles), mais la partie importante de ces besoins se manifeste par des eaux souterraines (forages principalement). Donc, la plaine d'El-Outaya est privilégiée par un barrage « fontaine des gazelles » alimenté par les eaux de surface, ainsi que les eaux souterraines de la nappe de Miopliocene.

Suite à notre étude du travail de magister en 2010, ainsi que pas mal des travaux ont été réalisés dans la plaine sur le plan géologique, géochimique et la qualité des eaux ou des sols, notre contribution sera sur le suivi de la qualité des eaux de surface et des forages utilisées en irrigation dans la plaine d'El-Outaya, la méthodologie du travail est de faire une enquête sur terrain de la plaine d'El-Outaya suivie par une évaluation de la qualité physico-chimique, des eaux d'une vingtaine d'échantillons d'eau d'irrigation provenant de barrage et/ou de forages réalisés dans la nappe du Miopliocène, ainsi que leur aptitude à l'irrigation des terres cultivées, principalement en céréaliculture, en maraichage (sous serre ou plein champs) ; les analyses sont effectuées au niveau du laboratoire central du CRSTRA.

VI-3-1-Caractérisation et la qualité des eaux d'irrigation de la plaine

VI-3-1-1- Eau de surface : Le barrage « fontaine des gazelles » :

Le barrage « fontaine des gazelles » est construit sur l'oued El Haï, dont le bassin versant est allongé dans la direction Nord-Est, Sud-Ouest entouré de la chaîne montagneuse peu élevée. Il est situé au Nord-est de la plaine d'El Outaya. Le réseau hydrographique qui alimente ce barrage est constitué essentiellement de l'oued Biskra à l'Est, alimenté par des pluies exceptionnelles surtout en automne et au printemps sous forme d'orage, et les affluents issus des massifs des Aurès, et l'oued Selsou à l'Ouest qui présente un écoulement du type endoréique. (Chabour, 2006). Il s'agit d'un barrage d'une capacité de 55 Hm³ qu'est entré techniquement en service en mai 2000. Son exploitation pour l'irrigation de la plaine a effectivement commencé après 2004 (à cause des travaux du transfert des eaux vers la plaine). Il régularise un volume annuel de 14 Hm³ destiné dans un premier temps, selon l'ONID(en 2014 (office nationale d'irrigation et drainage de Biskra), à irriguer 842 ha en Mkinet ; la zone sud de la plaine au pied du Djebel Boughezal. Ainsi que, l'irrigation de la zone de Maghraoua (58 ha), la ferme Driss Amor (5 ha) et la palmeraie de Smala (7 ha).

VI-3-1-1-1- Etude de la qualité physico-chimique des eaux de surface

Selon les données de 2008(DHW) et 2010(Rechachi, 2010); les eaux du barrage enregistrent une évolution de la conductivité électrique égale de 2.5 dS/m, et un SAR de 2,34 en 2008, à 4.65 dS/m, et un SAR de 6.49 en 2015, elles présentent donc un risque de salinisation très élevé et un risque de sodicité faible à fort (C4S1, C4S2 et C4S3)(Fig.59). L'eau du barrage ayant une conductivité électrique à 25°C varie de 2.5 à 4.65 dS/m, fait partie de la classe de salure très salée, vis-à-vis du sol et peu salé vis-à-vis des plantes (tableau44).

Les résultats analytiques montrant l'évolution du faciès chimiques de l'eau du barrage « fontaine des gazelles » utilisée en irrigation des sols des périmètres de mise en valeur (Mkinet) étudiés sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau 44 : Evolution de l'analyse du bilan ionique des eaux d'irrigation du barrage « Fontaine des Gazelles ».

année	CE dS/m à 25°C	pH	Cations (meq/l)				Anions (meq/l)			SAR	Classe USSL
			Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻		
2008	2.5	7.6	10.3	24.5	9.78	0.256	20.3	12.3	6.7	2.34	C4S1
2010	3.5	7.65	7.62	4.05	8	0.13	20	10.6	11	3.32	C4S1*
2015	4.65	7.92	15.23	7.49	21.89	0.22	7.5	17.14	3.52	6.49	C4S3

Note : * l'eau de 2010 a une classe C4S1à tendance C4S2 (sur la ligne limite des deux classes-voir figure)

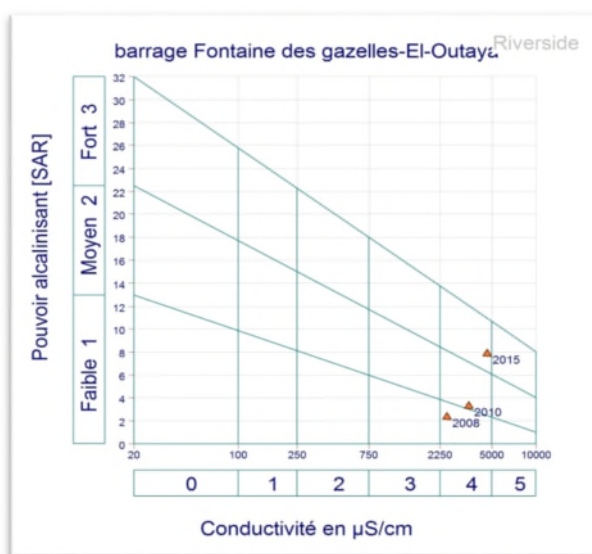


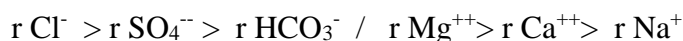
Fig. 59: Diagramme de Riverside des eaux d'irrigation de barrage « Fontaine des Gazelles » selon Manuel pour Diagrammes (Smiler, 2013).

L'eau du barrage, quelque soit la période de prélèvement, est regroupée dans une seule classe C4, eaux très fortement salées, mais on remarque une évolution très marquante de la sodicité de S1 en 2008 à S3 en 2015 traduisant un risque très alcalinisant due principalement à l'augmentation de concentration en ions alcalinisant Na⁺ dans l'eau d'irrigation(voir tableau44), elles peuvent être utilisées en mettant en œuvre des pratiques spéciales, comme

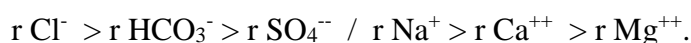
celle du drainage avec des doses supplémentaires de lessivage, selon la classification du Servant et Servat(1966) traduisant des eaux utilisables pour l'irrigation de presque tous les sols avec peu de danger d'alcalinisation, bien que, certaines cultures sensibles au sodium puissent être gênées. Cette eau est utilisable pour des sols à texture grossière. Donc, les eaux de barrages appartiennent à la classe C4S1 à C4S3 ; selon la classification de Riverside elles sont très salées avec présence d'un risque de sodicité.

V-3-1-1-2- Evolution du faciès chimiques de l'eau du barrage « Fontaine des gazelles »

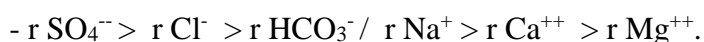
En 2008, le faciès chimique (Fig.60) est chloruré magnésique et calcique avec une salinisation de type chlorurée-sulfatée (rapport Cl^-/SO_4^{2-} égale à 1.65), leur faciès caractéristique est :



En 2010, le faciès chimique est chloruré sodique avec une salinisation de type chlorurée-sulfatée (rapport Cl^-/SO_4^{2-} égale à 1.89), leur faciès caractéristique est :



En 2015, le faciès chimique est sulfaté sodique avec une salinisation de type sulfato-chlorurée (rapport Cl^-/SO_4^{2-} égale à 0.43), leur faciès caractéristique est :



Les eaux de surface mobilisées par ce barrage semblent moins chargées en sels que les eaux de l'aquifère Néogène et atteints les valeurs minimales des eaux souterraines. (Brinis, 2011). L'évolution du faciès de chloruré-sodique vers sulfaté sodique est due principalement à la dominance d'un anion de l'autre. L'origine des sulfates est due, sans doute, à la dissolution des formations évaporitiques du Néogène, mais, grossièrement, ces eaux appartiennent à la classe des oligochlorurées avec un $r Cl^-$ compris entre 15 et 40 meq /l (Brinis, 2003).

Tableau 45: Rapport Cl^-/SO_4^{2-} montrant l'évolution de la nature de la salinisation.

Eau du barrage/période	Cl^-/SO_4^{2-}	Nature de salinisation
En 2008	1.65	Salinisation chlorurée-sulfatée
En 2010	1.89	Salinisation chlorurée-sulfatée
En 2015	0.43	Salinisation sulfato-chlorurée

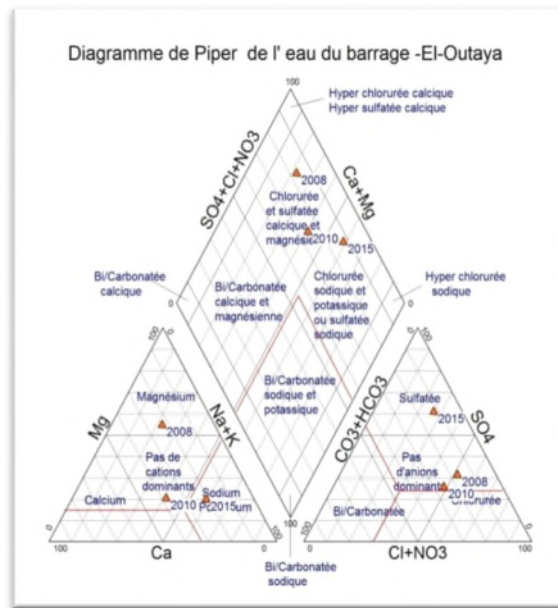


Fig.60 : Diagramme du Piper de l'évolution du faciès chimique de l'eau du barrage « Fontaine des Gazelles » durant 7 ans.

VI-3-1-1-3- Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux du barrage « Fontaine des gazelles »

Tableau 46: Evolution de l'indice de saturation IS des minéraux présents dans l'eau du barrage « Fontaine des gazelles » durant 7 ans.

Variables	2008	2010	2015
IS halite	-5.47	-5.54	-5.53
IS gypsum	-0.90	-0.91	-0.75
IS anhydrite	-1.12	-1.13	-0.97
IS aragonite	0.01	0.13	-0.37
IS calcite	0.16	0.27	-0.22
IS dolomite	0.82	0.39	-0.35

La simulation à l'évaporation naturelle des eaux de barrage « Fontaine des gazelles » durant 7 ans a été effectuée à l'aide du logiciel thermodynamique « modèle Phreeqc interactive 3.1.4-8929, Parkhurst et Appelo, 2013 ». Elle montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite**

(CaCO₃). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est varié entre 0.01 et +0.82. Ils sont plus concentrés dans les eaux des deux années successives 2008/2010. Par contre, les minéraux évaporitiques se trouvent tous en état de sous saturation (état de dissolution) pour anhydrite (CaSO₄), le gypse (Ca SO₄, 2H₂O) ainsi que l'halite(NaCl) ;

L'indice de saturation des minéraux présents dans l'eau du barrage pour l'année 2015, est sous saturé comme pour les minéraux évaporitiques que carbonatés indiquant la dissolution de ces minéraux dans l'eau. La nature de type de salinisation sulfato-chloruré explique cette sous saturation en 2015.

L'halite(NaCl), au contraire des eaux d'irrigation, se présente suffisamment sous saturé (-5.25<IS<-5.53), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les eaux contribuant à une augmentation de la minéralisation.

Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des eaux analysées surtout pour l'année 2015 et l'importance de l'halite dans le chimisme.

VI-3-1-2- Etude de la qualité des eaux des forages (l'eau souterraine) utilisées en irrigation agricole dans la plaine d'El-Outaya :

La structure à valeur synclinale de la plaine d'El Outaya, les caractéristiques lithologiques ainsi que l'analyse des données de la campagne géophysique (CGG, 1971) permettent de relever les différents ensembles aquifères constitués le réservoir. (Haouchine et al, 2010). L'aquifère Néogène représente la plus importante ressource de la plaine d'El-Outaya utilisée pour l'irrigation. Cet aquifère peut être décrit selon les études géologiques comme un réservoir multicouche à cause de nombreuses passées argileuses ou bien grésifiées. C'est un aquifère complexe par sa composition lithologique hétérogène, et sa structure tectonique. Le problème posé par les exploitants lié à cette ressource est plutôt qualitatif que quantitatif. La partie Est, le niveau exploité est conglomératique (Pliocène), au centre c'est essentiellement le Miocène et la nappe alluviale de l'Oued El-Hai, par contre la limite Ouest de la plaine où le remplissage Néogène est assez faible, les exploitants tendent à capter les calcaires d'âge Eocène qui sont proches de la surface et qui constituent le substratum de l'aquifère étudié. (Brinis, 2011). L'étude de ces eaux fait apparaître l'importance du faciès gypso-salifère sous l'influence de la dissolution des formations évaporitiques (Trias et Néogène). Ces eaux contiennent des teneurs élevées en sulfates, chlorures, et sodium. Les concentrations en sels sont très variables d'une zone à une autre et se regroupent en trois familles chimiques: sulfatée magnésienne, sulfatée sodique et chlorurée sodique. L'évolution du chimisme est en étroite relation avec les axes des

écoulements des eaux souterraines. (Brinis, 2011 ; Rechachi, 2010), les trois types du faciès chimique des eaux souterraines de la plaine d'El-Outaya sont :

- groupe du faciès **chloruré sodique représente 53 %** des échantillons analysés ;
- groupe du faciès **sulfaté-magnésienne représente 35 %** des échantillons analysés ;
- groupe du faciès **sulfaté-sodique représente 12 %** des échantillons analysés.

Dont, la répartition spatiale de ces faciès chimique est comme suit :

- Les eaux de la zone Est de la plaine sont sulfatées ;
- Les eaux de la zone Centre de la plaine sont chlorurées ;
- Les eaux de la zone Ouest de la plaine sont de mélange sulfatées et chlorurées.

L'irrigation par les eaux souterraines qui proviennent de la nappe du Néogène-Quaternaire touche plus de 70% des terres exploitées. (Brinis, 2011). Selon le bilan de l'ANRH (2008) des autorités concernées, on estime la surface de la plaine destinée à l'agriculture de 9 884 hectares dont seulement 5491 sont irrigués (eaux souterraines et de surface) soit 55,55%. Ce qui demande un effort considérable pour une bonne gestion de la ressource hydrique afin de rentabiliser ces terres encore non exploitées. A l'état actuel des choses, la plaine compte 16 forages (autorisés et plus de 200 non autorisés). Ce qui est au dessous des espérances des agriculteurs de la région qui demande davantage d'eau pour exploiter les 45 % qui restent des terres agricoles ; soit en exploitant plus des eaux souterraines (tenant compte la qualité de ces eaux) ou soit par l'élargissement du périmètre d'irrigation du barrage fontaine des gazelles. Le risque de l'utilisation des eaux souterraines sans étude préalable reste la salinisation des sols.

Les sondages de la région, captent l'aquifère du Miopliocène, sont surtout réservés pour l'agriculture. Etant données les études pré avants, les eaux de ces forages sont caractérisées par une conductivité électrique qui varie entre 1,7 à 7,1 mmhos/cm, elles sont salées à très salées, avec un risque de sodicité faible à moyen (SAR de 2 à 14.5) et un pH légèrement basique variant entre 7.4 et 8.9 (BRINIS, 2003). Les eaux appartiennent à trois classes selon Richard (1954) (C3S1, C4S1, C4S2).

VI-3-1-2 -1-Hydrochimie

Les résultats d'analyses des paramètres physico-chimiques des eaux de forages alimentées par la nappe de Miopliocene montrent des valeurs élevées de la conductivité électrique (3.26 – 7.39 mS/cm). Elle a une corrélation très significative liée, principalement, à la forte présence de calcium Ca^{++} , chlorures Cl^- , sodium Na^+ et magnésium Mg^{++} . Les eaux sont fortement liées entre les éléments évaporitiques (Na^+ , Cl^- , SO_4^{--} , Mg^{++} et Ca^{++}) et principalement due à

la nature des matériaux provoquant la salinisation de ces eaux. Sachant que, à titre d'exemple, l'origine de l'ion calcium est obtenue en majorité de l'attaque par CO₂ dissous (acide carbonique) des roches calcaires ou par simple dissolution des roches gypseuses. Il participe aux phases de précipitations avec les bicarbonates dans l'aragonite et calcite. Le calcium dans l'eau de la région d'El-Outaya provient en majorité de la dissolution des roches évaporitiques. Le pH est neutre à basique ; il est fortement lié à la présence des bicarbonates ; la relation significative entre ces deux paramètres pH-HCO₃⁻ la confirme. Il varie 7.22 à 8.01 avec une moyenne de 7.47.

Le SAR a une relation significative et augmente avec la présence du sodium et des bicarbonates et inversement corrélé au magnésium. Il varie de 3.30 à 7.46 avec une moyenne de 5.24 ; ces valeurs indiquent un SAR faiblement élevé (4 < S₂ < 8) selon le diagramme de Riverside pour la plupart des points d'eau inventoriés. Toutes ces eaux sont salées et de mauvaises qualités (CE > 3 dS/m) (Fig.61), selon la carte de salinité (fig.62). La projection des points des forages sur le diagramme de Riverside a montré une classe de C4S2 pour la plupart des forages avec quelques points de C5S2. Donc, toutes les eaux des forages exploitant la nappe Miopliocene sont salées et de mauvaise qualité. En outre, les eaux des forages sont toujours chargées par rapport aux eaux du barrage « Fontaine des gazelles » même selon différentes périodes de prélèvement (2008, 2010, 2012 (Abdelhafid et al), 2015).

Tableau 47: Les paramètres statistiques mesurés des eaux des forages de la plaine d'El-Outaya

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
CE dS/m	3.26	7.39	4.56	1.01
pH	7.22	8.01	7.47	0.25
Ca ⁺⁺ (meq/l)	10.82	23.65	14.61	3.20
Mg ⁺⁺ (meq/l)	7.85	42.93	20.74	10.51
Na ⁺ (meq/l)	13.26	28.8	21.35	4.37
K ⁺ (meq/l)	0.1	0.23	0.18	0.04
Cl ⁻ (meq/l)	20	52	34.86	10.66
SO ₄ ⁻ (meq/l)	6	22.68	15.05	5.63
HCO ₃ ⁻ (meq/l)	3.48	21	6	5.40
Cl ⁻ /SO ₄ ⁻	1.1	6	2.65	1.26
SAR	3.30	7.46	5.24	1.20

Tableau48 : Matrice de corrélation des forages El-Outaya.

	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	pH	SAR
	ms/cm									
CE ms/cm	1,000	0,927	0,617	0,689	-0,342	0,770	0,453	-0,345	-0,278	0,023
Ca		1,000	0,502	0,676	-0,333	0,786	0,418	-0,318	-0,250	0,072
Mg			1,000	0,220	-0,265	0,478	0,406	-0,423	-0,283	-0,540
Na				1,000	-0,003	0,718	0,231	0,136	-0,066	0,665
K					1,000	-0,019	-0,161	-0,067	-0,390	0,222
Cl						1,000	0,374	-0,082	-0,065	0,181
SO4							1,000	-0,577	-0,095	-0,159
HCO3								1,000	0,688	0,573
pH									1,000	0,252
SAR										1,000

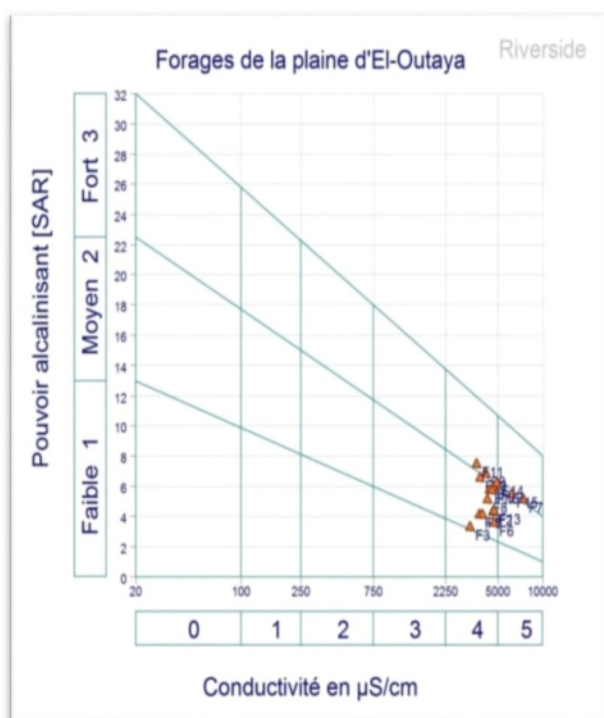


Fig.61 : Diagramme de classification des eaux des forages utilisés en irrigation (Riverside USSS, 1954 effectuée par le logiciel Diagrammes version free, Smiler, 2013).

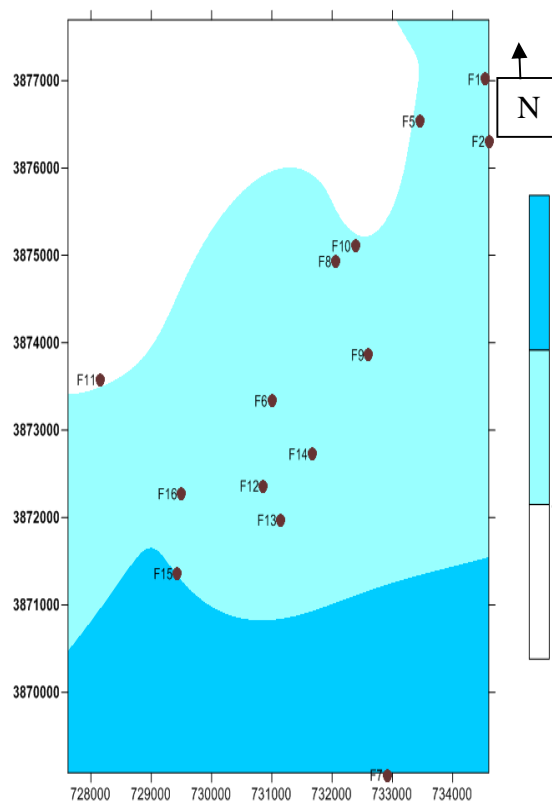


Fig.62 : Carte de salinité (CE dS/m) des eaux des forages utilisés en irrigation des sols de la plaine d'El-Outaya.

VI-3-1-2 -2- Etude du Faciès chimique des eaux souterraines

Le faciès chimique des eaux d'irrigation de la nappe de Miopliocene est chloruré sodique magnésique et calcique avec une salinisation de type chlorurée-sulfatée (rapport $1 < Cl^- / SO_4^{2-} < 5$ pour tous les échantillons d'eau)(Fig63), et selon Brinis (2011) ces eaux sont de mélange chloruré sulfaté et se localisent dans l'ouest de la plaine, sauf pour un seul échantillon ce rapport est supérieur à 5, exprimant un faciès chloruré, selon Servant et Servat (1966). Leurs faciès caractéristique est : $r Cl^- > r SO_4^{2-} > r HCO_3^- / - r Na^+ > r Mg^{++} > r Ca^{++}$

Les eaux de la nappe du Miopliocene représentées sur le diagramme de Piper (Fig.64), montrent une faible diversité. Ces points sont regroupés au pôle chloruré et sulfaté calcique et magnésien ainsi que le pôle chloruré sodique et sulfaté sodique. Ces faciès dénotent l'influence des terrains triasiques salifères (djebel El Mellah).



Fig.64 : Diagramme de Piper représentant du faciès chimique des eaux des forages de la nappe Miopliocene utilisées en irrigation de la plaine d'El-Outaya.

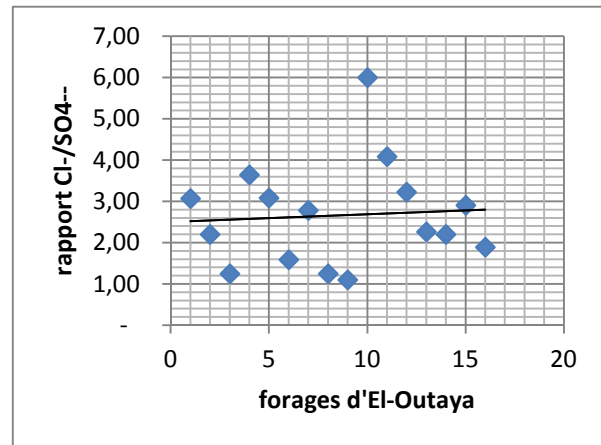


Fig.63 : Représentation graphique du rapport Cl^- / SO_4^{2-}

VI-3-1-2 -3-Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans les eaux des forages de la plaine d'El-Outaya :

Le calcul des indices de saturation (Tableau49) montre que les eaux étudiées sont saturées par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sont sous-saturées pour l'halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 49: Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013)) des eaux de forages de la plaine d’El-Outaya.

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS Halite	-5.35	-4.64	-4.93	0.21
IS gypse	-1.23	-0.49	-0.78	0.21
IS Dolomite	-0.19	3.45	0.40	0.88
IS Calcite	-0.24	1.69	0.09	0.47
IS Aragonite	-0.39	1.54	-0.05	0.47
IS	-1.53	-0.79	-1.09	0.20
Anhydrite				

La simulation à l'évaporation naturelle des eaux de la nappe de l'aquifère Néogène-Quaternaire a été effectuée à l'aide du logiciel thermodynamique «Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013», en termes d'équilibres sels/solution. Elle montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). A noter que quelques points de calcite et plus d'aragonite se trouvent saturés (en équilibre) même parfois légèrement sous-saturés. L'indice de saturation étant pour l'ensemble des minéraux carbonatés entre -0.24 pour la calcite (proche de l'équilibre) et +3.45 pour dolomite. (Tableau 49).

Par contre les minéraux évaporitiques se trouvent sous-saturés, ainsi on constate que le Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), l'Anhydrite (CaSO_4) sont proche de la saturation (état d'équilibre) ; Alors que la Halite (Na Cl) se trouve largement sous-saturé ($-5.35 < \text{SI} < -4.64$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les eaux contribuant ainsi à une augmentation de la minéralisation. Le dôme salifère d'El Outaya participe, largement, à la minéralisation (par lessivage) des eaux souterraines qui la traversent.

Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des eaux analysées et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se trouvent dans l'eau à l'état d'équilibre (saturés) à sursaturation et précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

Tableau 50 : Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 3.0, Parkhurst et Appelo, 2013)) des eaux de forages de la plaine d'El-Outaya.

eau	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
F1	-4.85	-0.89	-1.23	-0.39	-0.25	-0.14
F2	-4.97	-0.77	-1.10	-0.32	-0.18	-0.04
F3	-5.35	-0.77	-1.07	-0.22	-0.08	0.26
F4	-5.14	-1.03	-1.33	-0.18	-0.04	0.25
F5	-5.14	-0.95	-1.29	-0.15	-0.00	0.20
F6	-5.02	-0.65	-0.99	-0.39	-0.24	-0.00
F7	-4.64	-0.55	-0.89	-0.06	0.09	0.50
F8	-5.18	-0.62	-0.96	-0.19	-0.04	-0.19
F9	-5.05	-0.57	-0.92	-0.22	-0.08	-0.16
F10	-4.85	-1.23	-1.53	1.54	1.69	3.45
F11	-4.92	-1.06	-1.37	0.47	0.62	1.19
F12	-4.83	-0.77	-1.07	-0.01	0.13	0.26
F13	-4.78	-0.76	-1.06	-0.22	-0.08	0.47
F14	-4.69	-0.49	-0.79	-0.10	0.05	0.06
F15	-4.65	-0.66	-0.96	-0.16	-0.01	0.29
F16	-4.80	-0.64	-0.94	-0.24	-0.10	0.08

VI-3-1-2 -4- Discussion, aptitude des eaux à l'irrigation

Dans la région de la plaine d'El-Outaya, l'irrigation agricole est privilégiée par un barrage « fontaine des gazelles » alimenté par les eaux de surface ainsi que les eaux souterraines de la nappe de Miopliocene. La qualité de l'eau d'irrigation est appréciée en utilisant le diagramme

de classification des eaux de l'U.S.S.L (1954) modifié (Durand, 1958). Le report des échantillons sur ce diagramme de Riverside montre que pour l'eau du barrage, quelque soit la période du prélèvement, a une seule classe C4, eaux très fortement salées, mais on remarque une évolution très marquante de la sodicité de S1 en 2008 à S3 en 2015 traduisant un risque très alcalinisant due principalement à l'augmentation de concentration en ions alcalinisant Na^+ . Par contre, pour l'eau souterraine de la nappe exploitée de Miopliocène a une classe de C4S2 pour la plupart des forages analysés avec quelques points de C5S2. Donc, toutes les eaux des forages exploitants la nappe Miopliocene sont salées et de mauvaises qualités. La sodicité, illustrée par le SAR (Sodium Adsorption Ratio), selon Servant et Servat, (1966), et selon le degré d'alcalinisation appartient à la classe 1 où ce risque est nul (S1 : entre 0 et 4) pour 1/8 des échantillons (soit 12.5 %) et à la classe faible S2(entre 4 et 8) pour la plupart des échantillons prélevés(87.5%); ceci indique un apport très important de Na^+ à la solution du sol traduisant un risque de sodicité pour ces eaux d'irrigation.

Le faciès géochimique des eaux de barrage a connu une variation de type de salinisation de chloruré sodique en 2008 et 2010 à sulfato- chloruré en 2015. Les eaux de surface mobilisées par ce barrage semblent moins chargées en sels que les eaux de l'aquifère Néogène et atteints les valeurs minimales des eaux souterraines surtout pour les deux périodes 2008 et 2010. L'évolution de faciès de chloruré-sodique vers sulfaté sodique est due principalement à la dominance d'un anion de l'autre. L'origine des sulfates est due, sans doute, à la dissolution des formations évaporitiques du Néogène, mais, grossièrement, ces eaux appartiennent à la classe des oligochlorurées avec un r_{Cl^-} compris entre 15 et 40 meq/l (Brinis, 2003).

Le faciès chimique des eaux d'irrigation de la nappe de Miopliocene est chloruré sodique magnésique et calcique avec une salinisation de type chlorurée-sulfatée. Ce faciès, selon Brinis (2011) dénote l'influence des terrains triasiques salifères (djebel El Mellah). En outre, selon l'étude hydrochimique réalisée par Haouchine, a révélé une forte minéralisation des eaux souterraines, due à la présence de formations gypseuses et argileuses, ce qui a provoqué des concentrations très élevées en certains éléments, notamment les chlorures, le sodium et les sulfates. En plus de la concentration des sels en surface par évaporation intense, l'origine des fortes teneurs observées dans les eaux souterraines de la région d'El Outaya est due notamment à la dissolution des évaporites des formations aquifères ; phénomène lié principalement à la nature minéralogique des réservoirs. Ces conclusions sont corroborées par la géologie de la région.

Il s'agit d'une eau très salée vis à vis des sols, et peu salée vis à vis des plantes, et faiblement sodique. Cependant cette eau chlorurée sulfatée est très riche en magnésium, ce qui mérite une étude particulière sur les conséquences de l'utilisation d'une telle eau sur les sols et les plantes. Les effets de ce cation étant très controversés (Daoud et al. 1993).

La prédominance des chlorures sur les sulfates dépend essentiellement de l'état des minéraux qui génèrent ces éléments dans l'eau (équilibre, sursaturé, sousaturé). D'ailleurs, l'absence du faciès carbonaté est du en partie à sa présence dans l'eau en phase de précipitation (indice de saturation positif). Alors que les minéraux évaporitiques sont sousaturés.

Elle est normalement inutilisable pour l'irrigation. Par conséquent, les eaux principalement de la classe C5 ne peuvent être utilisées en irrigation que dans le cas des sols très drainants (sables et graviers) riches en calcium soluble (Dubost, 1994) d'où la nécessité d'installer un réseau du drainage là où il faut selon la nature du sol, la topographie, la géologie, hydrogéologie, géomorphologie ainsi que la qualité des eaux en suggestion. En plus, une eau appliquée en excès pour le lessivage (Vallès et al, 1983) afin de maintenir la composition saline de la solution du sol proche de celle de l'eau d'irrigation surtout qui vienne de barrage (Dubost, 2002) en coordonnant avec le type des plantes cultivées qui devront être tolérantes aux sels comme celles indiquées dans le tableau des cultures tolérantes aux conditions extrêmes du milieu notamment la salinité (Ayers et Westcot, 1976). Tenant compte de la spécificité de la région de la plaine d'El-Outaya qui a une vocation céréalière en premier lieu, la tolérance des plantes cultivées vis-à-vis de la salinité varie largement en fonction de l'espèce, de la variété, du stade végétatif et des facteurs liés au milieu (Daoud et Halitim, 1994). Néanmoins l'historique de la région et le choix stratégique actuel et futur du pays doivent nous orienter vers des cultures du type céréalières, maraichères et fourragères. En fonction de la salinité des eaux d'irrigation utilisées, les agriculteurs peuvent pratiquer, en plus des céréales, autres cultures tolérantes aux sels comme : oignons, betteraves, navets, carthames, coriandre, laitue, artichaut, tomate, abricotier, olivier et figuier, afin de surmonter le problème binaire de salinité et perte d'eau d'un côté et diversifier, d'améliorer leurs revenus d'un autre côté, surtout que le sigle de l'organisme arabe de l'agriculture en 2016, afin de célébrer la journée arabe en agriculture chaque 27 septembre, est « la lutte contre les pertes de productions et la réduction des gaspillages alimentaire » qui passe obligatoirement par l'optimisation et la valorisation de mètre cube d'eau.

Il ressort de cette étude faite sur l'eau d'irrigation de la plaine d'El-Outaya, que soit l'eau d'irrigation de barrage de la « Fontaine de Gazelle » ou l'eau des forages exploitant la nappe

de Miopliocene, a une forte salinité avec un risque d'alcalinisation moyen à fort. Selon la (fig.62) de la carte de salinité réalisée des eaux, la conductivité électrique augmente du Nord vers le Sud selon le sens d'écoulement. (Voir chapitre précédent concerne l'étude hydrogéologique).

VI-4-Conclusion ; Etude et Comparaison globale entre les différentes eaux

Les facteurs principaux qui contrôlent la composition des eaux souterraines sont la nature lithologique des formations traversées, le temps de transit, la profondeur de la nappe et le développement du système karstique. En raison de la présence importante des évaporites, les eaux sont relativement chargées. La configuration hydrogéochimique des systèmes aquifères est compliquée par les origines hétérogènes ainsi que les mélanges des eaux. (Chabour, 2006).

Les échantillons prélevés dans différents régions d'étude montrent une évolution spatiale à l'échelle du bassin assez homogène pour chaque système. Les données recueillies et analysées concernant la salinité des eaux souterraines de la région des Ziban permet une classification régionale de la minéralisation des systèmes aquifères. Les variations spatiales de la minéralisation montrent une relative homogénéité au sein des différentes nappes et à l'échelle régionale. A titre d'exemple les eaux des forages de la nappe Miopliocene est plus variée, cela est confirmée par l'étude des eaux de cette nappe pour des régions différentes, les eaux de Sidi Okba ont des classes plus diversifiées que celle de la plaine d'El-Outaya pratiquement qui a une tendance à formuler des classes moins importantes. D'après l'interprétation des analyses chimiques des eaux de surface et des eaux souterraines nous pouvons dire que les ions dominants sont le plus souvent les chlorures et les sulfates parmi les anions et le sodium, calcium et le magnésium parmi les cations. Aussi nous pouvons dire que les eaux de la région étudiée présentent deux faciès suivant le sens de l'écoulement, chloruré et sulfaté calcique et magnésienne en amont avec une tendance à devenir chloruré sodique et potassique à l'aval de chaque région. Compte tenu de l'évaporation intense, les nappes phréatiques ou les dépressions chotteuses sont souvent hyper chlorurées sodiques (comme celle d'Ezarga). Concernant les autres nappes (Miopliocène de Sidi Okba et la plaine d'El-Outaya ou nappe de Tolga-nappe des calcaires), les teneurs dépassent largement la norme internationale conventionnée des eaux d'irrigation. D'une façon générale, les caractéristiques minérales des eaux de la région d'étude sont apparues globalement mauvais à médiocres avec des valeurs

non-conformes aux normes d'irrigation, notamment en ce qui concerne les nappes les plus exploitées (Nappes du complexe terminal).

Le calcul des indices de saturation des différentes eaux étudiées montre qu'elles sont saturées par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sont sous-saturées pour l'halite, le gypse et l'anhydrite, mais leur degré et état se différent de chaque régions d'étude selon la nature géologique du substratum de réservoir en question. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation, donc susceptibles de se dissoudre, et cela vu l'importance des formations évaporitiques dans les dépôts étudiés selon Chebbah(2007).

En effet, l'exploitation de deux barrages sur la région des Ziban ne se fait que pour l'irrigation des cultures ; qui restent insuffisantes d'où le recours aux eaux souterraines. La base de l'étude hydrochimique est la classification des eaux souterraines en faciès hydrochimiques. (Brinis, 2011). En basant sur l'analyse des études scientifiques et techniques entre autres (Achour 1990, Chabour, 2006, Brinis 2003et 2011, Rechachi 2010, ABHSahara 2006 ANRH 2008, CRSTRA, 2010), l'interprétation des analyses chimiques des eaux de surfaces et souterraines, nous pouvons dire que les ions dominants sont le plus souvent les chlorures et les sulfates parmi les anions et le sodium, calcium et le magnésium parmi les cations. Aussi nous pouvons dire que les eaux de la région étudiée présentent deux faciès suivant le sens de l'écoulement, chloruré et sulfaté calcique et magnésienne en amont avec une tendance à devenir chloruré sodique et potassique en aval. Compte tenu de l'évaporation intense, les nappes phréatiques sont souvent hyper chlorurées sodiques.

Les caractéristiques chimiques de l'eau ont un impact déterminant non seulement au niveau de la santé publique et de la potabilité de l'eau mais encore au niveau de certains secteurs, et en particulier l'agriculture qui consomme le plus d'eau au Sahara.

A l'horizon 2025, tous les secteurs vont doubler leurs besoins spécialement pour l'agriculture, ils passent de 757,281 Hm³ /an à 1854,601 Hm³ /an. Cette demande augmente avec l'accroissement de la population. La croissance des besoins en eau impose une gestion rationnelle de la ressource, un meilleur entretien des infrastructures existantes et une investigation pour éventuellement d'autres ressources.(Sedrati, 2011).

TROISIEME PARTIE : EVALUATION ET MODELISATION GEOCHIMIQUES DU CHANGEMENT DE LA QUALITE DES SOLS SOUS IRRIGATION DANS UNE ZONE ARIDE : CAS DE LA REGION DE ZIBAN: Sidi Okba, BBA et El-Outaya

Chapitre VII : Synthèse sur la caractérisation des ressources en sol de la région d'étude

Introduction

L'excellente définition du sol proposée par H. Jacques-Felix mérite d'être citée : le sol est la formation superficielle meuble et relativement stable du terrain, portant une certaine végétation ; il comporte une fraction minérale et une fraction organique ; il est le siège de phénomènes physico-chimiques d'équilibre et d'une activité biologique participant, en particulier, au cycle de l'azote. Cette définition sépare bien le sol, des autres formations qui relèvent de la géologie ou de la géographie dynamique. Tout déséquilibre important dans le rapport entre la matière organique et la matière minérale tend à situer les sols en cause hors des frontières que nous leur assignons. Ainsi, une tourbe, qui est une accumulation exclusive de matière organique ne se décomposant pas, et inversement, des sables désertiques dépourvus de matière organique, que le vent pousse comme les vagues de l'océan, occupent les deux extrémités d'une gamme où se situent les sols proprement dits dont la composition peut rester très diverses » .(Guinochet, 1973). Le sol est un composant essentiel des écosystèmes naturels et urbains, contribuant directement ou indirectement à la qualité générale de vie des habitants. Il joue un rôle principal dans les transformations biochimiques, le cycle des éléments, la filtration de l'eau, en soutenant les usines et les infrastructures, et de nombreuses activités récréatives. Le sol n'est pas seulement un réservoir géochimique des contaminants, mais aussi un tampon naturel pour le transport de matières chimiques et des éléments dans l'atmosphère, l'hydrosphère, et de la biomasse, et par conséquent, il est également l'élément le plus important de la biosphère. (Stroganova et al. 1997). En revanche, il est un milieu hétérogène résultant de l'action du climat, de la roche-mère, du relief, mais aussi des êtres vivants ; il subit, en particulier, une perpétuelle évolution due à l'activité des racines et des mouvements de l'eau. (Callot et al, 1982).

Les sols, par conséquent, constituent l'épiderme de la Terre. Ils sont d'une grande diversité, possèdent de multiples fonctions et sont le milieu de vie d'un grand nombre d'espèces vivantes. Les sols portent la végétation naturelle et permettent les productions agricoles, en offrant aux plantes un support physique, une réserve d'eau et une source d'éléments nutritifs pour assurer leur croissance. Ils contiennent une quantité énorme de micro-organismes, qui participent aux cycles des éléments (carbone, azote, soufre, etc.) et recyclent les composés chimiques, y compris ceux qui peuvent être nocifs pour la santé humaine. Les sols jouent un rôle essentiel dans le cycle de l'eau, en la stockant ou en la filtrant, tout en piégeant ou en libérant de nombreuses molécules dans l'eau. Enfin, ils sont le matériau sur lequel sont construits les bâtiments et les routes et dans lesquels nous entreposons ou recyclons les déchets solides ou liquides produits par nos activités. (Bardy et Jolivet, 2010).

Sols des régions arides sont principalement salés

La zone aride est caractérisée à la fois par son climat toujours peu pluvieux, et parfois sec, et très irrégulier, et par sa végétation herbacée ou frutescente, rarement arborée, très irrégulièrement répartie, et constituant un couvert excessivement lâche. Cependant, on constate que, en diverses parties du monde, les zones arides correspondent à de grandes dépressions et basses plaines aux pieds de chaînes montagneuses. Elles sont alors constituées par des dépôts de piedmont et cônes de déjection, et par les terrasses anciennes, récentes et actuelles ou de bas niveaux, des rivières qui en descendent. (Aubert, 1960) ; et on estime à l'heure actuelle qu'environ 40% des terres émergées de la planète sont arides, soit 5.2 milliards d'hectares, sur lesquelles vivent plus de 2 milliards de personnes. (Halitim, 2008).

Les sols des régions arides, supportant des conditions aussi sévères, présentent un certain nombre de caractères constants : évolution lente, profondeur souvent réduite, matière organique fortement évoluée, peu abondante et superficielle ou un peu plus abondante et répartie dans l'ensemble du profil, bien affectée par la salinité (Dellal et Halitim, 1992) ; structure faiblement définie en général ; éléments minéraux assez peu altérés ; colloïdes argileux stables ; éléments solubles concentrés en surface ou partiellement lessivés et accumulés, à un niveau ou un autre du profil, jusqu'à donner naissance à des nodules ou à des croûtes calcaires, gypseuses ou salées ; fréquence, au moins dans les sols des zones semi-arides, des phénomènes d'hydromorphie. Très souvent calcaires, ces sols sont aussi fréquemment salés. (Aubert, 1960).

L'Afrique contient 37 % de zones arides. En Algérie, ces dernières représentent près de 95 % du territoire national, dont 80 % dans le domaine hyper aride. (Halitim, 2008). Or, la formation et l'évolution des sols sont essentiellement conditionnées par le climat et la salinité. Faute d'humidité insuffisante, les processus fondamentaux de la transformation des roches mères comme l'hydrolyse, la dissolution, l'hydratation ou même l'oxydation sont réduits à leur plus simple expression. L'absence de végétation ou sa rareté font également que ces sols sont dépourvus de matière organique et d'humus. Ils sont pour toutes ces raisons sensibles à l'érosion, surtout éoliens. Il convient néanmoins de préciser qu'il n'en a pas toujours été ainsi et qu'il existe au Sahara des paléosols (Dutil, 1971) qui se sont constitués à des époques antérieures. (Dubost, 2002).

Selon (Toutain, 1977), on peut classer grossièrement les sols du Sahara en trois (03) groupes : les sols détritiques (regs, sols sablonneux et graveleux, dunes, ergs), les sols limino-argileux (terrasses des vallées, zones d'épandage des crues Maadar...) et les sols salés (nappes phréatiques salées, sebkha, chott). Selon Halitim (1988), les sels constituent les traits caractéristiques de ses sols et sont présents au sein de plusieurs phases :

- dans la phase liquide du sol : c'est le cas principalement des sels solubles et de la garniture ionique du complexe adsorbant.

- dans les phases salines solides représentées principalement par la calcite et le gypse.

Mais comme, la cartographie des sols de la zone aride de l'Algérie est à son début et moins de 1/20^{ème} seulement de la surface a été levé au 1/100.000, les sols sont, généralement, classés en fonction du niveau des sels dont on trouve :

- Les sols sans accumulation de sels
- Les sols calcaires
- Les sols gypseux
- Les sols calcaro-gypseux
- Les sols salés

Les terrains salés se rencontrent dans le monde entier :

- Le long des côtes basses à marées des cinq continents. Ce sont des sols sulfatés acides ou non ;
- Dans les parties mal drainées des régions méditerranéennes et arides, alimentées par des eaux ayant traversé des sédiments anciens salés, Trias par exemple. Ce sont des sols chlorurés sodiques, rarement alcalinisés ;

- Dans les sols bordant les régions volcaniques d'où viennent des eaux alcalines (plaines de l'Araxe en Arménie). Les sols formés sont dits carbonatés sodiques ou alcalins.

Les sols salés comprennent les solontchaks, les sols solontchakeux et les solonetz largement répandus dans la zone des steppes sèches et désertiques, on les rencontre aussi dans les zones steppiques, de forêt-steppe et de la forêt de la taïga. (Kaouritchev, 1980).

Selon (Dutil, 1971) ; les **Solontchaks** se développent lorsque l'eau intervient dans les milieux salins ou gypso-salins du désert, une nette différenciation des profils se produit : alors que la solution du sol ou de la nappe se concentre pour donner lieu à des cristallisations importantes, gypseuses dans le cas des nappes sulfatées-calciques, les sels les plus mobiles, de sodium principalement, viennent cristalliser à la surface. Quelques cas typiques sont les suivants :

1. **Les « fech-fech »** : sous ce terme, on désigne au Sahara, des formations sèches, meubles, sans cohésion, où le pied de l'homme ou du chameau et les pneus du véhicule s'enfoncent facilement où ils sont bien connus des camionneurs (Dubost, 2002). Il a déjà été indiqué que le terme était appliqué à une granulométrie de sable très fin répondant à des effets mécaniques comparables. Cependant, dans la plupart des cas, le terme de fech-fech paraît correspondre à la partie supérieure d'un sol salin, généralement solontchak moyennement développé et asséché. (Dutil, 1971).
2. **Les Solontchaks actuels** : de tels sols se développent en bordure des sebkhas ou des chotts et des palmeraies irriguées. En effet, au centre des sebkhas, les eaux collectées (ruissellement des eaux sauvages ou eaux de drainage) inondent les sols et les sels sont souvent dissous et recristallisés en période sèche : les solontchaks permanents n'existent donc que sur les rivages de ces exutoires (cas lac Ezarga-Bordj ben Azouz-voir après). De même, à l'intérieur des palmeraies, le solontchak n'a pas le temps de se former, étant soumis à une irrigation qui lessive les sels et les entraîne vers les fossés de drainage ; la remontée ne peut donc s'effectuer.
3. **Les HyperSolontchaks** : sont de peu d'importance pour l'agriculture, les phénomènes de salure peuvent être plus importants dans les secteurs où l'évapotranspiration joue d'une manière continue toute l'année, sans

submersion temporaire hivernale. Dans ce cas, les sels cristallisent régulièrement et continuellement : il se forme des croûtes salines de fortes épaisseur, pouvant atteindre 20 cm d'épaisseur et que l'on peut qualifier d'hyperSolontchaks.

Dans la légende F.A.O. les sols salés du Maghreb sont, pour la plupart, des Solontchaks. Ils peuvent être classés comme orthiques, gleyiques, ou parfois, takyriques. Les Solonetz y sont rarement représentés. Par contre, les phases salines et natriques y caractérisent des sols sur de grandes étendues. (Aubert, 1986).

Donc, les sols salés ont une grande extension en Algérie, dans les basses plaines et vallées d'Oranie, vallée de la Mina, près de Relizane par exemple, sur les hautes plaines au sud de Sétif et de Constantine, aux bords de certains chotts comme le Chott Melghir. Ils ont aussi une grande extension dans les régions Sahariennes au Sud de Biskra jusqu'à Touggourt, Ouargla et au-delà. Elle est due aux conditions arides ou semi arides d'une grande partie de ce pays où les possibilités d'évaporation sont considérables et les précipitations pluviales limitées; à la présence fréquente de dépôts géologiques salifères, par exemple du Trias, du miocène, du pliocène ou même du quaternaire...et de nappes phréatiques ou artésiennes salées; à la succession des événements, variations climatiques et phénomènes de sédimentation, au cours des Temps quaternaires. (Aubert, 1976).

VII-1- Classifications des sols salés :

Les sols salés sont des sols dont leur évolution est due à la présence excessive de sels solubles, c'est à dire ceux qui sont plus solubles que le gypse et/ou un fort taux de sodium échangeable. Ce qui leur confère des propriétés physiques, chimiques et biologiques défavorables (USSS.1954, CPCS. 1967). Les sols sont classés comme sols salés dès que leur teneur en sels solubles atteint 2 ‰ en sol sableux à 4 ‰ en sol argileux ou dès que la conductivité de l'extrait de la pâte saturée dépasse 4 micromhos par cm. (Aubert, 1960).

Dans ces **sols salés**, les sels solubles, le plus souvent, rencontrés sont des chlorures, des sulfates ou des bicarbonates, plus rarement on décèle des carbonates et des nitrates. Certaines portions de la couverture pédologique sont affectées par des cations dont le plus important, est de loin, le sodium, cations dont les sels sont très solubles, (les chlorures, les sulfates, les carbonates, plus rarement les nitrates et les borates). Donc, le cation le plus courant est le sodium, puis viennent par ordre décroissant le magnésium, le calcium et le potassium.

(Boulaine, 1978). Il existe dans chaque continent d'importantes surfaces de sols affectés par la salure sous la dominance de l'ion sodium ; se sont les **sols sodiques**. (Mathieu et Pieltain, 2003).

La présence des sels solubles dans les sols est en relation avec un ensemble de faits relatifs soit à l'origine de ces sels (roche- mère salée, nappe phréatique salée, eau d'irrigation salée, etc...), soit à l'absence d'évacuation de ces sels hors du sol (mauvais drainage, climat aride, mauvaise conduite des irrigations, remontée capillaire à partir d'une nappe, etc...). Ces sels solubles ont, sur les plantes et sur le sol, des actions néfastes qui sont de nature très différentes. (Boulaine, 1978).

L'analyse chimique des croûtes de sel, des horizons colmatés par le sel, des eaux de drainage, des eaux de lessivage ou des solutions des sols, permet de repérer les ions suivants :

- Constituants majeurs :- cations Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} - anions Cl^- , SO_4^{--}
- constituants mineurs :- cations : K^+ - anions : HCO_3^- , CO_3^- , NO_3^-

La classification des sols prend en considération le niveau de la salinisation globale et de la sodicité, ainsi que l'état de dégradation de la structure du sol et on reconnaît, en général, trois (3) catégories de sols salés (Aubert, 1986) :

▪ **Sols salés à structure non dégradée :**

- Sols salins ou « Solontchaks » : dont la salinité globale déterminée sur pâte saturée est supérieure à 4 mmhos/cm à 25°C (classification américaine) ou à 7 mmhos (CPCS, 1967) et l'ESP inférieur à 15% (classification américaine) et à 10 % (CPCS, 1967).
- Sols salins à alcali ou sols salins- sodiques ou Solontchaks- solonetz : dont la salinité globale est supérieure à 4 ou 7 mmhos/cm et l'ESP est supérieur à 10 ou 15%.

▪ **Sols salés à structure dégradée :**

- Sols à alcali ou sols sodiques ou solonetz : dont la salinité globale est inférieure à 4 ou 7 mmhos/cm, et l'ESP supérieur à 10 ou 15%. Leur pH est supérieur à 8,5.

VII-2- Paramètres de caractérisation des sols salés :

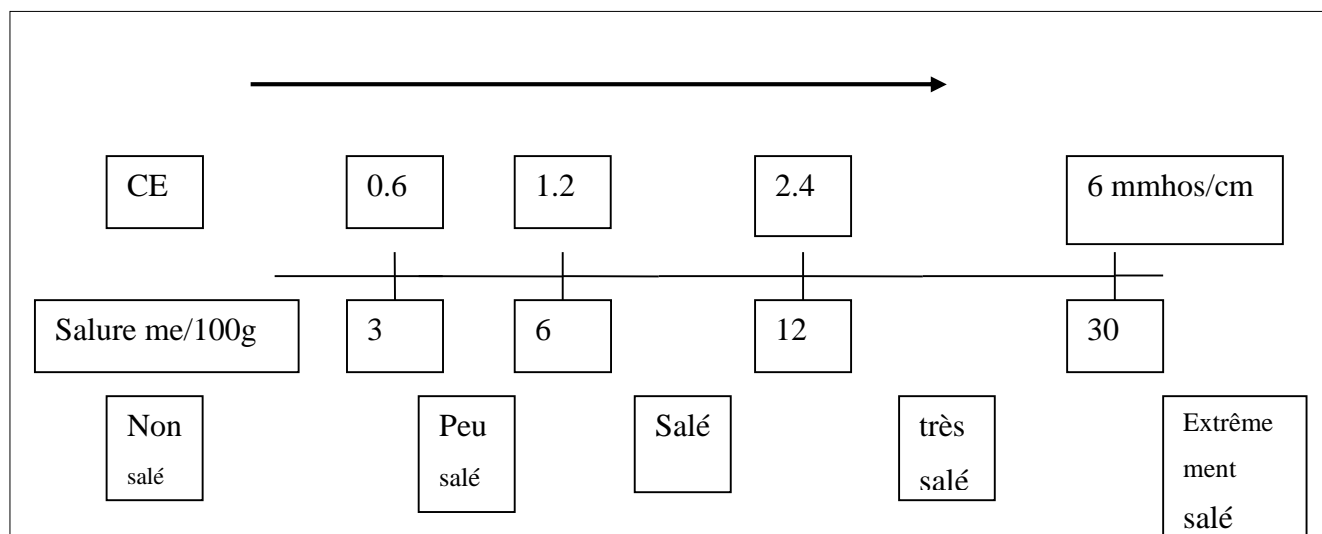
Tout sol qui renferme des sels solubles en quantité anormalement élevée est qualifié de « **salé** ». La mesure effectuée est celle de la salinité. Tout sol qui renferme du sodium échangeable en quantité anormalement élevée est qualifié de « **sodique** ». La mesure effectuée est celle de la sodicité. Ces déterminations font appel à des méthodes spécifiques. (Servant, 1975).

La conductivité électrique CE :

La conductivité électrique d'une solution est la conductance de cette solution mesurée entre des électrodes de 1 cm² de surface. Elle permet de déterminer la salinité globale de l'extrait de pâte saturée. Elle est exprimée en mhos/cm. Dans le cas des sols salés, elle est exprimée en mmhos/cm ou dS/m à 25°C. (Baize, 1988). De plus la connaissance de la conductivité est nécessaire pour l'étude du complexe absorbant des sols salés. (Aubert, 1978). Cette mesure est généralement réalisée sur pâte saturée (USSL, 1954), technique exigée pour la classification des sols. Cependant, quand il n'est possible d'obtenir une pâte saturée, comme dans les cas de sols très sableux, ou pour un suivi de la salinité d'un sol, ou enfin pour des mesures approximatives il est possible d'effectuer des mesures sur des extraits aqueux dilués au 1/5 ou 1/10. La conductivité permet d'obtenir rapidement une estimation de la teneur globale en sels dissous ; en plus la connaissance de la conductivité est nécessaire pour l'étude du complexe absorbant des sols salés. (Aubert, 1986).

Autrement dit, La conductivité électrique est la mesure primordiale utilisée pour définir la salinité du sol, elle croît avec les taux de sels ce qui simplifie l'interprétation des résultats. (Boulaine, 1978). L'échelle agronomique mise au point par l'U.S. Salinity Laboratory (U.S.S.L) est graduée selon les valeurs de la CE, de 0 à 16 mmhos/cm. Selon U.S.S.L (1954), un sol considéré salé lorsque la CE est supérieure à 4 mmhos/ cm. en revanche pour des auteurs français cette limite est discutable et doit être revue à la hausse (Durand, 1983).

Echelle de la salure déterminée à partir de l'extrait aqueux 1/5



Et Vis à vis des plantes, l'échelle utilisée pour l'interprétation des valeurs de la conductivité électrique est rapportée dans le tableau suivant :

Tableau51- Tableau d'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée à 25°C (USSSL, 1954).

Echelle Américaine	Non salé	Peu salé	Salé	Très salé	Extrêmement salé
CE mmhos/cm à 25°C	<2	2-4	4-8	8-16	>16
Réaction des cultures	Effets négligeables	Les récoltes des cultures très sensibles sont réduites	Les récoltes de nombreuses cultures sont réduites	Seules des cultures très tolérantes donnent des résultats	Seul un petit nombre de cultures donnent des récoltes

Tableau52- Tableau d'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol saturé 1/5 à 25°C (Aubert, 1986).

Type de salinité du sol	Echelle (rapport sol/eau 1/5) ($\mu\text{S}/\text{cm}$).
Sol non salin	CE < 2000

Sol légèrement salin	2000 < CE < 4000
Sol salin	4000 < CE < 8000
Sol très salin	CE > 8000

✚ La réaction du sol, le « pH » :

Le pH d'une solution est la quantité d'ions H⁺ libres qu'elle contient (Soltner, 1982).

$$\text{pH} = 1/\log (\text{H}^+)$$

Le pH se mesure sur une suspension de terre fine. (Aubert, 1978).

Le pH des sols salés dont la salinité est de type neutre c'est à dire quand elle est due à des sels de bases et d'acides forts (chlorures, sulfates, de sodium, de calcium, de magnésium), reste inférieur à 8,5 et le sol est basique.

Si la salinité est en revanche due à des sels de bases fortes et d'acides faibles, ce qui est le cas des bicarbonates ou des carbonates de sodium, le pH est au dessus de 8,5 et peut atteindre 10, et le sol est alcalin.

Le pH peut dépasser 10 après une précipitation du carbonate de calcium, les ségrégations salines sont fortement sodiques et renferment des sols alcalins (NaHCO₃, Na₂CO₃, Na₂SO₄). (Servant, 1975).

Un pH compris entre 8 et 9 est retenu, généralement, comme limite de la dégradation de la structure du sol. (Aubert, 1986).

✚ La composition ionique de la solution du sol.

Afin de connaître la concentration en anions solubles (Cl⁻, SO₄⁻ et HCO₃⁻) et en cations solubles (Na⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺), une analyse chimique est effectuée sur extrait de pâte saturée ou sur extrait aqueux dilué. Elle sert à classer le type de salinisation selon le diagramme de PIPER ou autre classification. C'est ainsi qu'on peut utiliser le rapport Cl⁻/SO₄⁻ pour classer les solutions du sol (Servant et Servat, 1966). Elle sert aussi à calculer le SAR (Sodium Adsorption ratio) qui exprime le pouvoir de sodisation de la solution du sol.

Tableau 53: Nature de la salinisation selon Cl⁻/ SO₄⁻.

Cl⁻/ SO₄⁻²	>5	Salinisation Chlorurée
	1-5	Salinisation Chlorurée-sulfatée
	0,2-1	Salinisation Sulfato-chlorurée
	<0,2	Salinisation sulfatée

🚧 Le SAR « Sodium Adsorption Ration »:

Dans l'étude de mécanisme de sodisation, l'Ecole de Riverside, au USA (1969) utilise un paramètre précis pour définir la composition des solutions du sol ou des nappes salées ; il s'agit de SAR « Sodium Adsorption Ration » (Mathieu et Pieltain, 2003).

Le SAR est calculé selon l'expression suivante :

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

(Na⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺), représentent les concentrations en milliéquivalents/litre dans La solution du sol ou dans l'eau d'irrigation).

Le SAR traduit le risque de sodisation ou d'alcalisation dû au sodium, de la solution du sol ou d'une eau d'irrigation. Quand la proportion en sodium est élevée par rapport aux cations Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺, le risque est élevé. Il donne des indications sur le risque d'alcalisation du milieu. Les risques sont faibles si SAR < 10, moyen si SAR est compris entre 10 et 18, élevés si SAR > 18 et très élevés si SAR > 26. (Mathieu et Pieltain, 2003).

🚧 Le taux de sodium échangeable (ESP) :

Il exprime le taux de saturation du complexe absorbant en sodium échangeable par rapport à tous autres cations échangeables. En effet, il exprime la sodicité. Or, le sodium échangeable peut détruire la structure à partir d'un seuil qui est souvent fixé à 15 % de la C.E.C. (USSSL, 1954), ou 10 % (CPCS, 1967), ou 5 % (l'école Australienne). (Abeche, 2001).

Plus l'ESP est élevé plus le sol est sodique et plus ses propriétés physiques (perméabilité, dispersion, stabilité structurale) sont défavorables.

$$ESP = 100 * Na^+ / CEC$$

Où Na^+ et CEC sont exprimés en meq/100g.

De nombreuses recherches ont essayé d'établir une relation entre le SAR et ESP, celle de l'USSL (1954) s'écrit de la façon suivante :

$$\text{ESP} = (100 * (-0.0126 + 0.0147 * \text{SAR})) / 1 + (-0.0126 + 0.0147 * \text{SAR}).$$

La relation entre le SAR et l'ESP

L'accumulation des sels dans la partie superficielle des sols n'est pas le seul risque qui fait courir à la fertilité des sols le phénomène général de salinisation. La fixation du cation sodium sur les argiles (processus de « sodisation ») constitue une autre facette du problème. Lorsque la quantité de sodium fixé est significative et que la concentration en électrolytes du milieu est faible, les argiles ont tendance à gonfler et à se disperser en présence d'eau. La conductivité hydraulique du sol diminue. On observe un colmatage de la porosité, une imperméabilisation du sol en surface, la formation de croûtes...etc. il peut en résulter l'apparition de phénomènes de ruissellement ou d'érosion. (Cheverry et Bourrié, 1998).

Ce phénomène a été fréquemment observé dans des périmètres irrigués salés dans lesquels l'objectif unique, pour des raisons d'économie, était de se « débarrasser » des sels en vue de diminuer le potentiel osmotique, sans veiller simultanément à éliminer le sodium échangeable. Mais on l'observe également dans de nombreuses régions du monde (Afrique centrale, Australie...) où la sodisation se développe sans que les sols n'aient jamais été fortement salés. Des pourcentages de 5 % de sodium sur le complexe adsorbant des sols peuvent suffire à provoquer certaines des dégradations physiques précédemment évoquées. (Cheverry et Bourrié, 1998).

Ceci met en jeu des phénomènes d'échange ionique sur les parois chargées négativement des argiles (Rieu et al. 1976) : une maîtrise satisfaisante des lois de la compétition sur les sites d'échange est donc ici nécessaire. De ce point de vue, les deux paramètres importants pour apprécier les risques de sodisation des sols irrigués sont le SAR (« sodium adsorption ratio ») des eaux d'irrigation ou de la solution du sol :

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ / (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2})^{1/2} \text{ (concentrations des ions en mmols/l)}$$

Et le pourcentage de sodium fixé sur le complexe adsorbant, E.S.P. :

$$\text{E.S.P.} = \text{Na}^+_{\text{ech}} / \text{C.E.C} \text{ (capacité d'échange cationique) (données en meq/l)}$$

Une relation empirique reliant ces deux grandeurs qui fut longtemps utilisée s'écrivait

$$ESP = 1.475 * SAR / (1 + 0.0147 * SAR)$$

Cette relation a souvent été améliorée depuis lors, en fonction des progrès de la géochimie (prise en compte de l'existence de paires d'ions...etc). Les formulations varient selon le contexte régional. La diminution de la conductivité hydraulique d'un sol est d'autant plus forte que le SAR est plus élevé et la concentration en sels est faible. Les points clefs pour approfondir l'étude de ces phénomènes sont d'abord la connaissance minéralogique fine des argiles. Dans le cas de sols sud-africains, que les sols riches en montmorillonite et en micas sont plus vulnérables à la dégradation physique que ceux riches en kaolinite et hématite. (Cheverry et Bourrié, 1998).

VII-3- Les enjeux de la salinisation des sols

Les sols productifs est de l'ordre de 6 % des sols de la planète, en Algérie, seulement 0.2 % des sols sont actuellement productifs. Au Sahara algérien, il ya 400 000 ha des sols irrigués, sur un million ha, seulement 10 % des sols sont productifs, les 90 % restés ne sont pas des sols agricoles, c'est pour cela les ressources en sol au Sahara sont limitées, ce qui nécessite en urgence une cartographie afin de faire ressortir les sites favorables à la mise en valeur. (Halitim, 2015, production orale). Sachant que, la stratégie actuelle de l'état algérien est d'augmenter la superficie agricole irriguée à 2 millions d'hectares, donc il faut faire une attention primordiale aux ressources en eaux et en sols. Sachant que le monde perd au moins trois(3) hectares de terre arable chaque minute à cause de la salinité du sol. La mise en valeur des sols salés pose un problème technique dont la solution ne peut être envisagée que par la mise en œuvre de l'irrigation et du drainage. Toutefois, l'utilisation intempestive des eaux d'irrigation salées ou non peut provoquer des salinisations secondaires. (Durand, 1983).

On estime que 6.5 % des terres du globe, soit 9 millions de km², sont déjà affectés par ce phénomène, ce pourcentage passant à 39 % dans les zones arides (Qigou, 1994 in Cheverry et Bourrié, 1998). Ce phénomène de salinisation des sols touche d'abord les régions arides. L'évapotranspiration y est en effet beaucoup plus forte que les précipitations(pluies) pendant une bonne partie de l'année ; les eaux du sol remontent alors par capillarité et déposent dans la partie superficielle des sols, sous forme de cristaux, les sels qu'elles contenaient jusque là en solution. (Cheverry et Bourrié, 1998).

Mais on peut observer des phénomènes de salinisation dans tous les continents, dans toutes les ceintures climatiques du globe, y compris à l'intérieur du cercle polaire (Szabolcs, 1994) et à toutes les altitudes, que l'on soit sous le niveau de la mer (région de la Mer Morte) ou à 5000 mètres d'altitude (plateau tibétain). Même un pays de climat tempéré comme la France est concerné. La Camargue et les marais de l'ouest de la France (marais charentais, vendéen, poitevin : 300 000 hectares au total) ont subi l'influence des eaux de mer. Les risques d'une dégradation des sols liée à une salinisation résiduelle y sont réels. (Cheverry et Bourrié, 1998).

On doit enfin souligner que le problème de la salinisation est d'autant plus grave que les plantes cultivées ne sont pas les seules menacées. Les microorganismes, les invertébrés, les vertébrés et l'homme lui-même peuvent réagir à un environnement de sols et d'eaux trop salés et cette adaptation peut entraîner une profonde modification de la chaîne alimentaire (Miyamoto, 1994 in Cheverry et Bourrié, 1998).

Tableau54 : Le développement des superficies irriguées dans le monde depuis 1800(d'après Szabolcs, 1994).

Superficies irriguées dans le Monde	
Année	Superficies irriguées (millions d'hectares)
1800	8
1900	48
1949	92
1959	149
1980	230
1990	265

VII-4- Interaction sol- eau d'irrigation : salinisation secondaire

Pour l'irrigation, le sol est la partie meuble de la surface de l'écorce terrestre susceptible d'être irriguée et de produire des récoltes ; cette définition pratique permet de considérer le sol soit un milieu de culture, soit comme le simple support des plantes cultivées. (Durand, 1983). L'eau d'irrigation par sa composition peut avoir une influence sur le sol, car dans les

régions arides la qualité des sols sont étroitement liée à la qualité de l'eau d'irrigation (Halilat, 1998 in Omouri, 2009).

✚ Les conséquences de la salinisation

La première conséquence tient à la modification du potentiel osmotique de la solution du sol lorsque la teneur en sels croît. La conductivité électrique (C.E) de cette solution, mesurée à l'aide d'un pont de résistances ou d'électrodes est reliée à la charge solide dissoute (C.T.D.) par des relations empiriques du type :

$$\text{C.T.D. (mg/l)} = 0.64 * \text{C.E (mS/cm)} \text{ (USSalinity Laboratory, 1954).}$$

La relation avec le potentiel osmotique peut s'estimer par :

$$\pi \text{ (bar)} = -0.36 * \text{EC (mS/cm)} \text{ (USSalinity Laboratory, 1954).}$$

La plupart des plantes sont certes capable d'une certaine régulation de leur potentiel osmotique interne en fonction de celui du milieu extérieur, mais cette régulation, d'ailleurs très variable selon les plantes où les plantes halophytes, sont privilégiées de ce point de vue, ont des limites. La **première conséquence** de la salinisation est donc de risquer de priver d'eau des plantes, la diminution de rendement en fonction de la salinité dépend de la tolérance de la plante considérée au sel. (Cheverry et Bourrié, 1998), car une trop forte quantité de sel dans le sol va-t-elle avoir un effet défavorable sur les plantes et sur le sol lui-même. Le sel empêche les plantes de s'alimenter normalement en eau même lorsque le sol est bien arrosé. A partir d'une certaine quantité, le sel a, selon la plante, un effet toxique direct sur celle-ci. Le rendement est très vite affecté et peut baisser jusqu'à plus de 80 %. (Mathieu et Pieltain, 2003).

La **deuxième conséquence** tient au rôle spécifique de certains ions qui s'accumulent lorsque le phénomène de salinisation se développe. Certains arbres fruitiers peuvent par exemple être sensibles à l'accumulation de chlorures ou de sodium. Dans d'autres cas l'accumulation excessive de sodium provoque indirectement des carences en calcium et magnésium-effet antagonisme (tomates, celeri,...). Ce point a fait l'objet de nombreuses études depuis Bernstein(1975). Les recherches récentes mettent l'accent sur l'accumulation d'éléments de transition (B, Se, As) ou de métaux lourds (Cd, Hg,...) qui peuvent parfois « accompagner » les ions majeurs (Na, Ca, Mg, HCO₃, Cl, SO₄) lors de l'accumulation saline. Le cas du bore est souvent évoqué, car dans le sol la marge entre les concentrations qui provoquent des

phénomènes de carence chez la plante et celles qui entraînent une toxicité est étroite pour beaucoup de cultures. (Cheverry et Bourrié, 1998).

La **troisième conséquence** tient aux changements du pH du sol qui peuvent parfois survenir suite au phénomène de salinisation. Deux cas spectaculaires se présentent : Le premier est celui de la forte augmentation du pH que l'on observe lorsque les sels qui s'accumulent sont des Bicarbonates ou carbonates de sodium (processus d' « alcalinisation ») (Valles et al. 1983). Le pH du sol peut atteindre des valeurs de 9 à 10. La matière organique du sol est solubilisée et on parle de sols à « salant noir » (Bertrand et al, 1994). La fertilité de ces sols est alors très fortement réduite car de nombreux d'éléments indispensables à la plante sont totalement insolubilisé à ce pH. (Cheverry et Bourrié, 1998). Un cas inverse est celui des sols sulfatés acides, dont le pH peut descendre à des valeurs de 2 à 4. Les mangroves aménagées par un drainage mal contrôlé ont souvent donné lieu à de tels phénomènes, car les sulfures qui s'étaient accumulés à faible profondeur dans les sédiments ont été trop brutalement réoxydés, libérant ainsi de l'acide sulfurique. Si le sol ne contient pas initialement de fortes réserves en CaCO₃, l'acidification survient inéluctablement et le sol est stérilisé (toxicité aluminique,...etc.). Le tableau 55 résume les grands types chimiques de sols salés du monde et leurs conséquences sur la fertilité. (Cheverry et Bourrié, 1998).

Tableau 55 : Les grandes catégories de sols salés.

Les grandes catégories de sols salés				
Types de sols affectés par les sels	Electrolytes causant la salinité ou l'alcalinité	environnement	Propriétés affectant le milieu vivant	Méthode de lutte
salins	Chlorure et sulfate de sodium	Aride et semi-aride	Valeur élevée de la pression osmotique de la solution du sol, effet toxique des chlorures.	Lessivage des sels en excès
alcalins	Ions sodium	Semi-aride, semi-humide et humide	pH élevé, mauvaises conditions physiques déficience en calcium	Abaissement ou neutralisation des pH élevés par des amendements chimiques
magnésiens	Ions magnésium	Semi-aride et semi-humide	Effet toxique, pression osmotique élevée ; déficience en calcium	Amendements chimiques ; lessivage
gypseux	Ions calcium	Semi-aride et aride	pH bas ; déficience en certains éléments	Amendements

	(surtout CaSO4)		nutritifs	alcalins
Sulfatés-acides	Ions ferriques et aluminiques (principalement des sulfates)	Bordures littorales et lagons	Acidité élevée, effet toxique de l'aluminium ; déficience en certains éléments nutritifs	chaulage

VII-5- Les solutions de la salinisation :

L'accumulation excessive de sels dans les sols : un phénomène souvent lié à un mauvais contrôle du bilan des eaux d'irrigation et des sels. Donc, La salinisation secondaire résulte souvent d'une mauvaise gestion du bilan de l'eau et des sels à l'échelle de la parcelle. Les équations générales relatives au bilan des sels eux-mêmes peuvent s'écrire (à l'échelle d'une parcelle ou d'un périmètre irrigué, et pour l'unité de temps choisie) :

$$Sp+Si+Sr+Sd+Sf=Sdw+Sc+Sppt$$

Avec :

Sp : quantité de sels dans les précipitations (pluies) tombant sur la superficie considérée.

Si : quantité de sels contenus dans les eaux d'irrigation.

Sr : variation de la quantité de sels solubles présents dans la solution du sol entre le début et la fin de la période considérée.

Sd : quantité de sels dissous à partir de l'altération des minéraux, ou libérés par désorption (peut être négatif si les phénomènes de sorption l'emportent).

Sf : quantité de sels contenus dans les fertilisants apportés.

Sdw : quantités des sels évacués hors du périmètre par les eaux du drainage.

Sc : quantité de sels exportés par les récoltes.

Sppt : quantité de sels qui ont précipité sous une forme très peu soluble (CaCO₃,...).

Si le sol est trop riche en sels pour que les plantes s'alimentent correctement en eau, on élimine par lixiviation les sels en excès dans la zone prospectée par les racines jusqu'à ce que la concentration en sels de la solution du sol dans cette zone soit redescendue au-dessous d'une valeur seuil initialement fixée. On peut ensuite poursuivre l'irrigation en visant un régime d'équilibre. Dans cette gestion, le concept de « fraction du lessivage », dont le

symbole LF est emprunté à la langue anglaise (« leaching fraction »), joue un rôle clef. (Cheverry et Bourrié, 1998).

$$LF = Dd/Di = (Di - ET)/ET$$

Di et Dd étant les hauteurs respectives, par unité de surface et pour un temps donné, des eaux d'irrigation et de drainage et ET l'évapotranspiration.

Donc la Distribution de l'eau d'irrigation et ses effets sur le sol nécessite la maîtrise du drainage et le bilan des sels.

VII-6- Aperçus sur les sols de l'Algérie

Avant de donner les caractéristiques propres des sols de la région d'étude, nous donnerons les éléments essentiels des sols des régions arides ainsi que les éléments de leur caractérisation.

VII-6-1- Les principales caractéristiques des sols et leur détermination

Ces caractéristiques ayant une influence sur l'une ou l'autre, déjà citées entre autres au dessus.

- Granulométrie des sols
- Calcaire
- Salinité
- Complexe absorbant-pH
- Matières organiques
- Les éléments nutritifs
- Nature minéralogique de l'argile
- Les propriétés physiques des sols et leur détermination

VII-6-2- Les sols salés observés en Algérie

Selon Aubert (1960), en Afrique du Nord, la zone aride s'étend non seulement en bordure du Sahara mais aussi au Nord de l'Atlas et sur les hauts plateaux. Dans cette dernière région, sols bruns et sols à croûtes calcaires, fossile le plus souvent, alternent avec des sols alluviaux récents, parfois hydromorphe au milieu desquels se trouvent des sols salés, sols salins et sols salés à alcalis (Solontchaks) ; ces derniers s'observent plus en Algérie et en Tunisie qu'au Maroc. Au sud de l'Atlas et en bordure du désert, les mêmes types de sols se retrouvent, mais

les sols salés sont alors très abondant et comprennent aussi les sols à croûtes salées des bordures des chotts ; les sols à croûtes gypseuse s'y développent très largement. Aujourd'hui, l'hétérogénéité des sols et biodiversité se nourrissent l'une de l'autre. (Bourrié, 2008).

VII-6-3-Les conditions pédogénétiques des sols désertiques

Selon Dutil (1971), l'étude du milieu saharien vient de permettre de mieux apprécier les conditions pédogénétiques. Il apparaît ainsi que les facteurs essentiels de formation du sol dans ce milieu hyperaride sont sous la dépendance du climat, avec ses deux composantes principales :

- Le vent agissant partout dans le désert,
- L'eau par son absence sur l'ensemble des grandes unités du désert ou sa présence naturelle dans les points bas servant d'exutoire normal du ruissellement ou artificielle dans le cas de l'irrigation.

L'action du vent, très complexe dans le détail de ses mécanismes, se traduit globalement de la manière suivante :

- Le vent enlève les matériaux fins en certains secteurs du paysage,
- Et une accumulation s'effectue parallèlement en d'autres secteurs.

Cette représentation introduit ainsi les phénomènes d'ablation d'une part et d'accumulation ou d'apport d'autre part, déjà observés en zone saharienne (Durand, 1953, 1954 et le Houerou, 1959). Aussi, l'un des traits marquants de la pédogenèse actuelle sera conditionnée par l'action du vent et formant **les sols minéraux bruts**.

Ensuite intervient l'action de l'eau ; si cette dernière est rare ou très rare sur l'ensemble du désert, il a déjà été souligné que lorsqu'il pleut il existe un ruissellement intense et rapide ; dans ce cas, il peut y avoir également ablation, mais aussi accumulation d'eau et de son débit solide avec localisation dans les points bas naturels ; il s'effectue alors une pédogenèse d'apport, accompagnée d'une légère évolution due à la présence plus fréquente d'eau. Dès lors, deux voies s'ouvrent à la pédogenèse :

- Si le substrat est perméable, les eaux s'infiltrent rapidement et l'évolution pédologique reste faible, d'où la présence de **sols peu évolués**.

- Par contre, si le substrat est peu perméable, l'évolution pédologique est orientée obligatoirement vers les **phénomènes de salure**, et généralement d'une manière accentuée par suite des conditions d'évaporation intense.

Le rôle de l'eau, lié d'une part à la salure initiale et, d'autre part, à la perméabilité du substrat, conditionne ainsi toute l'évolution que l'on peut atteindre sous ce climat ; cette évolution sera ainsi ;

- Limitée au stade des **sols peu évolués**,
- Ou bien orientée vers les **sols halomorphes**.

Donc, la présentation des sols désertiques actuels, effectuée dans le cadre de la classification française (C.P.C.S. 1963-1967-1970) comprendra ainsi les sols regroupées dans les trois classes suivantes :

- 1. Sols minéraux bruts ;**
- 2. Sols peu évolués ;**
- 3. Sols halomorphes.**

Potentialités agricoles des Ziban

La wilaya de Biskra (Ziban) est une région agricole pionnière grâce à ses richesses en ressources hydriques, édaphiques et biologiques. Elle est caractérisée par ses fortes potentialités phoenicoles (près de 5 millions des palmiers dattiers du total de 18.6 millions du palmiers où représentent la production en dattes de 11 wilayas hors Biskra avec des qualités appréciables) constitue l'axe principale de l'agriculture oasisienne, sous forme de oasis avec une polyculture en étage (palmier dattier-arboriculture-culture herbacée (céréale ou maraichère) et des périmètres irrigués spécialisés surtout dans la serriculture et la céréaliculture (orge, blé, avoine et maïs).

La superficie totale de la wilaya de Biskra (ST) est de **2 150 980 ha** où la surface agricole totale (SAT) est de **1 652 751 ha** traduit un pourcentage assez élevé (**77 %**) de ST, dont **185 473 ha** représentent la surface agricole utile SAU (**11 %**) de la (SAT). On enregistre **103990.80 ha (56.07% de la SAU)** des terres irriguées principalement par les eaux souterraines. (Statistique de 2013/2014).

Tableau 56 : Distribution générale des terres agricoles de la wilaya de Biskra de la campagne agricole 2012-2013.

Terres agricoles	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
Surface agricole utile(SAU)	185 473	11.22
SAU irriguées	100 680	54.28
Terres pastorales et délaissées	1 399 746	65.07
Terres non productives destinées pour l'agriculture	67 532	4.09
Somme des terres utilisées pour l'agriculture	1 652 751	76.84
Forêts	97 780	4.55
Halfa	13 864	0.64
Somme des forêts	111 644	5.19
Terres non productives et non destinées pour l'agriculture	386 586	17.97
Superficie totale de la wilaya	2 150 980	100

Source (direction des services agricoles, 2013).

Relation sol- plante, Plantes et écologie des sols salés

C'est précisément l'irrégularité et la rareté des pluies qui font les régions arides et les déserts. (Guilloteau, 1957). L'indice de salinité du sol est la présence d'une croûte blanche à la surface du sol. Cependant. Ce signe peut ne pas être une indication de la salinité car les sols non salins qui contiennent du gypse présentent également des croûtes blanches. Il n'est pas toujours possible de terminer par inspection visuelle si un champ contient trop de sel. Un meilleur système consiste à analyser les sols suspects. La croissance des plantes cultivées sur sols salins est généralement médiocre et éparse parce que le sel retarde ou empêche la germination des semences. Si les semences ne donnent pas des germes ; les jeunes plants ne tardent pas à mourir. Il se produit alors des plaques irrégulières dénudées dans le champ. Le peuplement est médiocre et épars. Ainsi que ces plaques nues et irrégulières sont généralement entourées par des zones de croissance inégale. Selon Dubost(1994,2002), à

partir de 40 pour mille de Na^+ , les terres sont dépourvues de végétation et deviennent rapidement abiotiques. Selon Halitim(1988), en fonction d'un gradient de salinité croissante, il apparaît des espèces ou groupements végétaux azonaux : *Atriplex halimus*, *Salsola tetendra*, *Sueda fructosa*, *Salicornia arabica*, *Sueda vermiculata*, *Tamarix*, etc,...

Sans eau dans le sol, les minéraux ne peuvent passer en solution. Or, c'est sous forme de solutions seulement qu'ils peuvent être absorbés par les racines des plantes et concourir au développement de la végétation. Les microorganismes, eux-mêmes, dont l'activité confère au sol, vie et fertilité, ne peuvent se développer qu'en présence d'une certaine humidité. (Guilloteau, 1957). En revanche, elles (micro-organismes) ne résistent pas à un tel taux de salinité. (Dellal et Halitim, 1992 ; Dubost, 2002). Au Sahara, lorsque les conditions deviennent favorables, on peut alors constater un développement rapide de végétation en un ou deux mois, végétation qui disparaîtra rapidement avec la sécheresse et, quelques mois plus tard, il n'en restera plus rien ; en effet, les graines qui ont pu arriver à maturité seront disséminées pourront engendrer à nouveau de nouvelles plantes, lorsque les conditions favorables réapparaîtront. (Dutil, 1971).

Donc, les principaux signes de la salinité des sols sont :

- ✓ Croissance irrégulière des cultures et manque de vigueur des plantes ;
- ✓ Apparition d'une croûte blanchâtre en surface ;
- ✓ Apparition des plantes halophytes ou des mauvaises herbes tolérantes aux sels comme : *Spergularia salina*, *Atriplex halimus*, *Sueda fructicosa*, *Salicornia fructicosa*.

D'après l'étude réalisée par Novikoff(1961) en Tunisie, la relation entre le sol et la végétation halophile est comme suit :

-*Halocneumum stobilaceum* de la famille Chénopodiacée, source de Potasse, est indicatrice de forte salinité (70à 90 dS/m), on a trouvé cette plante au niveau de Bir Attia près de lac Ezarga dans la région BBA (BBA-Bir Attia- Ezarga-oued Djedi).

Drainage principal (Ghadar)→ Ezarga → Lioua-Shaira → oued Djedi

-*Salicornia arabica* reflète une forte hydromorphie et une salinité moyenne à forte (20à 60 dS/m).

-*Atriplex halimus*, se rencontre en faible hydromorphie et en salinité variable (10à 70 dS/m).

Dans la région de bordj ben Azouz, on a vu des mauvaises herbes (diss : *Imperata cylindrica* ; *Juncus maritimus*+ n'jam : *Cynodon dactylon*)= plantes indicatrices de la salinité.

Par définition sebkha ne développe aucune végétation (Sueda : → khrach → Salsola Atriplex).

De nombreux travaux ont été consacrés à la flore du milieu saharien (désert) pour ses différentes régions (R.Maire, 1922 à 1936, 1933, 1940, 1943,1945 ; P.Quezel, 1954 ; P.Ozenda et P.Quezel, 1956 ; Cl.Leredde, 1957 ; Ozenda, 1958, Pouget 1980...). Les caractéristiques principales en sont les suivantes :

-La flore du désert est relativement pauvre, environ un millier d'espèces spécifiques, c'est-à-dire en excluant les espèces adventices et les pénétrations steppiques.

-La végétation est très claire semée, avec peu d'individus par unité du paysage,

-Il n'existe pas de groupes systématiques caractéristiques au dessus du genre, mais de nombreuses associations caractéristiques de chaque milieu,

-Enfin, l'origine de cette flore présente un grand intérêt relatif à l'histoire du désert. (Dutil, 1971).

En effet, la végétation existe à peu près partout, mais reste surtout concentrée dans les secteurs où l'eau s'accumule ou passer d'une manière assez régulière (Pouget, 1980). La vigueur des sujets dépend essentiellement des réserves en eau du sol. Aussi n'est-il pas surprenant de voir, aux abords des oasis, une végétation abondante, généralement Halophyte, installée sur les sols où s'est développée une nappe phréatique (cas de BBA).On peut la schématiser comme suit, (voir planche photographique de BBA en annexe) :

Atriplex → **Salsola** → **Sueda+ Salsola (moins présente que le Sueda**
→ **Sueda** → **Salicornia** → **Sol nu (sebkha).**

✚ **Quelques associations caractéristiques du milieu saharien:**

Pour la partie septentrionale, les résultats de la définition des associations principales, basée sur des nouvelles données apportées par (P ;Quezel, P.Simonneau,P.Dutil et J.Kilian, 1961, 1963), sont les suivants (Dutil, 1971).

1. **Végétation des sables limoneux calcaires** : c'est le cas des alluvions récentes des oueds issus de l'Atlas et rejoignant les chotts du Bas-Sahara et des petites daïas de cette région, caractérisée par l'association à *Brochia cenerea* et *Launaea resedifelia*.
2. **Végétation des sols salins et gypso-salins** : les sols salins et gypso-salins occupent de vastes surfaces dans le bas-Sahara : Souf, vallée de l'oued Rhir, environs d'Ouargla et d'El-Goléa, Touat, Gourara, Tidikelt, et les degrés de salure varient énormément. Une végétation paraît spécifique de ces divers degrés de salure et a permis l'identification de plusieurs associations :

- Association strictement halophiles :

1. **Association à *Halocnemum strobilaceum*** qui caractérise la bordure immédiate des chotts (cas Ezarga BBA), toujours humide en hiver, asséchée en surface en été, sur des sols salins de types Solontchaks ou hyperSolontchaks ; cette association constitue le groupement dont la tolérance au sel est la plus grande, et la pénétration maximum de la végétation sur les sebkhas ;
2. **Association à *Arthrocnemum indicum*** qui colonise les bordures des chotts, dans des zones humide en hiver, desséchées en surface en été, toujours à très forte salure et fait suite immédiate à la précédente ;
3. **Association à *Salicornia arabica* et *Phragmites communis* var ; *pungens*** caractérisent les zones toujours humides des bordures de palmeraie, à salure élevée (Cas des drains principaux au niveau de la palmeraie de Khaled Laejal BBA voir photo).
4. **Association à *Sueda fruticosa* var. *longifolia* et *Limonium delicatulum*** caractérisant les palmeraies correctement drainées de BBA, de l'oued Rhir ; ce groupement remplace d'ailleurs le précédent dans le cas d'une amélioration de drainage ou création de nouvelles palmeraies, et apparaît ainsi comme le résultat de l'action anthropique sur un milieu initial à Salicornes (Cas –type de BBA) ;

- Association sub-halophiles et gypsophiles :

1. Association à *Salsola sieberi* var. *zygophylla* et *Zygophyllum cornutum*, toujours installée sur des Solontchaks, mais à caractère gypso-salin ;
2. Association à *Zygophyllum geslini* et *Salsola tetragons*, dans des sols à salure toujours élevée (20 à 40%), mais également gypseux (10 à 40 % de gypse cas des oasis d'Oumeche), cette association présente diverses variations dans le cortège associé en fonction des conditions pédologiques de surfaces ; faible recouvrement du sable introduisant des espèces psamophiles ou substrat calcaro-gypseux ou gypseux, auquel cas une **sous association** à *Oudneya africana* et *Randonia africana* se manifeste ;
3. Association à *Salsola vermiculata* et *Salsola foetida* caractéristique de substrat gypseux et salins, avec faible recouvrement sableux.

La végétation naturelle halophyte la plus répandue dans **la région de Sidi okba**, selon notre investigation sur le terrain, est représentée par les familles : **Plumbagenaceae** (*Limoniastrum guyonianum* : Zeita (photo 05)), **Chénopodiaceae** (*Atriplex halimus*, *Sueda mollis*, *Chenopodium murale*) **Brassicaceae/crucifère** (*Pseuderucaria peritifolia*, *moricandia arvensis*), **Astéraceae** (*Picris albida*, *Calendula aegyptiaca*, *Sonchus asper*, *Silybum marianum*), **Aizoaceae** (*Aizoon hispanicum*), **Apiaceae** (*Docus carotta*) , **Tamaricaceae** (*Tamarix sp.*).

La plaine d'El-Outaya (la grande plaine) est largement tournée vers l'agriculture. Elle a porté jadis plus de 100 fermes romaines dont on voit encore les ruines. L'oasis d'El Outaya est, donc, d'origine romaine (ce serait l'ancienne Mesar Felta); placée sur la route de tous les envahisseurs qui se dirigeaient du Sahara vers le Tell, elle a toujours subi le contre-coup des bouleversements qui agitent cette région. En 1831 les Ben Ganah détruisirent entièrement l'oasis et le pays fut abandonné. Un seul palmier s'y trouvait lorsque le duc d'Aumale y passa en 1844. Ce n'est qu'en 1858 que les plantations de palmiers aujourd'hui existantes furent créées. (Zerdoum, 2003 ; Brinis, 2011).

La végétation en tant que facteur de pédogénèse est directement liée à l'aridité du climat de la région. Caractérisée par une végétation de steppe qui forme un degré de couverture assez faible.

L'oasis d'El Outaya est peu importante au point de vue de la culture des palmiers; la plus grande partie de l'eau est utilisée pour la culture des céréales qui se fait sur une grande échelle dans toute la plaine. (Brinis, 2011). La végétation intervient aussi très largement mais un fait essentiel est la faiblesse et l'irrégularité des pluies et leur caractère concentré dans le temps.

Le sol ne reste humide que peu de temps et son évolution biologique est donc très limitée chaque année.

La végétation actuelle de la région est le résultat des interactions de trois facteurs essentiels : climat, sol, action anthropique. Le paysage halomorphe de la plaine est occupé par des végétations naturelles de type halophytes. Parmi les espèces herbacées et arbustives qu'on peut rencontrer, on citera selon les travaux des chercheurs du CRSTRA ainsi que notre enquête sur le terrain:

- *Atriplex halimus*
- *Aristida pungens*
- *Anabasis articulata*
- *Diploxis sp.*
- *Erodium glaucophyllum*
- *Frankinia pallida*
- *Limonium pruinosa*
- *Launea micronata*
- *Limonostrium gryonianium(zeita)*
- *Plantago albicans*
- *Salsola sp*
- *Salsola vermiculata*
- *Sonchus oleraceus*
- *Sueda mollis*
- *Schismus barbatus*
- *Tamarix articulata*
- *Trigonella stellata*
- *Zygophyllum album*



Photo05 : Plante indicatrice des sols limoneux et salés zeita (*Limoniastrum guyonianum*) dans la région de Sidi- Okba (Safel Tajdid) (Auteur, 2015).

VII-7-Conclusion

Les sols constituent l'épiderme de la Terre. Ils sont d'une grande diversité, possèdent de multiples fonctions et sont le milieu de vie d'un grand nombre d'espèces vivantes. Les sols portent la végétation naturelle et permettent les productions agricoles, en offrant aux plantes un support physique, une réserve d'eau et une source d'éléments nutritifs pour assurer leur croissance.

Les sols des régions arides, supportant des conditions aussi sévères, présentent un certain nombre de caractères constants : évolution lente, profondeur souvent réduite, matière organique fortement évoluée, peu abondante et superficielle ou un peu plus abondante et répartie dans l'ensemble du profil ; structure faiblement définie en général ; éléments minéraux assez peu altérés ; colloïdes argileux stables ; éléments solubles concentrés en surface ou partiellement lessivés et accumulés, à un niveau ou un autre du profil, jusqu'à donner naissance à des nodules ou à des croûtes calcaires, gypseuses ou salées ; fréquence, au moins dans les sols des zones semi-arides, des phénomènes d'hydromorphie. Très souvent calcaires, ces sols sont aussi fréquemment salés.

A travers cette synthèse, nous avons pu donner un aperçu non exhaustif sur la genèse des sols de la région d'étude et leurs caractéristiques morphologiques et analytiques qui restent tributaire aux facteurs du milieu dans lequel se sont formés. Les sols sont généralement caractérisés par la présence combinée des sels solubles, du gypse et du calcaire. La formation de ces sols est sujette à trois facteurs qui sont l'aridité du climat (faible précipitation et forte évaporation) qui exclue tout lessivage, des fortes crues et des récurrences d'inondation maintiennent les sols à un état de faible développement et font des sols au faciès peu évolué. La présence du Trias et des autres formations géologiques (helvétique et tortonnaise) sont à l'origine de la richesse des matériaux originels (alluvions et colluvions) en sels solubles, gypse et calcaire. La position topographique a joué un rôle dans la dynamique de ces éléments et les dépôts des sédiments provenant des crues successives.

La mise en valeur des sols salés pose un problème technique dont la solution ne peut être envisagée que par la mise en œuvre de l'irrigation et du drainage. Toutefois, l'utilisation intempestive d'eau d'irrigation salée ou non peut provoquer des salinisations secondaires.

Chapitre VIII : Caractérisation et qualité des sols soumis à l'irrigation

Introduction et rappel

La plupart des études montrent que les sols du Sahara sont étroitement liés à la géomorphologie et la géologie du substratum de chaque région. (Aidaoui, 1994). Les qualités que l'on doit rechercher pour des terres à irriguer dépendent de celles des eaux à utiliser et des quantités disponibles. Des terres sableuses nécessitent des débits très importants mais peuvent recevoir des eaux très minéralisées, comme celles utilisées dans le sud de Tunisie qui dépassent 5 g/l. en sens inverse, les masses d'eau nécessaires sont plus réduits sur des terres lourdes, mais celles doivent être de bonne qualité et leur drainages. En général, naturellement insuffisant, doit alors être artificiellement améliorée. Là, se trouve l'une des limites pratiques de la mise en valeur des terres lourdes des zones arides. (Aubert, 1960).

Selon le rapport agropédologique (ANAT 2003), Les sols d'oasis constituent un groupe particulier, qu'il est difficile de rattacher à la classification générale des sols. Dans cette optique, il a été jugé judicieux de faire un parallèle entre la classification des sols de CPCS (édition Française de 1976) et celle utilisée dans les oasis tunisiennes.

La classe des sols, qui a été relativement la plus modifiée est celle des sols halomorphes, car presque tous les sols des zones étudiées se caractérisent par la salure. Et étant donné que la salinité n'est pas une contrainte irréversible dans la région (texture principalement grossière), ce paramètre de classification a été volontairement déclassé selon le degré d'halomorphie. Toujours, et selon l'étude de l'ANAT en mars 2003 sur « Schéma directeur des ressources en eau » de la wilaya de Biskra, la Caractérisation et la répartition des ressources en sols rencontrés de la région des Ziban sont :

- Classe des sols peu évolués (régosols) ;
- Classe des sols calcimagnésiques ;
- Classe des sols halomorphes.

A l'Ouest, la remontée permanente des eaux ; est à l'origine de phénomènes d'encroûtements (Debdeb) et de salure du sol alors qu'à l'Est le piedmont est tapissé de limons fins apportés de la montagne par les Oueds. L'on a là parmi les sols les plus fertiles de toute l'Algérie, accumulés au cours du quaternaire récent sur plusieurs dizaines de mètres d'épaisseurs, parfois capables de donner des rendements énormes pour peu que l'on apporte

de l'eau (Côte, 1987). Cette immense région-Ziban- offre une différenciation spéciale en tenant compte de la description et la localisation des sols dont ce qui suit :

Aux confins du compartiment ouest à la limite avec la wilaya de M'sila, les sols sont calcimagnésiques, le plus souvent gypseux de couleur brune et sont halomorphes. Plus au Nord les sols de l'oasis sont plutôt peu évolués, non climatique, d'apport alluviaux, salés, en allant vers Boussaâda. De Tolga à Besbes, en passant par SidiKhaled, Ouled Djellal, Doucen, ElGhrouss jusqu'à El Haouche, plus à l'est, les sols sont gypseux (DebDeb) à encroûtement salins, cette large bande est entrecoupée par des sols à structure non dégradée allant de Mekhadma, Ourlel, Chetma, M'lili, Sidi Okba, à El-Outaya, caractérisée par des sols peu évolués d'apports alluviaux mais salés par les remontées de la nappe phréatique.

Au beau milieu de cette bande : Biskra, ElHadjeb, Ain Zaâtout, Branis et une partie d'Oumache les sols sont plutôt halomorphes à structure non dégradée, salin à horizons superficielles friables et à encroûtement calcaire. Au pied de l'Atlas dans le compartiment Est : Djemourah, M'chounech, M'ziraâ, les sols non calcimagnésiques de couleur brune gypseux et sont halomorphes. Dans la plaine de Zeribet El Oued à El Faïdh, les sols sont à structure non dégradée et halomorphes.

Exception faite pour la région d'El Outaya et de Sidi Okba où les sols sont relativement profonds, les sols qui constituent le territoire de la Wilaya de Biskra sont en général pauvres et peu profonds, ce sont des sols éoliens d'ablation et des sols basiques. Il existe cependant en région Nord des zones où le sol est absent, c'est une zone d'affleurements de la roche mère. Au Sud-Est de la Wilaya dans la région des chotts c'est la zone des sols halomorphes. (Sedrati, 2011).

État de l'art

D'après Djili (2004), en Algérie, plusieurs travaux ont été réalisés sur l'étude des sols alluviaux, à savoir l'étude de Boulaine (1957) sur les sols des plaines de Chélif, 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, Dadi Bouhoun (1997) sur l'évolution de la salinité des sols alluviaux du M'zab, Djili (2004) et Youcef (2006) sur les aspects analytiques et morphologiques des sols alluviaux en zones arides (cas de la Dayet El Amied), selon Khemgani (2010), d'autre d'étude ont été menées dans le même contexte, tel que celles de Aouam (2007) et Khadraoui (2010).

Le régime climatique désertique est idéal pour l'extériorisation des caractères de salinité des sols ; en effet, lorsqu'il y a de l'eau, la dissolution des sels est rapide et la remontée capillaire également par suite d'une forte évaporation, de sorte que, parmi les sels dissous appartenant à une nappe phréatique, certains sont facilement ramenés en surface et d'autres précipités lorsque la concentration atteinte la permet. Il apparaît ainsi que le climat désertique favorise la concentration des solutions et la cristallisation des sels, tant en surface qu'au sein du profil selon les conditions du milieu. Dans les conditions hyperarides du Sahara, les phénomènes sont encore accrus et atteignent une intensité maximum. Aussi, les exemples des sols salins sont-ils très nombreux et spectaculaire, tout particulièrement dans les régions sédimentaires, grandes fournisseurs des anions et cations caractérisant la salure. (Dutil, 1971).

Au point de vue géologique, depuis le retrait définitif de la mer à la fin de l'Eocène, les formations continentales miocènes ont été tour à tour sableuses, argileuses, gypseuses, mais salines. Enfin, les diverses nappes contenues dans ces formations géologiques présentent toujours une salure importante variant de 1 à 6 g/litre. L'érosion quaternaire de tels bassins versants n'a pu ainsi fournir que des matériaux gypso-salins, et le Bas-Sahara constitue l'exemple d'une région qui conserve fortement l'empreinte de ce caractère gypso-salin. (Dutil, 1971).

La mise en exploitation des sols salés dans les zones arides, où les eaux d'irrigation sont elles-mêmes fortement minéralisées, peut être facilitée si l'on dispose d'un moyen de prévision du devenir des sols et des eaux. (Rieu et Cheverry, 1976).

La salure des sols est un des facteurs limitants, les plus anciennement reconnus de l'agriculture en zone aride. (Job, 1992). Dans la région de Biskra, région saharienne, la mise en culture des sols est le plus souvent confrontée à la contrainte de la salinisation. (Bala et Bensaid, 2008).

Selon Duchaufour(1997), les sols salsodiques tendent à se localiser, de manière presque exclusive, dans les zones à climat aride. Ceci s'explique par la dynamique particulière de l'ion Na^+ . La formation de ces sols est en relation étroite avec la présence de sodium sous l'une ou l'autre de ses formes : saline (NaCl , Na_2SO_4), ou échangeable, parfois les deux. Elle nécessite donc la réalisation de deux conditions : une condition de station ; existence d'une source locale de sodium (nappe salée, dépôt sédimentaire salin, matériau d'altération d'une

roche éruptive riche en minéraux sodiques), et l'autre une condition climatique permettant la conservation de l'ion Na^+ dans le profil ; cet ion très mobile, est éliminé en priorité par drainage. La salinisation des terres est un problème majeur touchant les régions arides et semi-arides, cas de l'Algérie. En effet, la salinisation est l'accumulation des sels (calcaire, gypse, chlorure de sodium, etc...) dans le sol à des teneurs supérieures au seuil de tolérance des cultures, ce qui conduit à la réduction des rendements, à des terres incultes ou à l'installation d'un paysage spécifique (espèces végétales tolérantes des fortes teneurs en sels). (Razi et Halitim, 2008).

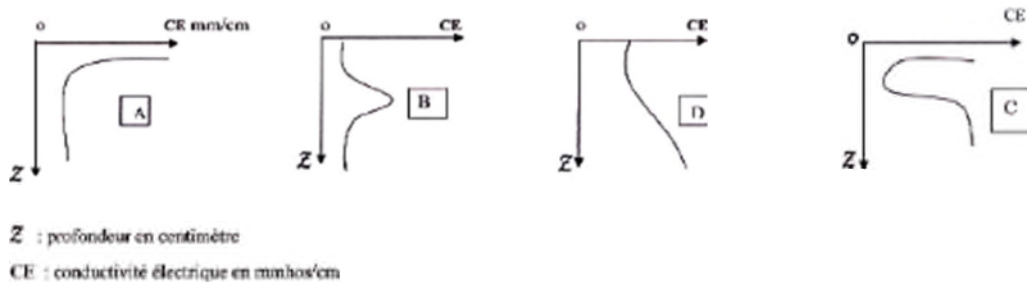
En milieu Saharien, les expérimentations menées par Djili et al (2003), montrent que la salinité, qui était initialement inférieur à 2 dS/m dans les horizons de surface, est passée plus de 12 dS/m après 5 campagnes d'irrigation. L'intensité de la salinisation est en rapport avec la qualité des eaux d'irrigation utilisées. Dans ces conditions (Daoud et Halitim, 1994), avaient apportés que la concentration en sels augmente progressivement dans la zone racinaire à chaque irrigation jusqu'à la stérilisation du sol, à moins que ces sels ne soient pas éliminés par lessivage et drainage.

La teneur en sels solubles des différents horizons d'un sol sodique ou salé, est très variable d'un sol à l'autre bien entendu, et, pour un même sol, d'une saison à l'autre. Cependant ces variations sont dues à un certain nombre de facteurs, climatiques, topographiques, biotiques, ou tels que caractéristiques des sols et des sels, présence ou absence d'une nappe phréatique salée etc.... Aussi l'étude de ces « profils salins » est-elle considérée comme essentielle (K. Belkhodja, J. Boulaine, J.P. Cointepas, M. Elfekih, P. Roederer). Elle est actuellement précisée par J. Servant qu'on distingue 4 types suivant l'allure des courbes représentatives et la position maximum : en surface, en profondeur, à moyenne profondeur, ou à la fois en surface et à moyenne profondeur. Dans des sols, la surface du sol est très salée et le profil salin est « remontant » (K. Belkhodja, J.P. Cointepas, , P. Roederer). Dans d'autres sols, le profil salin est « descendant », la salinité étant maximum à moyenne profondeur ou tout à fait en profondeur (types B et D de J. Servant). La considération du type de profil salin à un moment déterminé de l'année pourrait être un élément de classification. (Aubert, 1976).

Type de profils salins :

La distribution quantitative de la salinité peut dans tous les cas revêtir plusieurs modalités et conduit indépendamment à des types de sol. Selon servant (1978), il est possible de distinguer quatre formes principales :

- La forme A est une salinisation ;
- La forme B est une désalinisation temporaire ;
- La forme D est une désalinisation permanente ;
- La forme C est une résalinisation.



Type de profils salins (Servant, 1978in Cherbuy, 1991).

Dans ce qui suit, on va étudier les sols de la région d'étude et leur changement sous irrigation.

VIII-1- Sol de la région de Sidi Okba :

Sur les cônes –terrasses en bordure de l'Aurès, se situent : Garta à 80 mètres d'altitude, Seriana à 100 mètres d'altitude, enfin, plus loin vers le Sud Sidi Okba à 60 mètres d'altitude. Cette plaine est découpée par les lits des oueds issus des Aurès. Les formations superficielles associées sont composées par de limons et de sables à débris végétaux. Ces dépôts ont développé des sols riches en débris organiques donnant lieu à des ilots très fertiles. La prospérité de la plaine du Zab Chergui, partie du grand bassin versant saharien du Chott Melghir, est due aux apports limoneux issus des épandages de crues de nombreux oueds des Aurès (oued Biraz, oued Abiod et oued Melah). (Aidaoui, 1994; Bougherara et Lacaze, 2009 ; ANRH, 2011). A l'intérieur des Ziban, s'étalent de modestes collines et vastes plaines, constituée d'alluvions continentales remontent au miocène moyen. Les alluvions sont étalées dans les zones d'épandage de grands cours d'eau venus du Nord, puis on observe ceux de nature spéciale, qui ont comblé les cuvettes des chotts et autres bassins fermés. La constitution des sols du Zab Chergui est assez variable, ils sont classés en deux principaux groupes :

- Sols peu évolués regroupant les sols d'origine climatique, faisant partie des sols sub-désertiques ;

- Sols halomorphes regroupant, des sols à structures non dégradée et des sols salins.

Historiquement, les cultures de toute la région du Zab-Chergui, entre Sidi Okba à l'Est et les limites du Cercle de Biskra, une région de bonnes terres à céréales, qu'en temps de crues, les apports limoneux à débris organiques des larges séguias dérivées des oueds, viennent enrichir. (El-Faïdh, El-Haoudh, Farfaria) sont surtout les céréales qui, dans les années de pluies suffisantes, rendent à merveille. Sachant qu'à l'époque de colonialisme, les inventaires de 1900 classent la grande plaine au Nord des Chotts naturellement très fertile ; cette plaine qui de l'Est à l'Ouest de Biskra, sur près de 200 kilomètres de longueur, avec une largeur de 10 (Ouest) à 20 (Est) kilomètres, représente la douzième partie de la superficie de l'Egypte cultivée. (Anonyme, 1908).

En zone phoenicicole, les sols salins et les eaux d'irrigation salées sont fréquents. On enregistre dans ces sols des remontées salines en surface et des dépôts de sels à différents niveaux dans le profil. (Toutain, 1977), on a remarqué cette observation au cours de notre travail dans l'oasis de Sidi-Okba. Les Solontchaks les plus répandus sont les sodiques et les chloruro-sulfatés. (Kaouritchev, 1980).

Selon Aidaoui, 1994, la constitution de l'horizon limoneux –argileux est liée à l'irrigation traditionnelle pratiquée depuis longtemps, qui a accumulé durant des siècles, les éléments très fins en suspension dans les eaux de ruissellement utilisées ; ces sols sont très favorables à diverses cultures, une fois résolu le problème de l'irrigation ; seuls les palmiers ne supportent pas les sols argileux. Leurs racines doivent atteindre en profondeurs la couche sableuse ça ce qu'il fait les agriculteurs de la région, ils brisent par le bouclin la couche argileuse située à 70-100 cm pour atteindre la couche sableuse (notre observation in situ) ce qui exige des travaux importants pour la plantation du palmier dattier. Sachant que, le système d'irrigation est adapté aux techniques de plantation des palmiers (cuvette ou fosse), en général, la profondeur dépend de l'épaisseur de la couche sableuse qui est de 1 à 1.5 m dans cette zone. (Aidaoui, 1994).

Le choix des profils du sol à étudier a été effectué sur la base des analyses physico-chimiques des eaux d'irrigation et leur faciès chimique. L'analyse granulométrique du sol de notre région d'étude prouve que le sol a une texture, en majorité, limoneux-sableuse, calcaire ; l'effervescence par HCl est très forte sur tous les profils. Cela est prouvé par le taux de calcaire total très élevé (sol excessivement calcaire). Le mode de plantation sous forme de

tranché ou cuvette est efficace pour éliminer les sels ou les lessiver hors profil, car la CE de la pâte saturée de tous les échantillons du sol irrigués de la palmeraie de Sidi Okba répond à cette observation, elle est inférieure de celle des sols d'origine non irrigués. C'est un mode d'aménagement hydro agricole efficace. Les sols salés se rencontrent dans le sud de Sidi Okba (profil 5 et 6) où se trouvent les zones chottouse, ces sols sont couverts d'une croûte qui peut dépasser 10 cm d'épaisseur.

En ce qui suit, le détail de cette description.

VIII-1- 1- Résultats et discussion : caractérisation et qualité des sols sous irrigation

Description des profils type de la région de Sidi Okba

Profil 1

Localisation : route de Garta, Sidi Okba

Date de description: 08/02/2014

Végétation : Atriplex, Sueda mollis, Salsola, Tamarix

Géomorphologie : plane, terrasse alluviale.

Aspect de surface : cultivée en plasticulture

Coordonnées géographiques: X : 005°55'00.1'' Y : 34°43' 48.5'' Z : 69.1 m

0-20 cm : sec, 7.5 YR 4/4 Brown, friable à la main, peu de débris végétaux, texture argileux-sableuse, faible effervescence à HCl.

20-60 cm : sec, couleur 7.5 YR 6/4 light Brown, difficilement friable à la main, compacte et en motte moyenne, texture argileuse, moyenne effervescence à HCl.

60-80 cm : sec, couleur 7.5 YR 6/4 light Brown, structure lamellaire, texture argileuse, compacte, présence des taches blanches, moyenne effervescence à HCl.

Les échantillons du sol (horizon du profil) menés au laboratoire, sont analysés et leurs compositions granulométriques sont représentés par les pourcentages de chaque fraction ; argile, limon et sable. Les analyses physico-chimiques du profil 1(sol de référence-non irrigué) sont consignées dans le tableau suivant:

Tableau 57: Caractéristiques physico-chimiques du sol P1

Horizon	0-20cm	20-60cm	60-80 cm
A%	47.76	29.54	33.45
LF%	3.77	6.73	14.40
LG %	46.06	46.36	42.43
SF %	24.15	16.95	0.25
SG %	1.25	17.35	9.46
texture	Limoneu-argileuse	Limoneu-argileuse	Limoneu-argileuse
PH1/2,5	8.16	8.12	8.1
CE 1/5 mmhos/cm	1.48	4.84	5.28
CE pate saturée dS/m	6.5	14.7	13.4
Calcaire Total.%	31.66	31.25	30.83
Calcaire actif.%	7	15	17.25
Gypse %	2.15	1.98	2.75
SAR	1.13	3.01	2.92
ESP	0.41	3.21	3.06

Tableau 58: Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5) du P1

Horizon	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻⁻	HCO3 ⁻	
0-20cm	6.41	6.48	2.88	0.93	10	6.16	4.4	1.62
20-60cm	23.65	14.98	13.27	0.25	30	27.86	3.2	1.07
60-80cm	27.05	17.82	13.83	0.27	22	50.54	5	0.43

Interprétation :

Le profil I est profond et de réaction basique (Baize, 1988) caractérisé par un pH appartient à la fourchette des pH courants pour les sols minéraux en régions arides (normes d'interprétation du pH-eau du sol ; $7.5 < \text{pH} < 9$) selon (Mathieu et Pielain, 2003) avec un taux de calcaire total très élevé et une proportion importante de calcaire actif qui dépasse les 15 % ; seuil limite du pouvoir chlorosant, au delà de 20 cm de profondeur. Il est de texture fine, surtout argileuse et limoneuse, avec un taux pratique de sable grossier surtout dans l'horizon médiane (20- 60 cm), avec une structure lamellaire polyédrique à prismatique. Il est salé, selon l'échelle de l'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol dilué 1/5 à 25°C (Aubert, 1986), elle est non à légèrement salé ($2 \text{ mS/cm} < \text{CE} < 4 \text{ mS/cm}$) pour l'horizon du surface, à salé et augmente en profondeur ($4 \text{ mS/cm} < \text{CE} < 8 \text{ mS/cm}$). Selon le digramme de Riverside, l'horizon de surface (0-20cm) a une classe de C3S1, par contre les deux autres horizons en profondeurs ont une classe de C4S2 et C5S2. Donc, une concentration plus forte dans les horizons médians et profonds du profil traduisant

un mouvement des sels descendant de type D-désalinisation permanente selon Servant(1975) représente une augmentation régulière de la salinité avec la profondeur. Le taux de gypse ainsi que celui de la matière organique sont faibles.

Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique de la solution du sol des premières horizons (0-60 cm) est de type chloruré-sulfaté ($1 < Cl^-/SO_4^{2-} < 5$), par contre il est de type sulfato-chloruré ($0.2 < Cl^-/SO_4^{2-} < 1$), en profondeur (à 80 cm). Le report des trois horizons sur le diagramme de piper, note la dominance de chlorure et calcium (0 à 60 cm), par contre en profondeur le sulfate et le calcium sont les plus dominants.

ESP est une fonction mathématique en fonction du SAR, et suit leur allure générale, si le SAR augmente, l'ESP augmente aussi et vis versa. ESP de tous les horizons de ce profil varie de 0.41 en surface à 3.21% (horizon médian 20-60 cm), mais il reste inférieur à 15 % c'est-à-dire le risque de sodisation est négligeable.

Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès chloruré sulfaté à sulfato-chloruré en profondeur.

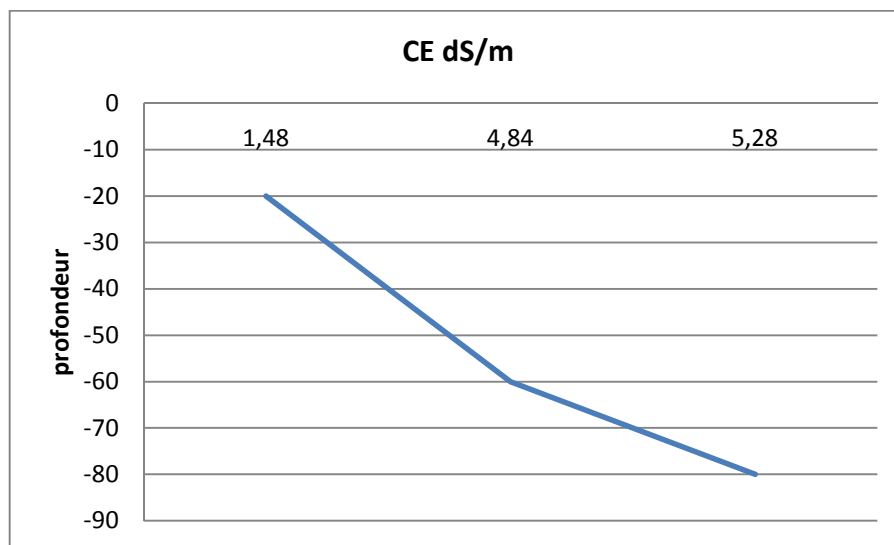


Fig65*: Profil salin de type D selon Servant (1978) du sol non irrigué du Garta



Fig.65 : Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la première exploitation_ Garta ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-60cm) et horizon 3(H3N 60-80cm).

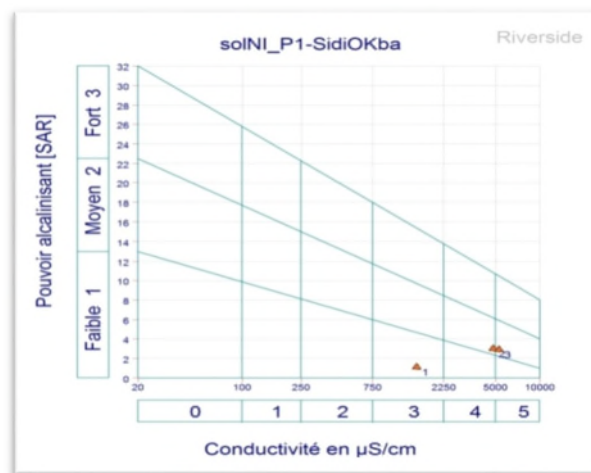


Fig.66 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la première exploitation_ Garta ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-60cm) et horizon 3(H3N 60-80cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué :

Le calcul des indices de saturation (Tableau 59) montre que la solution du sol étudiée sont saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sont sous-saturées pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre surtout en surface.

Tableau 59: Composition moyenne de l'Indice de Saturation (IS selon le modèle Phreeqc 2.8, des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1N	-6.26	-1.14	-1.36	0.89	1.03	2.20
H2N	-5.18	-0.27	-0.49	1.05	1.19	2.31
H3N	-5.32	-0.04	-0.26	1.19	1.34	2.61

Tableau 60 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la première exploitation_ Garta.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-6.26	-5.18	-5.59	0.59
IS gypsum	-1.14	-0.04	-0.48	0.58
IS anhydrite	-1.36	-0.26	-0.70	0.58
IS aragonite	0.89	1.19	1.04	0.15
IS calcite	1.03	1.34	1.19	0.16
IS dolomite	2.20	2.61	2.37	0.21

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol irrigué dans la plaine de Sidi Okba a été effectuée à l'aide du logiciel thermodynamique « Phreeqi 2.8 » (*versionfree*), en termes d'équilibres sels/solution. Elle montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation) et varié entre 0.89 à 2.61. Pour les minéraux évaporitiques, ils se trouvent sous saturation et on constate que l'anhydrite (CaSO_4) et le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sont proche de la saturation (état d'équilibre) pour l'horizon de 60 à 80 cm de profondeur indique leur état en voie de précipitation, alors que l'halite (NaCl) se présente largement sous saturé ($-6.26 < \text{IS} < -5.18$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans la solution du sol contribuant à une augmentation de la minéralisation. On constate que le minimum des IS est en surface et le maximum en profondeur (accumulation et précipitation), donc, la dynamique des sels se déroule en profondeur. Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des sols analysés et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se trouvent dans l'eau à l'état d'équilibre (saturés) à sursaturation et précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

Changement du sol sous irrigation de la première exploitation du Garta-Sidi Okba :

Afin de suivre le changement du sol sous irrigation, un sondage par tarière dans une parcelle cultivée en haricot vert sous serre, est échantillonné. Leurs résultats analytiques sont indiqués dans le tableau suivant :

Tableau 61: Résultats analytiques du sondage P1

Horizon	0-20cm	20-40cm	40-60 cm	60-80 cm
PH1/2,5	8.01	7.99	7.97	8.03
CE 1/5 mmhos/cm	3.9	3.85	3.54	3.51
Calcaire Total %	28.75	22.5	32.5	32.5
Calcaire actif.%	15.25	12.75	15.75	15.75
Gypse %	2.15	2.15	5.76	3.52
SAR	2.06	1.39	0.75	0.69
ESP %	1.8	0.8	0.16	0.25

Tableau 62: Bilan ionique de suivi de la solution du sol du P1

Horizon	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-20cm	21.24	14.38	8.72	0.78	20	21.96	5.6	0.91
20-40cm	27.95	12.35	6.25	0.72	16.	27.5	5.4	0.58
40-60cm	28.65	17.62	3.6	0.7	12	26.25	4.8	0.46
60-80 cm	27.25	11.74	3.03	0.46	14	30.54	4.6	0.46

Interprétation :

Le suivi du changement du sol cultivé en haricot vert par un sondage à la tarière fait ressortir que ce sol est profond (de 0 à 80 cm) et de réaction pH basique avec une appréciation fortement calcaire (25 à 50%) laissant présence d'une proportion importante du calcaire actif (12.75 % à 15.75 %), le test d'effervescence à l'acide chlorhydrique sur terrain confirme sa forte présence (bulle d'air fortement et longtemps présents), sachant qu'à un taux élevé du calcaire et surtout supérieur à 15 % pour le calcaire actif, devient défavorable pour de nombreuses cultures surtout arboriculture comme : le pommier, le poirier, le cognassier, le cerisier, le pêcher, les agrumes. Car le calcaire actif bloque l'assimilation de la plupart des oligo-éléments, ce qui provoque des chloroses ferriques et des carences. Ainsi que le calcaire en grande quantité insolubilise certains éléments nutritifs en particulier le phosphore, et favorise aussi l'effet antagonisme (pont calcique). Le gypse est un peu présent avec un maximum de 5.76 % en profondeur, indique un horizon gypseux due à la précipitation du gypse (norme de sol gypseux 5 % ou plus du gypse (Fao, 1988) sachant que l'eau d'irrigation est riche calcium, magnésium et sulfate. Le rapport Mg/Ca de l'eau d'irrigation est élevé a conduit à la précipitation du gypse (IS gypse proche de saturation de sol irrigué). Le sol est de texture fine (limoneu-argileuse). Il est salé avec une concentration forte dans l'ensemble du sondage et un maximum dans les horizons superficiels, elle témoigne d'un processus ascendant de salinisation sous l'effet de l'évaporation des eaux de l'irrigation (voir profil salin de type A-salinisation selon Servant, 1978), selon (Aubert, 1986), la CE de l'extrait dilué

(1/5) de la solution du sol est comprise entre 2 et 4 dS/cm, indique un sol légèrement salin à salé surtout en surface. Le report de ces horizons sur le diagramme de Riverside montre l'existence d'une seule classe C4S1 due à l'effet lessivant de l'eau d'irrigation qui a une CE de 2.34 dS/m ,inferieur à 3 dS/m, seuil de la salinité décrit par (Ayers et Westcot, 1976).

Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique de la solution du sol de tous les horizons est de type sulfato-chloruré ($0.2 < Cl^-/SO_4^{2-} < 1$), le report de ces horizons sur le diagramme de piper, note la dominance du sulfate et du calcium.

Le SAR et ESP de la solution du sol tient la même allure générale, mais ils sont sans risque de sodisation. Le SAR varie, il est maximum en surface (2.06) et minimum en profondeur (0.69). Il reste toujours inférieur à 4 et selon le Degré d'alcalinisation proposé par Servant et Servat (1966) traduit une absence de ce risque. Aussi que pour l'ESP, il varie de 1.8 % en surface à 0.25 % en profondeur, mais il reste inférieur à 15 % ; limite des sols sodiques.

Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès sulfato-chloruré en profondeur. Vue les résultats obtenus basés sur l'analyses de plusieurs paramètres, il est important de faire la mise en valeur ou l'investissement agricole dans cette zone de Garta en respectant leurs conditions pédoclimatiques.

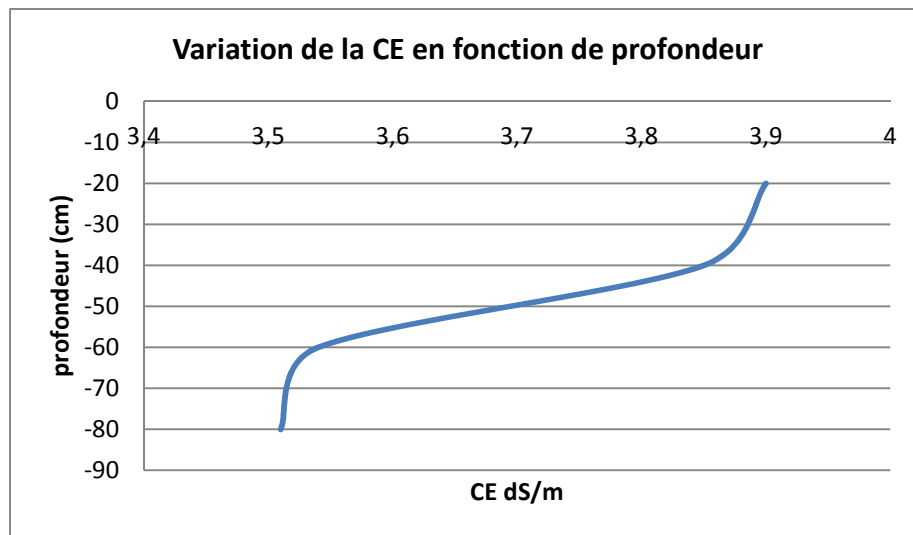


Fig. 67 : Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol sous irrigation du Garta.

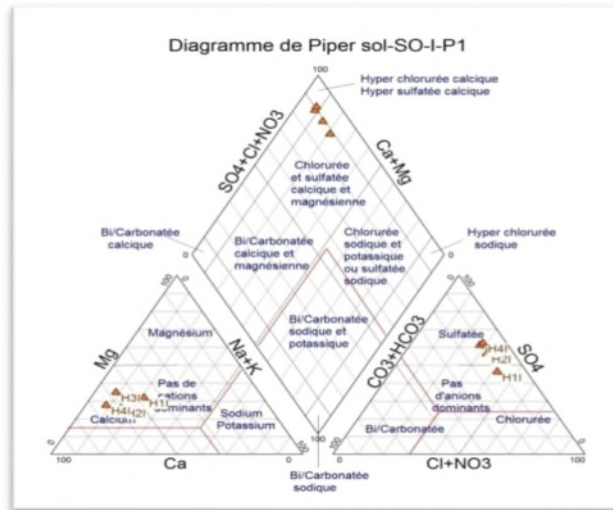


Fig.68 : Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués de la première exploitation_ Garta ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm), horizon 3(H3N 40-60cm) et horizon 4 (60-80cm).

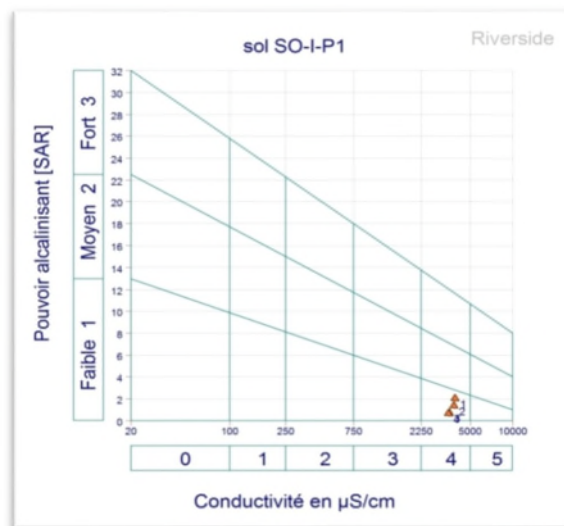


Fig.69 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la première exploitation_ Garta ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm), horizon 3(H3N 40-60cm) et horizon 4 (60-80cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué :

Le calcul des indices de saturation (Tableau 63) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sont sous-saturées pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 63: Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1irr	-5.53	-0.37	-0.59	1.18	1.32	2.61
H2irr	-5.77	-0.18	-0.40	1.24	1.38	2.53
H3irr	-6.14	-0.21	-0.43	1.18	1.33	2.57
H4irr	-6.15	-0.14	-0.36	1.19	1.33	2.42

Tableau 64 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué de la première exploitation_ Garta.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-6.15	-5.53	-5.90	0.30
IS gypsum	-0.37	-0.14	-0.23	0.10
IS anhydrite	-0.59	-0.36	-0.45	0.10
IS aragonite	1.18	1.24	1.20	0.03
IS calcite	1.32	1.38	1.34	0.03
IS dolomite	2.42	2.61	2.53	0.08

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol irrigué dans la plaine de Sidi Okba(site Garta) a été effectuée à l'aide du logiciel thermodynamique « Phreeqci 2.8 » (*version free*), en termes d'équilibres sels/solution. Elle montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation) et varié entre 1.18 à 2.61. Alors que, pour les minéraux évaporitiques, ils se trouvent sous saturation et on constate que le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) est proche de la saturation (état d'équilibre) pour l'horizon de 60à 80 cm de profondeur indique leur état en voie de précipitation, alors que l'halite(NaCl) se présente largement sous saturé ($-6.15 < \text{IS} < -5.53$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols contribuant à une augmentation de la minéralisation. On constate que le minimum des IS est en surface et le maximum en profondeur (accumulation et précipitation), donc, la dynamique des sels se déroule en profondeur.

Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des sols analysés et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se trouvent dans l'eau à l'état d'équilibre (saturés) à sursaturation et précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

Profil 2

Localisation : Feïdh el ghareg- elkfouf, Sidi-Okba

Date de description: 14/03/2014

Végétation : nu

Géomorphologie : plane, terrasse alluviale.

Aspect de surface : cultivée : palmier dattier-orge

Coordonnées géographiques: X : 005°51'51.6'' ; Y : 34°46'15.5'' Z : 56.8 m

0-20 cm : sec, couleur 10YR 6/4 sol léger, non compact, couleur brune claire, forte effervescence à HCl, absence des racines, structure poly hydrique, texture sableux-limoneuse, transition nette, absence de la charge caillouteuse.

20-75 cm : sec, couleur 10YR 5/4, sol compact à peu compact, forte effervescence à HCl, existence des points brillants, absence des racines, texture sableuse à argileux-limoneux, structure lamellaire, transition nette, absence de la charge caillouteuse.

75-140 cm : sec, couleur 10YR 5/4, sol très compact sous forme de dalle (grosse motte), non friable absence des racines, forte effervescence à HCl, présence des grains brillants.

Les Donnée analytiques de ce profil, de chaque échantillon du sol (horizon du profil) mené au laboratoire, sont analysés et leurs compositions granulométriques ainsi que chimiques sont représentés dans les tableaux suivants:

Tableau 65: Les analyses physico-chimiques (P2 ; sol de référence-non irrigué).

Horizon cm	0-20	20-75	75-140
Argile %	18.08	7.73	34.83
Limon fin %	2.77	0.66	1.62
Limon grossier %	53.03	41.56	51.06
Sable fin %	22.72	42.08	11.38
Sable grossier %	3.40	7.97	1.12
Texture	Limoneux-sableuse	Sableux-limoneuse	Limoneux-argileuse
PH1/2,5	8.11	8.53	8.44
CE 1/5 mmhos/cm	5.44	8.89	10.57
CE pate saturée dS/m	29.80	74.70	49.40
Pourcentage de saturation (%)	36.25	32	46
Calcaire Total.%	10.07	28.77	26.30
Gypse %	7.15	1.46	2.15
SAR	9.4	17.4	16.2
ESP %	12.6	24.6	22.8



Photo06 : profil02 feidh elghareg

Tableau 66 : Bilan ionique de la solution du sol du profil 2.

Horizon	Cations solubles meq/l	Anions solubles meq/l	Cl/SO4
---------	------------------------	-----------------------	--------

(cm)	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	
0-20	28.86	6.89	39.68	1.21	32	38.6	2	1.16
20-75	21.24	14.18	73.10	0.76	34	24.6	1.8	1.38
75-140	31.66	16.20	79.26	1.06	40	42.5	1.2	0.95

Interprétation :

Le profil 2 est profond (140cm) et de réaction basique en surface à très basique en profondeur (8.11<pH<8.53) selon Baize (1988) caractérisé par un pH appartient à la fourchette des pH courants pour les sols minéraux en régions arides (normes d'interprétation du pH-eau du sol ; 7.5<pH<9) selon (Mathieu et Pieltain, 2003). Ce sol est modérément à fortement calcaire (10.07%<calcaire total<28.77%) et légèrement gypseux (1.46 % à 7.15%). Il est de texture fine, surtout argileuse et limoneuse en profondeur, avec un taux pratique de sable fin surtout dans l'horizon médiane (20- 75 cm), avec une structure lamellaire polyédrique à prismatique. Il est salé avec une conductivité électrique, selon l'échelle d'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol saturé 1/5 à 25°C (Aubert, 1986), de (4 mS/cm <CE<8 mS/cm) pour l'horizon de surface, à fortement salé et augmente en profondeur (CE>8 mS/cm). Selon le digramme de Riverside l'horizon de surface (0-20cm) a une classe de C5S3, par contre les deux autres horizons en profondeurs ont une classe au-delà de C5S4 d'où la nécessité de chercher d'autre classification, cela est confirmée par la CE de la pâte saturée. Donc, une concentration plus forte dans les horizons médians et profonds du profil traduisant un mouvement des sels descendant (profil salin de type D-désalinisation permanente selon Servant (1978)).

Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique de la solution du sol des premières horizons (0-75cm) est de type chloruré-sulfaté (1<Cl-/SO₄< 5), par contre il est de type sulfato-chloruré (0.2<Cl-/SO₄< 1), en profondeur (à 140 cm). Le report des trois horizons sur le diagramme de piper, note la dominance de chlorure alterné avec de sulfate et de sodium.

ESP est une fonction mathématique en fonction du SAR, et suit leur allure générale. Le SAR est compris entre 9.4 et 17.4, il est moyen à fort selon Servant et Servat (1966). ESP de tous les horizons de ce profil est élevée et varie de 12.6(en surface) à 24.2 % (horizon médian 20-75 cm), dépassant le seuil limite de 15 % traduisant un fort risque de sodisation.

Il s'agit donc d'un sol salé à structure non dégradée (sols salins- sodiques ou Solontchaks-solonetz), avec un faciès chloruré sulfaté à sulfato-chloruré en profondeur.

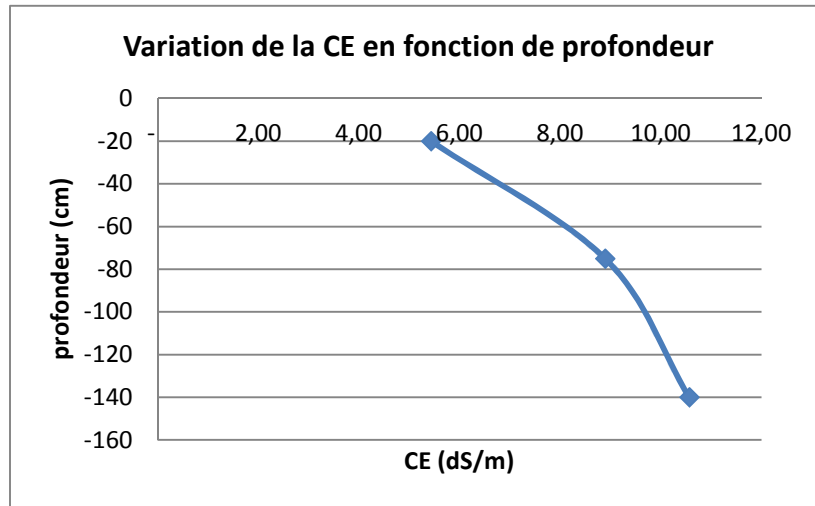


Fig.70 : Profil salin de type D selon Servant (1978) du sol non irrigué du Feïdh el ghareg-elkfouf, Sidi-Okba.

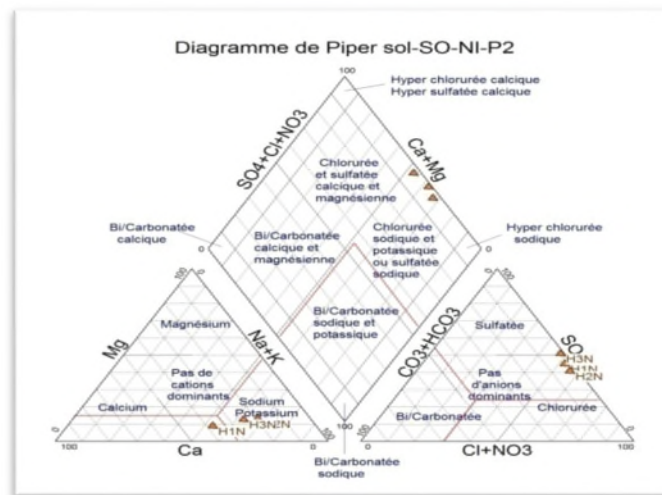


Fig.71 : Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la deuxième exploitation_ Faïdh elghareg ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-75cm) et horizon 3(H3N 75-140cm).

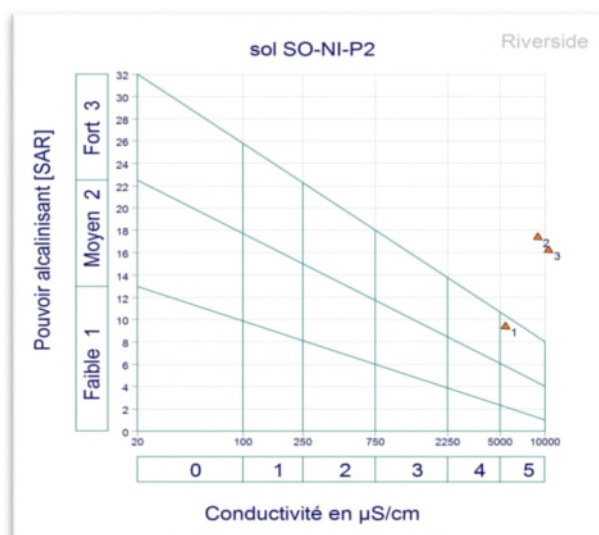


Fig.72 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la deuxième exploitation_ Faïdh elghareg ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-75cm) et horizon 3(H3N 75-140cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué :

Le calcul des indices de saturation (Tab.67) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sont sous-saturées pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 67: Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P2.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1N	-4.62	-0.16	-0.37	0.88	1.03	1.56
H2N	-4.41	-0.43	-0.64	1.08	1.22	2.40
H3N	-4.32	-0.12	-0.33	0.92	1.06	1.96

Tableau 68 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la deuxième exploitation_ Faïdh elghareg.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-4.62	-4.32	-4.45	0.15
IS gypsum	-0.43	-0.12	-0.24	0.17
IS anhydrite	-0.64	-0.33	-0.45	0.17
IS aragonite	0.88	1.08	0.96	0.11
IS calcite	1.03	1.22	1.10	0.10
IS dolomite	1.56	2.4	1.97	0.42

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol non irrigué P2 dans la plaine de Sidi Okba montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation) et varié entre 0.88 à 2.4. Il ya une tendance à précipiter le gypse en profondeur (IS gypse de troisième horizon au delà de 75 cm est sous saturé mais proche de l'équilibre). On constate que le minimum des IS est en surface et le maximum en profondeur (accumulation et précipitation), donc, la dynamique des sels se déroule en profondeur. Pour les minéraux évaporitiques, ils se trouvent sous saturation et on constate que le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est proche de la saturation (état d'équilibre) pour l'horizon de 75 à 140 cm de profondeur indiquant leur état de passage vers le processus de précipitation, alors que l'halite (NaCl) se présente sous saturé ($-4.62 < \text{IS} < -4.32$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols contribuant à une augmentation de la minéralisation.

Changement du sol sous irrigation

Après la mise en culture du sol sous irrigation, l'évolution de certains paramètres physico-chimiques notamment la salinité est indispensable afin de connaître le profil salin, ce sol de 5 ha est cultivé principalement en céréale notamment l'orge et en jeune plantation du palmier dattier (3 ha). Le sondage est effectué sur le sol cultivé en orge, sur une profondeur de 40 cm suivant le système racinaire, le report des résultats analytiques est dans le tableau suivant :

Tableau 69: Résultats analytiques de suivi du sondage 2

Horizon	0-20cm	20-40cm
PH1/2,5	7.96	8.15
CE 1/5 mmhos/cm	3.24	3.54
Calcaire Total %	27.12	24.25
Calcaire actif.%	12.75	14
Gypse %	2.15	2.15
SAR	2.54	3.77
ESP %	2.5	4.32

Tableau 70 : Bilan ionique de la solution du sol du P2.

Horizon	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-20cm	17.24	4.45	8.35	0.24	16	30.80	1.4	0.52
20-40cm	30.46	4.04	15.66	0.25	9	27.30	1.4	0.33

Interprétation :

Le suivi du changement du sol cultivé en orge par un sondage à la tarière fait ressortir que ce sol est de réaction pH basique avec une appréciation fortement calcaire (25 à 50%), source la plus fréquente de calcium dans le sol, le test d'effervescence à l'acide chlorhydrique sur terrain confirme sa forte présence (bulle d'air fortement et longtemps présents), avec un taux du calcaire actif inférieur et à la limite de 15 % seuil de la chlorose ferrique, ce calcaire actif est de très fines particules susceptibles de se solubiliser rapidement sous forme de bicarbonate. Le sol est de texture fine (limoneu-sableuse) à sableu-limoneuse pour les premiers 75cm, et devient limoneux-argileuse en profondeur (>75cm). Il est salé avec une concentration forte et presque homogène dans l'ensemble du sondage due principalement à l'effet descendant de l'irrigation (voir profil salin de type B-désalinisation temporaire selon Servant, 1978), selon (Aubert, 1986), la CE de l'extrait dilué (1/5) de la solution du sol est comprise entre 2 et 4 dS/cm, indique un sol légèrement salin. Selon le digramme de Riverside l'horizon de surface (0-20cm) a une classe de C4S1, par contre l'autre horizon a une classe de C4S2. Donc, une concentration plus forte en profondeur traduisant un mouvement des sels descendant surtout pour le sodium.

Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique de la solution du sol est sulfato-chloruré ($0.2 < Cl^-/SO_4^{2-} < 1$), le report des deux horizons sur le diagramme de piper, on constate la dominance de sulfate et de calcium. On note l'influence de l'eau d'irrigation qui a un faciès sulfaté-chloruré ($Cl^-/SO_4^{2-} < 1$).

Le SAR et ESP de la solution du sol tient la même allure générale, mais ils sont sans risque de sodisation.

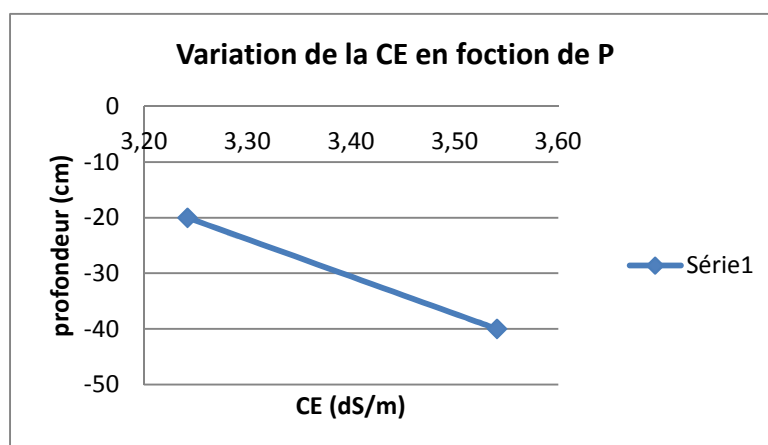


Fig.73 : Profil salin de type B selon Servant (1978) du sol irrigué du Feïdh el ghareg-elkfouf, Sidi-Okba.

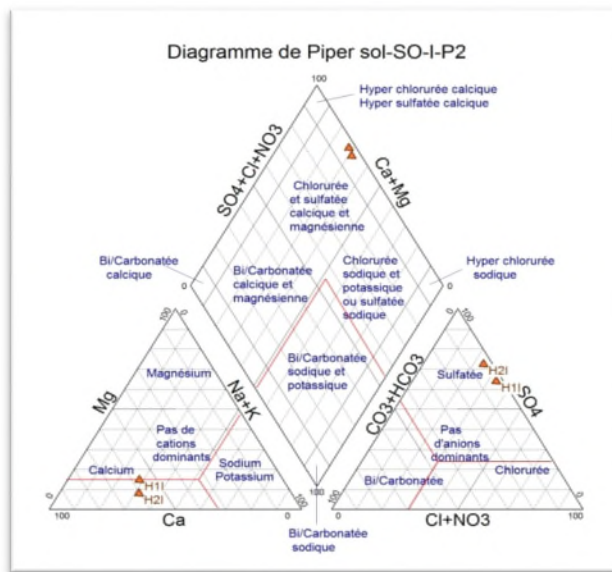


Fig.74 : Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en orge de la deuxième exploitation_ Faïdh elghareg ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm).

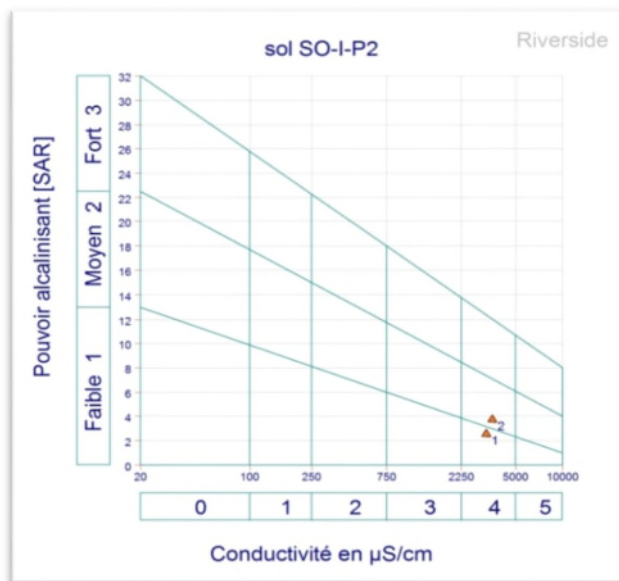


Fig.75 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en orge de la deuxième exploitation_ Faïdh elghareg ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué :

Le calcul des indices de saturation (Tableau 71) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sont sous-saturées pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 71: Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués du P2.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1irr	-5.64	-0.26	-0.48	0.42	0.57	0.66
H2irr	-5.62	-0.12	-0.33	0.85	0.99	1.23

Tableau 72: Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la deuxième exploitation_ Faïdh elghareg.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-5.64	-5.62	-5.63	0.01
IS gypsum	-0.26	-0.12	-0.19	0.10
IS anhydrite	-0.48	-0.33	-0.41	0.11
IS aragonite	0.42	0.85	0.63	0.30
IS calcite	0.57	0.99	0.78	0.30
IS dolomite	0.66	1.23	0.95	0.40

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol irrigué P2 dans la plaine de Sidi Okba montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation) et varié entre 0.42 à 1.23 (presque le moitié des sols non irrigués). Il ya une tendance à précipiter le gypse en profondeur (IS gypse est sous saturé mais proche de l'équilibre). On constate que le minimum des IS est en surface et le maximum en profondeur (accumulation et précipitation), donc, la dynamique des sels se déroule en profondeur. Alors que l'halite(NaCl) se présente largement sous saturé ($-5.64 < \text{IS} < -5.62$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols contribuant à une augmentation de la minéralisation.

Profil 3-a- Profil cultural non irrigué

Localisation : Elb Tajdid, Sidi Okba

Date de description:01/03/2014

Végétation : palmier dattier (depuis 1993).

Géomorphologie : plane, terrasse alluviale, près d'ancien trace d'oued.

Aspect de surface : cultivée

Coordonnées géographiques: X : 005°55'02''.5 Y : 34°43' 59''.6 Z : 32.2 m

0-30 cm : sec, couleur 10YR 5/4 yellowich Brown, peu compact, présence de fines filaments racinaires, présence de taches blanche (10%), moyenne effervescence à HCl, texture sableux-limoneuse.

30-70 cm : sec, couleur 10 YR 4/6 dark yellowich Brown, compacte, moyenne effervescence à HCl, présence des racines du palmier dattier, présence des taches blanches peu nombreuse, texture limoneu-argileuse.

70-100 cm : humide, couleur 10 YR 5/6, friable, non compacte, peu de filament racinaire, peu des taches blanches, moyenne effervescence à HCl, texture à tendance sableuse.

100-120 cm : humide, couleur 10 YR 5/6 ou 5/8 yellowich Brown, absence des taches blanches, absence des filaments racinaires, friable, non compacte, texture sableuse, présence des cailloux de rivière, faible effervescence à HCl.

Cette exploitation est située dans la région de Sidi Okba dans le lieu dit Tajdid, cultivée principalement par 600 palmiers dattiers en exploitant 2 forages, avec aussi une autonomie de 60 heures d'irrigation par l'eau de barrage (actuellement il est absent depuis 5ans à cause de manque d'eau), d'autres spéculations sont réunies au palmier dattier (avec plus 500 palmiers de variété deglet nour : mech degla 20-25 pieds, ghars 13), arboriculture quelques pieds de grenadiers, figuiers et orangers.

Les résultats analytiques des analyses physico-chimiques du profil 3(sol de référence-non irrigué) sont consignés dans les tableaux suivants :

Tableau 73: Résultats analytique du profil 3 (sol non irrigué)

Horizon (cm)	0-30	30-70	70-100	100-120
A%	19.86	31.7	17.45	15.12
LF%	23.63	28.45	16.7	16.04
LG%	23.47	20.84	36.8	26.34
SF%	25.1	17.25	26.15	31.26
SG%	7.95	1.78	2.93	11.24
texture	Limoneux-sableuse	Limoneu-argileuse	Limoneux-sableuse	Sableu-limoneuse
PH1/2,5	7.93	7.92	7.98	7.95
CE 1/5 mmhos/cm	4.02	3.05	3.2	3.18
CE PS mmhos/cm	14	12.4	4.1	2.9
Calcaire Total.%	27.08	29.58	30	28.75
Calcaire actif.%	9	5.25	9.25	6.5

Gypse %	2.84	3.52	1.2	1.46
SAR	2.3	1.63	1.23	1.1
ESP	2.12	1.14	0.55	0.37

Tableau 74 : Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5) de profil P3

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻⁻	HCO3 ⁻	
0-30	27.65	10.93	10.04	2.05	14	17.41	4.8	0.8
30-70	28.45	2.83	6.44	1.33	10	13.87	3.8	0.72
70-100	23.45	1.14	5.12	1.42	14	12.5	3.2	1.12
100-120	23.45	13.16	4.74	1.29	10	16.07	6	0.62

Interprétation :

Le profil (3-a) est profond et de réaction basique avec un taux de calcaire total très élevé qui peut arriver à 30 % et une faible proportion de calcaire actif. Il est de texture fine, surtout limoneuse-sableuse et limoneuse-argileuse dans l'horizon médian de 30 à 70 cm, avec un taux pratique de sable (>42%) surtout en profondeur (100 à 140 cm) jouant un rôle primordial et nécessaire dans les régions arides du drainage naturel, avec une structure lamellaire, polyédrique, meuble et friable. Il est salé avec une homogénéité presque dans tous les horizons du profil sans accumulation en profondeur traduisant un mouvement des sels descendant ainsi que l'efficacité de ce type de drainage naturel. Selon (Aubert, 1986), la CE de l'extrait dilué (1/5) de la solution du sol est comprise entre 2 et 4 dS/cm, indique un sol légèrement salin. Selon le digramme de Riverside tous les horizons appartiennent à une seule classe de C4S1, avec une concentration plus forte en horizon de (0-70 cm) traduisant un mouvement des sels descendant surtout pour le calcium et le sulfate. Le gypse est un peu présent surtout pour l'horizon (0-70 cm)(selon FAO, 1990, il est sol faiblement gypsifère).

Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique de la solution du sol des premières horizons (0-70 cm) est de type sulfato-chloruré ($0.2 < Cl^-/SO_4^{2-} < 1$), chloruré-sulfaté ($1 < Cl^-/SO_4^{2-} < 5$) dans l'horizon (70-100 cm), après il devient sulfato-chloruré en profondeur (à 140 cm) selon la dominance du sulfate ou du chlorure. Le report des horizons sur le diagramme de piper, constate la dominance de sulfate et de calcium. On note l'influence de la dissolution du gypse présent selon leur indice de saturation.

ESP est une fonction mathématique en fonction du SAR, et suit leur allure générale, si le SAR augmente, l'ESP augmente aussi et vis versa. L'ESP de tous les horizons de ce profil varie de 2.12 % en surface à 0.37% en profondeur, mais il reste inférieur à 15 % c'est-à-dire sans risque de sodisation. On peut noter que le mode d'irrigation par submersion (certes il ya un

gaspillage mais le remplissage de la tranchée) vont lessiver les sels en surfaces surtout si la couche en profondeur est sableuse, c'est – à- dire présence du drainage naturel.

Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès chloruré sulfaté à sulfato-chloruré en profondeur.

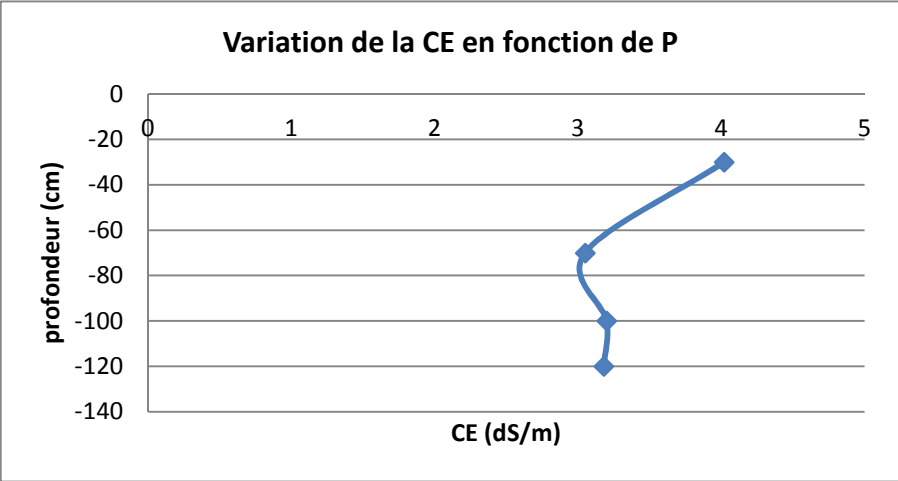


Fig.76 : Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol non irrigué du Tajdid, Sidi-Okba

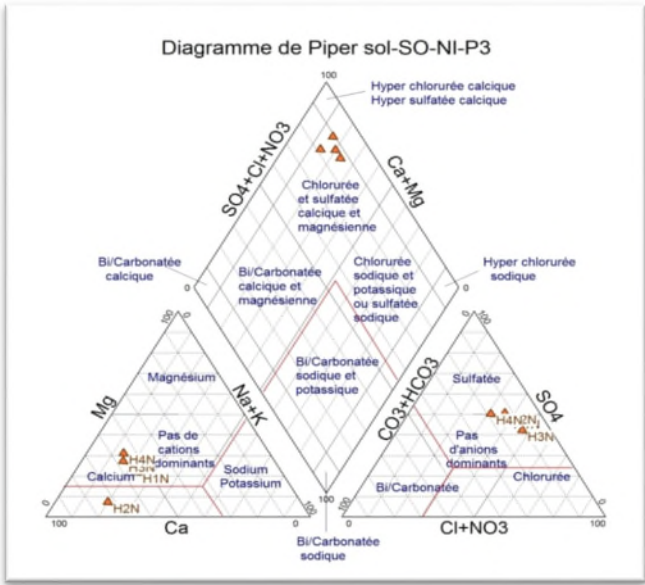


Fig.77: Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, cultivés en palmier dattier de la troisième exploitation_ Tajdid ; horizon1 (H1N 0-30 cm), horizon 2 (H2N 30-70cm), horizon 3(H3N 70-100cm) et horizon 4(H4N 100-140 cm).

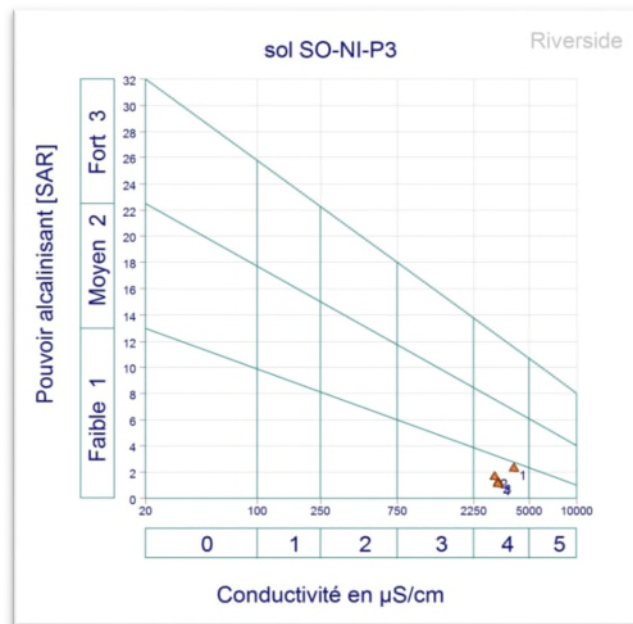


Fig.78: Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, cultivés en palmier dattier de la troisième exploitation_ Tajdid ; horizon1 (H1N 0-30 cm), horizon 2 (H2N 30-70cm), horizon 3(H3N 70-100cm) et horizon 4(H4N 100-140 cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué :

Le calcul des indices de saturation (Tableau 75) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturée pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau75 : Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P3.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1N	-5.62	-0.35	-0.57	1.17	1.32	2.36
H2N	-5.94	-0.35	-0.57	1.09	1.24	1.60
H3N	-5.90	-0.51	-0.73	1.02	1.16	2.13
H4N	-6.08	-0.43	-0.65	1.24	1.38	2.64

Tableau 76 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la troisième exploitation_ Tajdid.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-6.08	-5.62	-5.89	0.19
IS gypsum	-0.51	-0.35	-0.41	0.08

IS anhydrite	-0.73	-0.57	-0.63	0.08
IS aragonite	1.02	1.24	1.13	0.10
IS calcite	1.16	1.38	1.28	0.10
IS dolomite	1.6	2.64	2.18	0.44

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol non irrigué P3 dans la plaine de Sidi Okba montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation) et varié entre 1.02 à 2.64 (ils sont maximum en profondeur). Pour les minéraux évaporitiques ; l'indice de saturation du gypse, l'anhydrite et halite est sous saturé (IS est négatif) surtout pour l'halite (NaCl) se présente largement sous saturé ($-6.08 < \text{IS} < -5.62$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols surtout en surface, contribuant à une augmentation de la minéralisation.

🚧 **Changement du sol sous irrigation**

Après la mise en culture du sol sous irrigation, le suivi de l'évolution de certains paramètres physico-chimiques notamment la salinité est indispensable. Le sondage est effectué sur un sol cultivé en palmier dattier plantée en tranchés, sur une profondeur peut arriver à 160 cm, le report des résultats analytiques est dans le tableau ci-dessous.

Profil 3-b- Profil cultural irrigué (sondage à la tarière).

Localisation : Elb Tajdid, Sidi Okba

Date de description: 08/03/2014

Végétation : palmier dattier

Géomorphologie : plane, terrasse alluviale.

Aspect de surface : cultivée

Coordonnées géographiques: X : 005°54'52''.1; Y : 34°44'07''.8' Z : 36.7 m

0- 70 cm : humide, couleur (10 YR 3/2), very dark granish Brown, non friable, texture argileux-limoneuse (taux d'argile élevé), présence de la matière organique, présence de végétation herbacée (racines), vive effervescence à HCl (3 forte), non compacte et se pénètre facilement par la tarière.

70-120 cm : humide 10 YR 3/1 very dark gray texture argileuse, non friable, présence de vers de terre (lombric) présence de racines, fortes effervescence à HCl (3 forte), non compacte et se pénètre facilement.

120-140 cm : humide, 10 YR 3/3 dark Brown, très compacte, texture argileuse (taxe levé d'argile), colmate avec la tarière, absence des racines, moyenne effervescence à HCl.

140-160 cm : humide, 10 YR4/4 dark yellowish Brown, très compacte se colmate librement avec la tarière, texture argileuse-sableuse, présence des racines du palmier dattier, faible effervescence à HCl.

Tableau77: Résultats analytiques du sondage P3.

Horizon (cm)	0-40	40-80	80-100	100-140
PH1/2,5	7.8	8.02	8.09	8.09
CE 1/5 mmhos/cm	3.39	1.19	1.06	1.17
Calcaire Total %	28.33	27.92	28.33	29.16
Calcaire actif.%	12	17.5	18.5	15
MO %	2.57	2.69	2.73	1.79
SAR	1.09	1.75	1.36	1.43
ESP %	0.35	1.32	0.75	0.85

Tableau78 : Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5).

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-40cm	27.25	10.53	4.74	0.63	14	13.84	6	1.01
40-80cm	3.21	5.67	3.68	1.54	14	2.15	5.8	6.54
80-100cm	6.01	5.67	3.3	0.46	10	2.32	4.8	4.31
100-140	5.01	5.06	3.2	0.55	12	3.04	4.8	3.95

Interprétation :

Le suivi du changement du sol cultivé en palmier dattier par un sondage à la tarière fait ressortir que ce sol est profond (de 0 à 140 cm) et de réaction pH basique avec une appréciation fortement calcaire (25 à 50%) laissant présence d'une proportion importante du calcaire actif qui peut dépasser les 15 % dès les premières 40 cm où le test d'effervescence à l'acide chlorhydrique sur terrain confirme sa forte présence (bulle d'air fortement et longtemps présents), sachant qu'à un taux élevé du calcaire et surtout supérieur à 15 % pour le calcaire actif, devient défavorable pour de nombreuses cultures surtout arboriculture comme : le pommier, le poirier, le cognassier, le cerisier, le pêcher, les agrumes. Car le calcaire actif bloque l'assimilation de la plupart des oligo-éléments, ce qui provoque des chloroses ferriques et des carences. Ainsi que le calcaire en grande quantité insolubilise certains éléments nutritifs en particulier le phosphore, et favorise aussi l'effet antagonisme (pont calcique). Cette remarque est confirmée au niveau du terrain en discutant avec l'agriculteur (le faible nombre du pied des arbres fruitiers). Le sol est de texture fine (limoneu-argileuse). Il est salé avec une concentration forte en surface (0-40 cm), selon (Aubert, 1986), la CE de l'extrait dilué (1/5) de la solution du sol est comprise entre 2 et 4 dS/cm, indique un sol légèrement salin à classe C4S1, et reste presque homogène dans le reste de l'ensemble du sondage (<2 dS/m) reflète un sol non salin à classe C3S1, due principalement à l'effet

descendant de l'irrigation ajouté à une forte évaporation en surface (voir profil salin de type A selon Servant, 1978),

Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique de la solution du sol des horizons de surface et en profondeur est chloruré-sulfaté ($1 < Cl^-/SO_4^{2-} < 5$), par contre, il devient chloruré dans l'horizon médian (40-80 cm) où se domine le chlorure. Le report des horizons sur le diagramme de piper, constate la dominance de chlorure et de calcium. On note l'influence des eaux d'irrigation sur le sol qui ont un faciès chloruré sodique.

Le SAR et ESP de la solution du sol tient la même allure générale, mais ils sont sans risque de sodisation. Ils sont maxima en profondeur de (40-80 cm) avec respectivement 1.75, 1.32 % ; et minimum en surface 1.09 et 0.35%, mais il reste inférieur à 15 % ; limite des sols sodiques d'où l'influence de lessivage de Na^+ en profondeur, sachant que l'eau d'irrigation a un SAR(S2) à faible risque de sodisation.

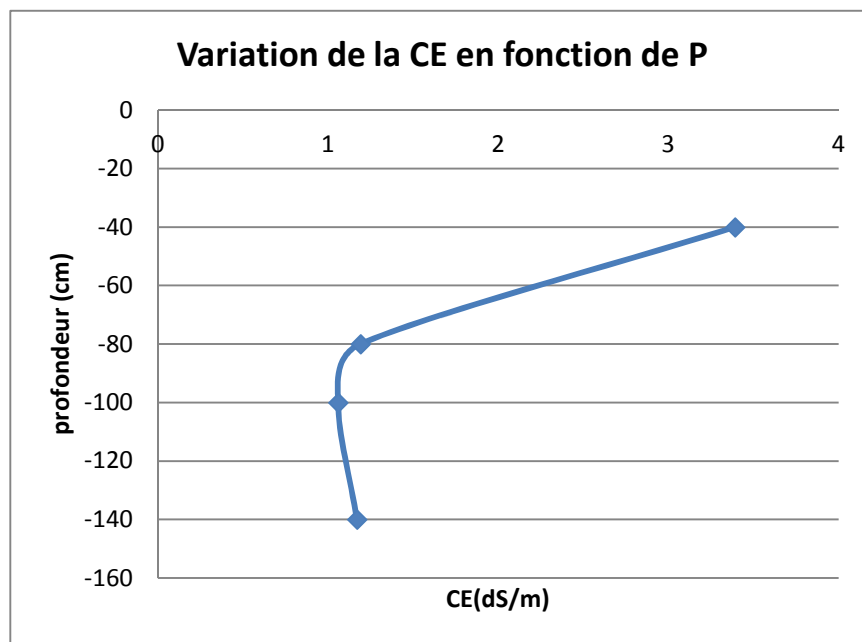


Fig.79 : Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol irrigué du Tajdid, Sidi-Okba.

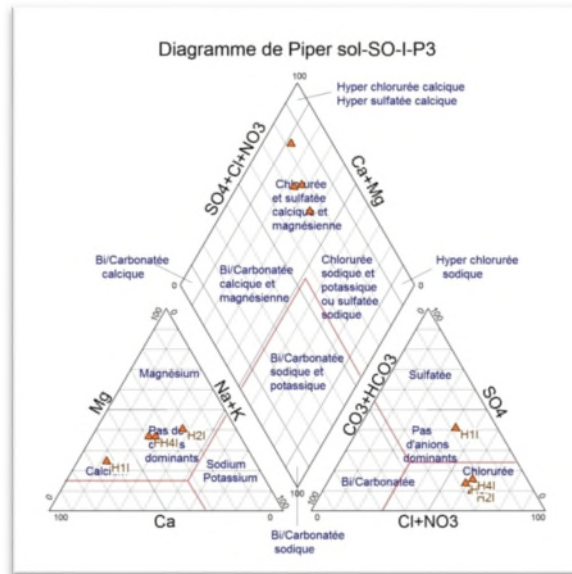


Fig.80 : Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en palmier dattier de la troisième exploitation_ Tajdid ; horizon1 (H1N 0-40 cm), horizon 2 (H2N 40-80cm), horizon 3(H3N 80-100cm) et horizon 4(H4N 100-140 cm).

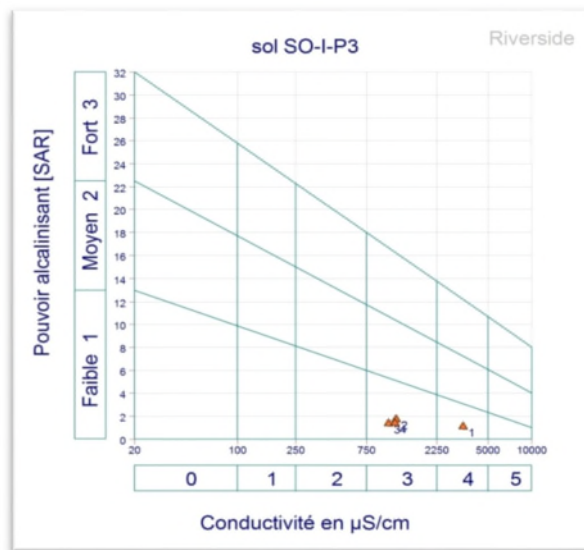


Fig.81 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en palmier dattier de la troisième exploitation_ Tajdid ; horizon1 (H1N 0-40 cm), horizon 2 (H2N 40-80cm), horizon 3(H3N 80-100cm) et horizon 4(H4N 100-140 cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué :

Le calcul des indices de saturation (Tableau 79) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sont sous-saturées pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par

contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 79: Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués du P3.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1irr	-5.94	-0.43	-0.65	1.16	1.31	2.33
H2irr	-6.00	-1.83	-2.05	0.62	0.76	1.91
H3irr	-6.19	-1.54	-1.76	0.86	1.00	2.11
H4irr	-6.12	-1.49	-1.71	0.78	0.92	1.98

Tableau 80: Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la troisième exploitation_ Tajdid.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-6.19	-5.94	-6.06	0.11
IS gypsum	-1.83	-0.43	-1.32	0.61
IS anhydrite	-2.05	-0.65	-1.54	0.61
IS aragonite	0.62	1.16	0.86	0.23
IS calcite	0.76	1.31	1.00	0.23
IS dolomite	1.91	2.33	2.08	0.18

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol irrigué P3 dans la plaine de Sidi Okba montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation) et varié entre 0.62 à 2.33 (ils sont en maximum en surface 0-40cm là où il ya un maximum du Ca^{++} , Mg^{++} et HCO_3^-). Pour les minéraux évaporitiques ; l'indice de saturation du gypse, l'anhydrite et halite est sous saturé (IS est négatif) surtout pour l'halite (NaCl) qui se présente largement sous saturé ($-6.19 < \text{IS} < -5.94$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols surtout en surface, contribuant à une augmentation de la minéralisation.



Photo 07a : Utilisation de la matière organique à l'intérieur de la palmeraie.



Photo 07b : Des travaux importants réalisés par le fellah afin de planter les jeunes palmiers dont le but de briser la couche argileuse et placer le palmier sur la couche sableuse (70-150 cm, selon les profils) dans la région de Sidi-Okba (Tajdid).



Photo 08: Mode d'irrigation par submersion (rigole-ruissellement) des palmeraies de Sidi-Okba (localité Tajdid) ; les palmiers sont connectées entre-eux.

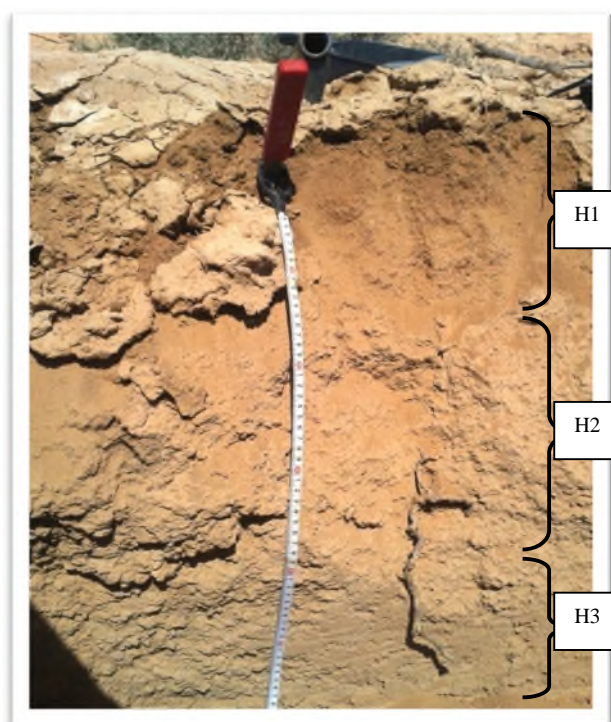


Photo 09 : Profil d'un sol à 3 horizons bien distincts dans la région de Sidi-Okba (localité Tajdid).

Profil 4- Profil sol non irrigué

Localisation : Mangae Bougtaf, Sidi Okba

Date de description:01/03/2014

Végétation : bougtaf-(Atriplex)

Géomorphologie : plaine d'alluvion

Aspect de surface : cultivée en palmier dattier

Coordonnées géographiques: X : 005° 54' 19. 4" Y : 34° 43' 45. 0' Z : 29.7 m

Cette palmeraie est situé dans un lieu appelé mangae Bougtaf (la source ou lieu de naissance d'une halophyte : Atriplex d'où vient son nom), le sol est prélevé à l'intérieur de la palmeraie homogène. Sachant que *Atriplex halimus*, se rencontre en faible hydromorphie et en salinité variable (10à 70 dS/m). (Voir tableau 81).

Tableau 81 : Résultats analytiques du sondage P4.

Horizon (cm)	0-30	30-60	60-100
A%	7.47	20.5	6.5
LF%	20.2	0.6	19.9
LG%	36.73	67	38
SF%	34.15	9.9	32
SG%	1.45	2	3.6

texture	Limoneux-sableuse	Limoneux-argileuse	Limoneux-sableuse
PH1/2,5	8.47	8.33	8.33
CE 1/5 mmhos/cm	3.65	6.08	2.59
CE PS mmhos/cm	21.7	27.8	9
SAR	8	6.8	2.4
ESP	10.5	8.9	2.2

Tableau 82 : Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5).

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-30	8.016	0.405	16.29	0.15	34	1.7	9.2	20.2
30-60	29.26	12.55	31.33	0.45	37	41.6	9.8	0.9
60-100	8.82	15.39	8.14	0.98	20	12.6	8.4	1.6

Interprétation

Le profil 4 est profond (100 cm limite du sable) et de réaction très basique. Il est de texture fine, surtout argileuse et limoneuse (Texture limono-argileuse dans l'horizon médian due aux alluvions ainsi que le mode d'irrigation par rigole pratiquée depuis longtemps apporte les éléments fins), avec un taux important de sable surtout dans l'horizon profond (60- 100 cm), avec une structure peu grumeleuse. Il est salé avec une concentration plus forte dans les horizons médians du profil (30-60 cm) où la texture est argileuse traduisant un mouvement des sels descendant. Selon (Aubert, 1986), la CE de l'extrait dilué (1/5) de la solution du sol ($2\text{dS/m} < \text{CE} < 4 \text{ dS/m}$), indique un sol légèrement salin pour l'horizon de surface et en profondeur, par contre l'horizon médian est salé à fortement salé ($4 \text{ dS/m} < \text{CE} < 8\text{dS/m}$) laissant apparaître un profil salin de type B. Selon le digramme de Riverside chaque horizon représente une classe toute seule classe de C4S3 pour le premier horizon, classe C5S3 pour l'horizon médian et la classe C4S1 pour le troisième horizon, avec une concentration plus forte en horizon de (30-60 cm) traduisant un mouvement des sels descendant pour toute les cations et les anions.

Selon Servant et Servat (1966), le sol a 3 types du faciès chimique ; il est dans le premier horizon (0-30 cm) chloruré ($\text{Cl}/\text{SO}_4 > 5$), sulfato-chloruré ($0.2 < \text{Cl}/\text{SO}_4 < 1$) de 30 à 60 cm et chloruré-sulfaté en profondeur (supérieur à 60 cm). Le faciès sulfaté chloruré est du à la dissolution des évaporites notamment le gypse.

ESP est une fonction mathématique en fonction du SAR, et suit leur allure générale, si le SAR augmente, l'ESP augmente aussi et vis versa .l' ESP est important près de 10 % de 0 à 60 cm et diminue en profondeur à 2.2% mettre en jeux la qualité de ce sol, selon le degré

d'alcalinisation d'après Servant et Servat (1966) le sol est apprécié à faible risque de sodisation à 60 cm.

Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès chloruré en surface alterné avec un faciès sulfato-chloruré à chloruré –sulfaté en profondeur.

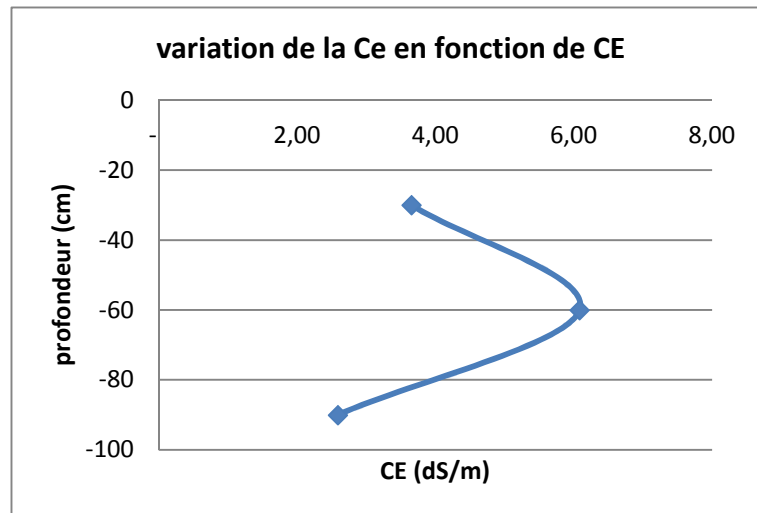


Fig.82 : Profil salin de type B selon Servant (1978) du sol non irrigué du Mangae Bougtaf, Sidi-Okba.

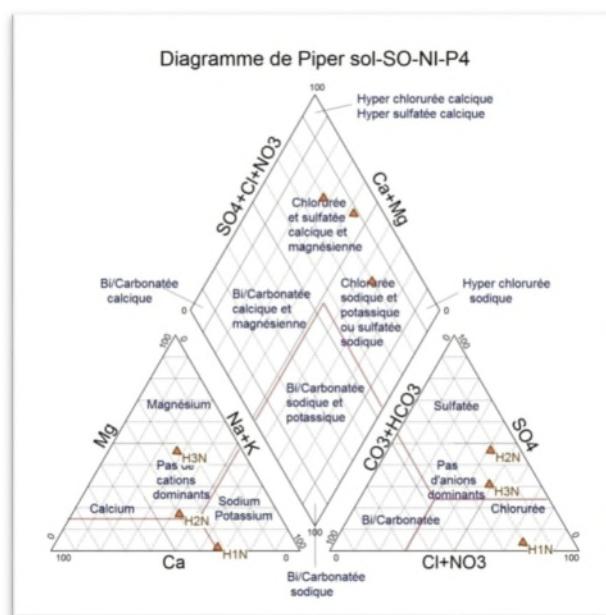


Fig.83 : Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, cultivés en palmier dattier de la quatrième exploitation_ Mangae Bougtaff ; horizon1 (H1N 0-30 cm), horizon 2 (H2N 30-60cm) et horizon 3(H3N 60-90cm).

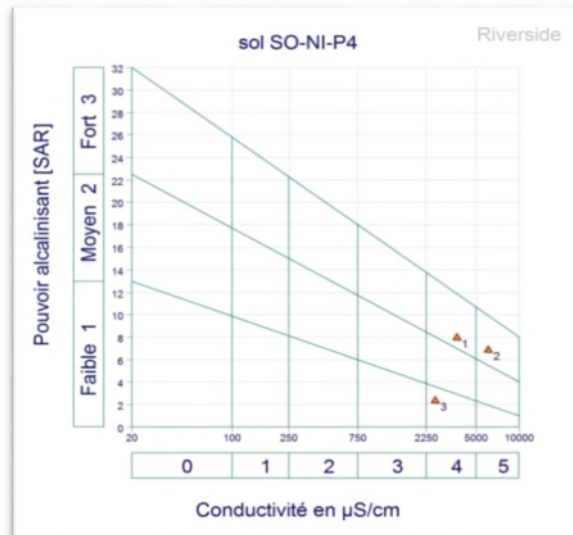


Fig.84 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, cultivés en palmier dattier de la quatrième exploitation_ Mangae Bougtaff ; horizon1 (H1N 0-30 cm), horizon 2 (H2N 30-60cm) et horizon 3(H3N 60-90cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué :

Le calcul des indices de saturation (Tableau 83) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sont sous-saturées pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau83 : Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P4.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1N	-5.00	-1.64	-1.86	1.55	1.69	2.24
H2N	-4.75	-0.11	-0.32	1.76	1.91	3.57
H3N	-5.54	-0.90	-1.12	1.33	1.47	3.32

Tableau 84 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la quatrième exploitation_ Mangae Bougtaff.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-5.54	-4.76	-5.10	0.40
IS gypsum	-1.64	-0.11	-0.88	0.77
IS anhydrite	-1.86	-0.32	-1.10	0.77
IS aragonite	1.33	1.76	1.55	0.22
IS calcite	1.47	1.91	1.69	0.22
IS dolomite	2.24	3.57	3.04	0.71

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol non irrigué P4 dans la plaine de Sidi Okba montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation) et varié entre 1.33 à 3.57. Aussi que pour les minéraux évaporitiques ; l'indice de saturation du gypse, l'anhydrite et halite est sous saturé (IS est négatif) surtout pour l'halite (NaCl) se présente sous saturé ($-5.54 < \text{IS} < -4.76$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols surtout en profondeur, contribuant à une augmentation de la minéralisation. Quoique les minéraux carbonatés que les évaporites, ils sont en maximum dans l'horizon médian 30-60 cm où la texture argileuse combinée à une CE la plus élevée avec maximum du Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{--} et HCO_3^- .

✚ **Changement du sol sous irrigation :**

Le suivi du changement du sol sous irrigation est effectué par un sondage sous un pied du palmier dattier ; les résultats analytiques sont reportés comme suit :

Tableau85: Résultats analytiques du sondage P4.

Horizon (cm)	0-30	30-60	60-100
PH1/2,5	8.6	8.57	8.17
CE 1/5 mmhos/cm	0.97	0.73	5.69
Calcaire Total. %	10.26	12.13	9.26
SAR	1.60	1.35	3.6
ESP	1.1	0.74	4.1

Tableau86 : Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5).

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	
0-30	3.21	4.45	3.13	0.40	10	0.84	9.6	11.9
30-60	4.01	4.05	2.72	0.25	10	1.68	10.8	5.95
60-100	13.27	27.7	15.66	0.76	28	36.55	11.6	0.77

Le suivi du changement du sol cultivé en palmier dattier par un sondage à la tarière fait ressortir que ce sol est profond (de 0 à 100 cm) et de réaction pH très basique en les deux premiers horizons à légèrement basique en profondeur, Le sol est de texture fine de (limoneux-sableuse) à (limoneux-argileuse). Il est non salé ($\text{CE} < 2$ dS/m) en surface représenté par deux classe de salinité C2S1(30-60cm) et C3S1(0-30cm) à salé en profondeur, selon (Aubert, 1986), la CE de l'extrait dilué (1/5) de la solution du sol est comprise entre 4 et 8 dS/cm, indique un sol salin avec une classe de C5S2, due principalement à l'effet descendant de l'irrigation (voir profil salin de type C selon Servant, 1978). Selon Servant et Servat (1966), le sol a 2 types du faciès chimique ; il est, dans les premier horizons (de 0 à 60 cm) chloruré ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4 > 5$), à sulfato-chloruré ($0.2 < \text{Cl}^-/\text{SO}_4 < 1$) en profondeur (supérieur

à 60 cm). Le report des horizons sur le diagramme de Piper montre que les premières 60 cm ont tendance à Bicarbonaté calcique et magnésique, par contre l'horizon profond est sulfaté magnésique et calcique. Sachant que la qualité de l'eau d'irrigation de cette palmeraie est fortement salée avec un faciès sulfaté sodique et un fort risque de sodisation, donc on note l'influence de cette eau sur le sol.

Le SAR et ESP de la solution du sol tient la même allure générale, Ils sont maxima en profondeur de (60-100 cm), mais ils sont sans risque de sodisation due au lessivage des sels surtout Na^+ au-delà des horizons étudiés.

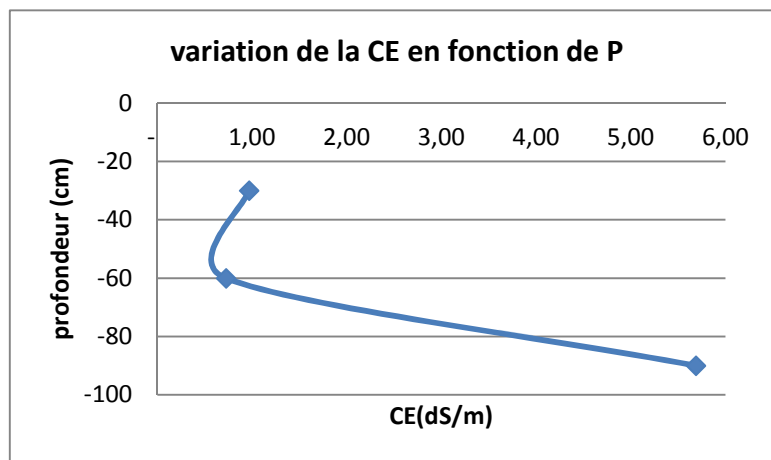


Fig.85 : Profil salin de type C selon Servant (1978) du sol irrigué du Mangae Bougtaf, Sidi-Okba.

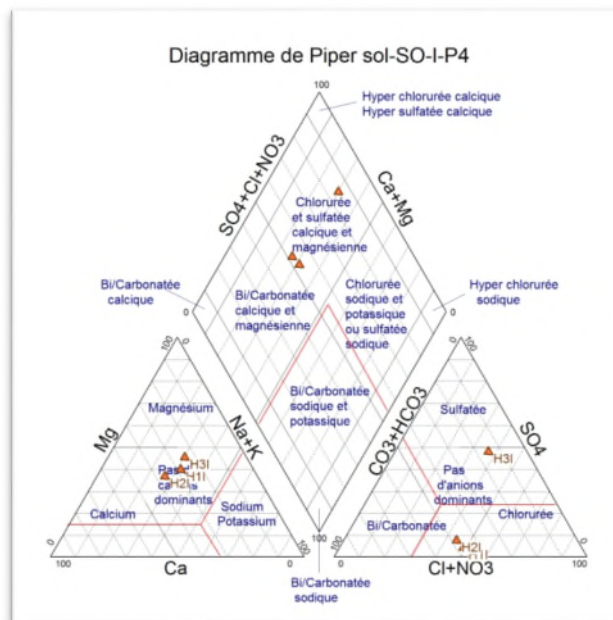


Fig.86 : Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en palmier dattier de la quatrième exploitation_ Mangae Bougtaff ; horizon1 (H1N 0-30 cm), horizon 2 (H2N 30-60cm) et horizon 3(H3N 60-90cm).

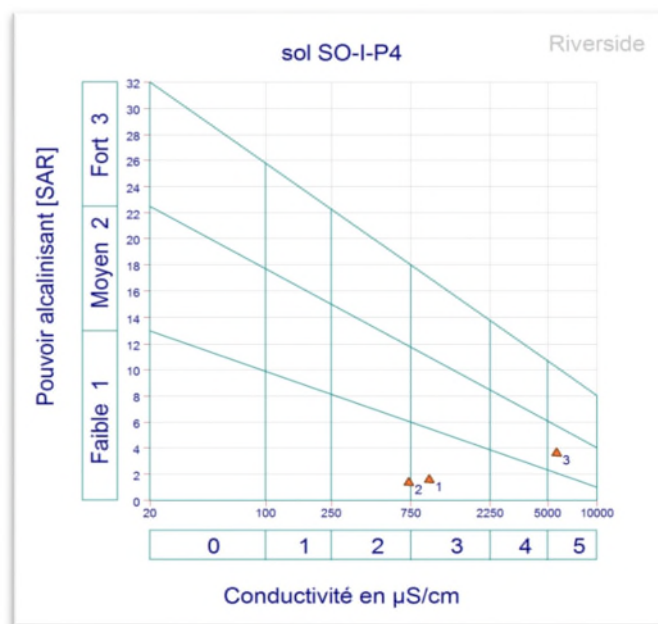


Fig.87 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en palmier dattier de la quatrième exploitation_ Mangae Bougtaff ; horizon1 (H1N 0-30 cm), horizon 2 (H2N 30-60cm) et horizon 3(H3N 60-90cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué :

Le calcul des indices de saturation (Tableau 87) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturée pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau87 : Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués du P4.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1irr	-6.21	-2.23	-2.45	1.36	1.51	3.31
H2irr	-6.27	-1.85	-2.07	1.46	1.61	3.38
H3irr	-5.15	-0.45	-0.67	1.35	1.49	3.39

Tableau 88 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué de la quatrième exploitation_ Mangae Bougtaff.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
----------------------	---------	---------	---------	----------

IS halite	-6.27	-5.15	-5.88	0.63
IS gypsum	-2.23	-0.45	-1.51	0.94
IS anhydrite	-2.45	-0.67	-1.73	0.94
IS aragonite	1.35	1.46	1.39	0.06
IS calcite	1.49	1.61	1.54	0.06
IS dolomite	3.31	3.39	3.36	0.04

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol irrigué P4 dans la plaine de Sidi Okba montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation) et presque homogène le long du profil et varié entre 1.35 à 3.39. Aussi que pour les minéraux évaporitiques ; l'indice de saturation du gypse, l'anhydrite et halite est sous saturé (IS est négatif) surtout pour l'halite (NaCl) qui se présente largement sous saturé ($-6.27 < \text{IS} < -5.15$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols surtout en profondeur, contribuant à une augmentation de la minéralisation. tous les minéraux carbonatés et évaporites, sont en maximum dans l'horizon profond (30-100 cm) où la texture argileuse associée à une CE la plus élevée avec maximum du Ca^{++} , Mg^{++} Na^+ , Cl^- , SO_4^{--} et HCO_3^-).

Profil 5- Profil sol non travaillé, non irrigué

Localisation : limite Safel Tajdid, Sidi Okba

Date de description: 11/04/2014

Végétation : Zita (*Limoniastrum guyonianum*), gtaff (*Atriplex halimus*)

Géomorphologie : plane, terrasse alluviale.

Aspect de surface : nom cultivée

Coordonnées géographiques: X : 005° 55' 40.4" Y : 34° 42' 28.5" Z : 24.2 m

Cette exploitation est située à la limite de Tajdid- Safel Tajdid, cultivée principalement par le palmier dattier ainsi que l'agriculteur fait de la plasticulture. Le sondage du sol est effectué à la tarière.

0- 20 cm : sec, Brown, friable, texture limoneux-sableuse, présence de végétation herbacée (racines), faible effervescence à HCl, non compacte et se pénètre facilement par la tarière.

20-40 cm : sec, Brown, friable, texture limoneux-sableuse, présence de végétation herbacée (racines), faible effervescence à HCl, non compacte et se pénètre facilement par la tarière.

40-60 cm : sec, Brown, friable, texture limoneux-sableuse, présence de végétation herbacée (racines), faible effervescence à HCl, non compacte et se pénètre facilement par la tarière.

60-100 cm : sec, Brown, friable, texture limoneux-sableuse, présence de végétation herbacée (racines), faible effervescence à HCl, non compacte et se pénètre facilement par la tarière

Tableau 89: Résultats analytiques du sondage 5.

Horizon (cm)	0-20	20-40	40-60	60-100
A%	13.25	11.42	8.28	9.29
LF%	35.67	25.42	27.30	41.05
LG%	31.12	30.42	27.44	28.26
SF%	17.32	27.39	33.20	19.43
SG%	2.64	5.34	3.78	1.96
texture	Limoneux-sableuse	Limoneux-sableuse	Limoneux-sableuse	Limoneux-sableuse
PH1/2,5	8.49	8.61	8.95	8.75
CE 1/5 mmhos/cm	17.41	12.69	10.47	10.35
CE PS mmhos/cm	104.1	84.7	62.8	57.5
Calcaire Total.%	27.5	28.33	29.58	29.58
Calcaire actif.%	12	9.5	10.25	10.25
Gypse %	1.46	2.15	2.15	1.46
SAR	31.44	25	22.34	22.64
ESP	45.40	35.85	31.9	32.34

Tableau 90 : Bilan ionique de la solution du sol du profil 5 non irrigué.

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-20	37.27	2.83	150.37	5.53	33.16	47.90	6.0	0.69
20-40	32.06	5.26	112.78	5.06	15.75	42.86	5.2	0.36
40-60	29.66	8.51	98.16	2.08	13.26	28.15	11.8	0.47
60-100	30.46	9.31	100.24	2.35	48.08	39.50	9.6	1.22

Interprétation

Le profil 5 est profond (100 cm limite du sable) et de réaction très basique avec un sol fortement calcaire autour de 30 %. Il est de texture limoneux-sableuse, avec un taux important de sable surtout en profondeur (40- 100 cm). Il est très salé, selon (Aubert, 1986), surtout en surface où se présente un taux peu important d'argile dont le profil salin de type A la caractérise. Selon le digramme de Riverside représente une seule classe pour tous les horizons, au-delà de classe C5S3 d'où la nécessité de trouver d'autres classes, traduisant un mouvement très fort des sels.

Selon Servant et Servat (1966), le sol a 2 types du faciès chimique il est, dans les premiers horizons (0-60 cm) sulfato-chloruré ($0.2 < Cl^-/SO_4^{2-} < 1$), et chloruré-sulfaté en profondeur (supérieur à 60 cm). Le faciès sulfaté chloruré est du à la dissolution des évaporites, selon

l'indice de saturation négatif notamment le gypse. Le report de ces horizons sur le diagramme de Piper fait ressortir la dominance des sulfates et de sodium.

Le SAR et l'ESP sont très importants dans tout le profil dépassant les seuils limites et reflètent un sol fortement sodique très riche en sodium mettre en jeux la qualité de ce sol, selon le degré d'alcalinisation d'après Servant et Servat (1966) le sol est apprécié sodique. C'est un sol salin à alcali ou sols salins- sodiques ou Solontchaks- solonetz à structure non dégradée.

Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès alterné du faciès sulfato-chloruré à chloruré –sulfaté selon la profondeur.

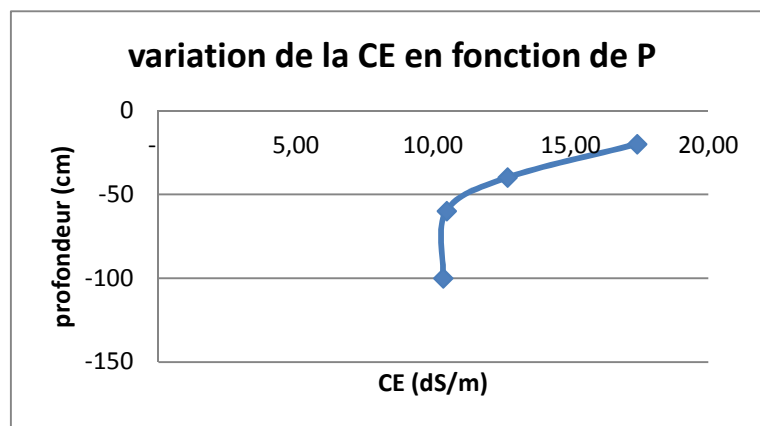


Fig.88 : Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol non irrigué du Safel Tajdid, Sidi-Okba.

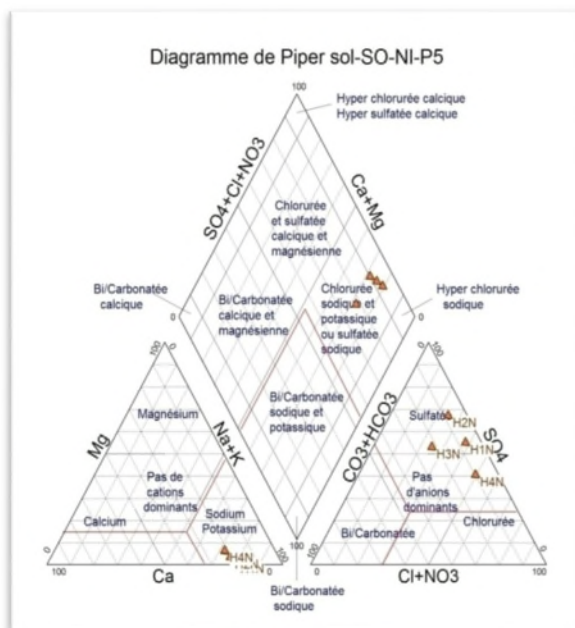


Fig.89 : Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, non cultivés de la cinquième exploitation_ Safel Tajdid ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm), horizon 3(H3N 40-60cm) et horizon

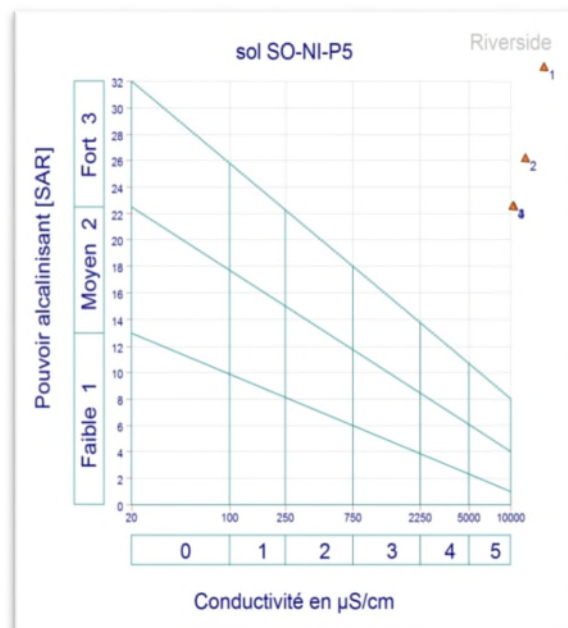


Fig.90 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, non cultivés de la cinquième exploitation_ Safel Tajdid ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm), horizon 3(H3N 40-60cm)

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué :

Le calcul des indices de saturation (Tableau 91) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturée pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 91: Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P5.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1N	-4.15	-0.06	-0.27	1.68	1.83	2.67
H2N	-4.58	-0.11	-0.32	1.69	1.83	3.01
H3N	-4.70	-0.29	-0.51	2.26	2.40	4.41
H4N	-4.15	-0.18	-0.40	2.02	2.16	3.95

Tableau 92 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la cinquième exploitation_ Safel Tajdid.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-4.7	-4.15	-4.40	0.29
IS gypsum	-0.29	-0.06	-0.16	0.10
IS anhydrite	-0.51	-0.27	-0.38	0.10
IS aragonite	1.68	2.26	1.91	0.28
IS calcite	1.83	2.4	2.06	0.28
IS dolomite	2.67	4.41	3.51	0.81

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol non irrigué P5 dans la plaine de Sidi Okba montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive et fort (précipitation), varié entre 1.68 à 4.41. Aussi que pour les minéraux évaporitiques ; l'indice de saturation du gypse est sous saturé proche de l'équilibre qui a une tendance de se précipiter ($-0.29 < \text{IS gypse} < -0.06$), l'anhydrite et halite sont sous saturés (IS est négatif) surtout pour l'halite (NaCl) qui est de ($-4.7 < \text{IS} < -4.15$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols surtout en surface et former une couche blanchâtre, contribuant à une augmentation de la minéralisation.

✚ **Changement du sol sous irrigation** : Le suivi du changement du sol sous irrigation a conduit à observer les résultats suivants :

Tableau93 : Résultats analytique du sondage P5.

Horizon (cm)	0-60	60-90	90-140
PH1/2,5	8.27	8.28	8.26
CE 1/5 mmhos/cm	4.44	1.36	1.48
Calcaire Total. %	22.5	31.66	29.16
SAR	2.76	2.54	2.53
ESP	2.83	2.49	2.48

Tableau 94 : Bilan ionique de la solution du sol P5.

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-60	30.06	7.29	11.96	2.31	21	38.24	4.4	0.55
60-90	4.81	4.86	5.58	0.34	20	8.40	4	2.38
90-140	5.61	4.86	5.78	0.2	15	10.92	3.8	1.38

Interprétation

Le suivi du changement du sol cultivé en palmier dattier par un sondage à la tarière fait ressortir que ce sol est profond (de 0 à 140 cm) et de réaction pH basique et presque homogène dans tous les horizons, le sol est de texture de (limoneux-sableuse). Il est salé en surface représenté par la classe de salinité C4S2 (30-60cm) et non salé illustrée par la classe C3S1 en profondeur (CE < 2 dS/m), selon (Aubert, 1986).

Selon Servant et Servat (1966), le sol a 2 types du faciès chimique ; il est dans le premier horizon (de 0 à 60 cm) sulfato-chloruré ($0.2 < Cl^-/SO_4^{2-} < 1$) et chloruré-sulfaté ($1 < Cl^-/SO_4^{2-} < 5$) en profondeur (supérieur à 60 cm). Le report des horizons sur le diagramme de Piper montre que les premières 60 cm ont tendance à sulfaté calcique et magnésique et de précipiter le gypse (IS gypse proche de l'équilibre -0.05), par contre l'horizon profond est chloruré sodique. Sachant que la qualité de l'eau d'irrigation de cette palmeraie est fortement salée avec un faciès chloruré sodique et magnésique, donc on note l'influence de cette eau sur le sol. On note que Là où il ya une irrigation par submersion, il ya un lessivage des sels en profondeur. Le profil salin est, donc, de type A ; salinisation en surface après une forte évaporation.

Le SAR et ESP de la solution du sol tient la même allure générale, Ils sont maxima en profondeur de (60-100 cm), mais ils sont sans risque de sodisation due au lessivage des sels surtout Na⁺.

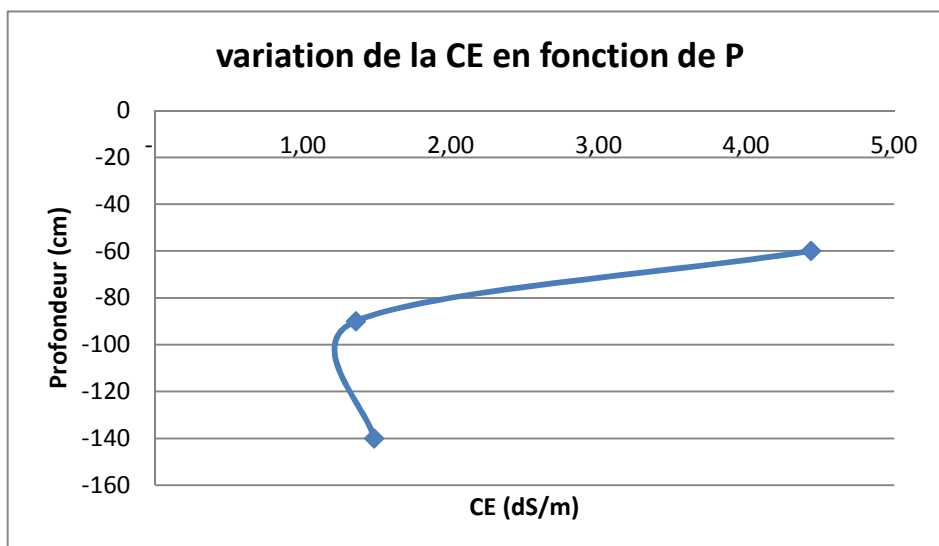


Fig.91 : Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol irrigué du Safel Tajdid, Sidi-Okba.

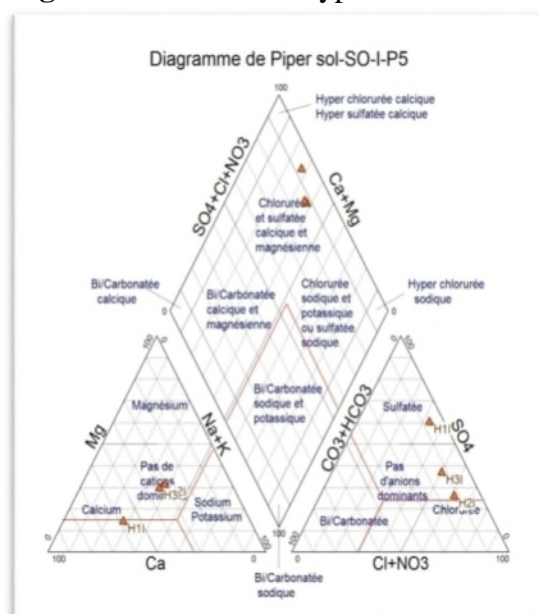


Fig.92 : Représentation sur le diagramme de Piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en palmier dattier de la cinquième exploitation_ Safel Tajdid ; horizon1 (H1N 0-60 cm), horizon 2 (H2N 60-90cm) et l'horizon 3(H3N 90-140cm).

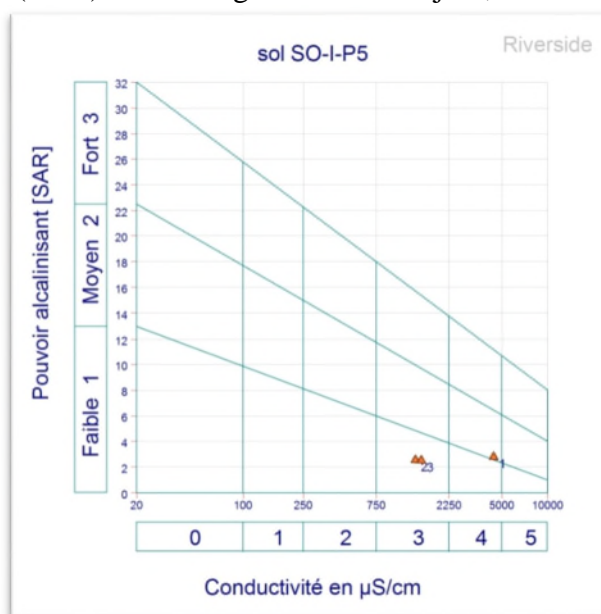


Fig.93 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en palmier dattier de la cinquième exploitation_ Safel Tajdid ; horizon1 (H1N 0-60 cm), horizon 2 (H2N 60-90cm) et l'horizon 3(H3N 90-140cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué :

Le calcul des indices de saturation (Tableau 95) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sont sous-saturées pour la

halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 95: Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués du P5.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1irr	-5.39	-0.05	-0.27	1.38	1.53	2.55
H2irr	-5.68	-1.15	-1.37	0.80	0.95	2.02
H3irr	-5.79	-0.99	-1.21	0.81	0.95	1.97

Tableau 96 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué de cinquième exploitation_ Safel-Tajdid.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-5.79	-5.39	-5.62	0.21
IS gypsum	-1.15	-0.05	-0.73	0.59
IS anhydrite	-1.37	-0.27	-0.95	0.59
IS aragonite	0.8	1.38	1.00	0.33
IS calcite	0.95	1.53	1.14	0.33
IS dolomite	1.97	2.55	2.18	0.32

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol irrigué P5 dans la plaine de Sidi Okba montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation), varié entre 0.8 à 2.55 (presque le moitié des indices du sol non irrigué). Aussi que pour les minéraux évaporitiques ; l'indice de saturation du gypse est sous saturé proche de l'équilibre pour son maximum qui a une tendance de se précipiter ($-1.15 < \text{IS gypse} < -0.05$), l'anhydrite et halite sont sous saturés (IS est négatif) surtout pour l'halite (NaCl) qui est de ($-5.79 < \text{IS} < -5.39$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols surtout en surface et former une couche blanchâtre, contribuant à une augmentation de la minéralisation. La CE est largement corrélée avec Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , SO_4^- et HCO_3^- .

Profil 6- Profil sol non travaillé

Localisation : limite Safel Tajdid -Haouche, Sidi Okba

Date de description: 11/04/2014

Végétation : Zita (*Limoniastrum guyonianum*)

Géomorphologie : plane, terrasse alluviale.

Aspect de surface : nom cultivée

Coordonnées géographiques: X : 005°55'31.9'' Y : 34°41'50.2'' Z : 8.9 m

0-15 cm : sec, texture sableux, présence de taches blanches sous forme de concrétions, moyenne effervescence à HCl.

15-60 cm : sec 10YR6/6 brownish yellow, compacte, présences des taches blanches sous forme de concrétion ou nodules à grande pourcentages et de couleur jaune rouge, peu de racine.

60- 100 cm : sec 10YR6/6, friable à la main, texture sableuse.

Tous les paramètres mesurés de ce profil sont caractérisés comme suit :

Tableau 97 : Résultats analytique du profil P6.

Horizon (cm)	0-15	15-60	60-100
A%	7.45	0.95	1.15
LF%	8.95	0.97	7
LG%	19.66	58.45	40
SF%	45.47	36.75	42.35
SG%	11.51	4.98	9.5
Texture	Sableux-limoneux	Limoneux-sableux	Sableux-limoneux
PH1/2,5	8.06	8.75	8.38
CE 1/5 mmhos/cm	14.28	10.45	7.68
CE PS mmhos/cm	133.1	76.4	42.5
Calcaire Total.%	20.96	25.07	22.60
Gypse %	7.15	1.46	1.46
SAR	20.05	18.01	13.24
ESP	28.50	25.47	18.39

Tableau 98 : Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5) du profil 06.

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-15	43.29	10.94	104.42	1.25	42	27.63	3	1.52
15-60	34.07	13.37	87.72	0.65	32	37.88	1.6	0.84
60-100	28.86	10.13	58.48	0.38	18	31.19	1.4	0.58

Interprétation

Le profil 6 est profond (100 cm limite du sable) et de réaction basique à très basique dans l'horizon médian (15-60 cm) avec un modérément taux de calcaire et pourvu du gypse en surface dû principalement à l'apport éolien surtout si la texture est sableuse. Il est de texture grossière, surtout sableuses et limoneuse, avec un taux important de sable (plus de 50 %) surtout dans l'horizon profond (60- 100 cm). Il est salé avec une concentration plus forte dans les horizons de surface (0-15 cm). Selon (Aubert, 1986), la CE de l'extrait dilué (1/5) de la solution du sol est élevée, selon le digramme de Riverside elle est représentée par une classe très salée au delà C5S4 traduisant un mouvement très fort des sels surtout pour le

sodium d'où la nécessité du lessivage et du drainage. Le profil salin est de type A ; salinisation en surface.

Le sol a 2 types du faciès chimique il est, chloruré ($1 < Cl-/SO_4 < 5$) dans le premier horizon (0-15cm) et sulfato-chloruré ($0.2 < Cl-/SO_4 < 1$), au-delà de 15 cm.

Le SAR est très élevé traduit une alcalinisation forte à intense. L'ESP est très important et plus de 15 % pour tous les horizons du profil. Ce jumelage SAR-ESP fort, met en jeux la qualité de ce sol, selon le degré d'alcalinisation d'après Servant et Servat (1966), il est apprécié à forte risque de sodisation.

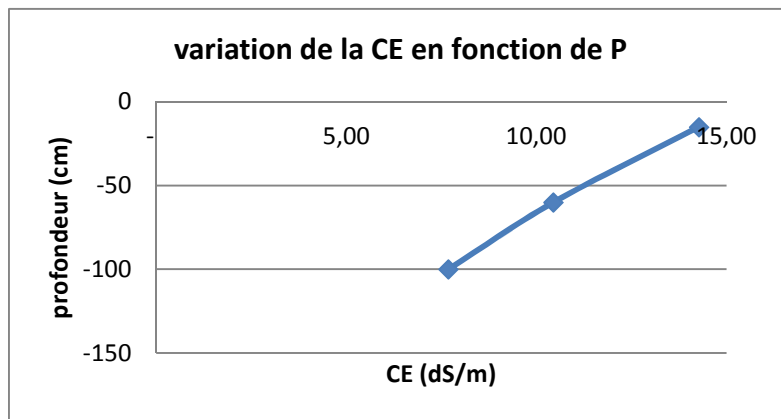


Fig.94 : Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol non irrigué limite Safel Tajdid - Haouche, Sidi-Okba.

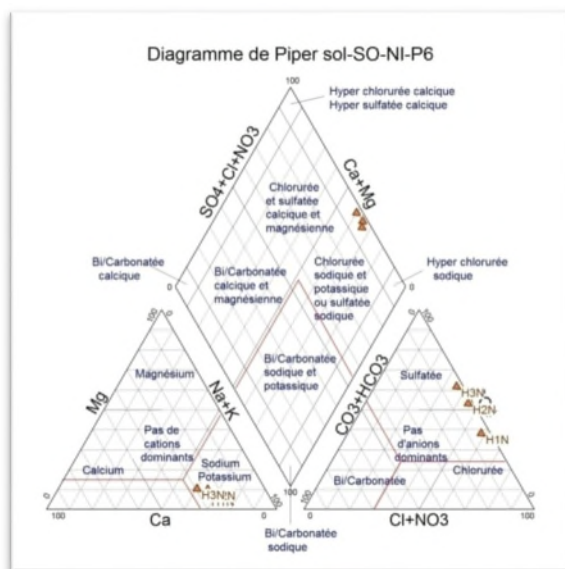


Fig.95 : Représentation sur le diagramme de Piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, non cultivés de la sixième exploitation_ Safel Tajdid-limite Haouche ; horizon1 (H1N 0-15 cm), horizon 2 (H2N 15-60cm) et l'horizon 3(H3N 60-100cm).

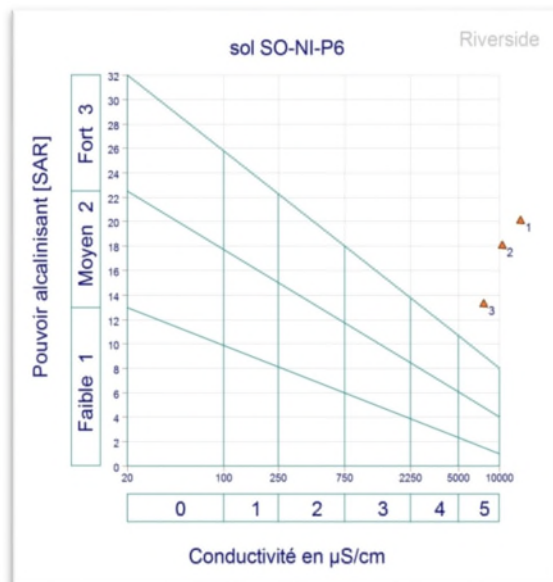


Fig.96 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués, non cultivés de la sixième exploitation_ Safel Tajdid-limite Haouche ; horizon1 (H1N 0-15 cm), horizon 2 (H2N 15-60cm) et l'horizon 3(H3N 60-100cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué :

Le calcul des indices de saturation (Tableau 99) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et est sous-saturée pour l'halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 99 : Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P6.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1N	-4.19	-0.18	-0.40	1.14	1.28	2.11
H2N	-4.37	-0.12	-0.34	1.31	1.45	2.63
H3N	-4.78	-0.19	-0.41	0.96	1.11	1.89

Tableau 100 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la sixième exploitation_ Safel Tajdid-limite Haouche.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-4.78	-4.19	-4.45	0.30
IS gypsum	-0.19	-0.12	-0.16	0.04
IS anhydrite	-0.41	-0.34	-0.38	0.04
IS aragonite	0.96	1.31	1.14	0.18
IS calcite	1.11	1.45	1.28	0.17
IS dolomite	1.89	2.63	2.21	0.38

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol non irrigué P6 dans la plaine de Sidi Okba montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation), varié entre 0.96 à 2.63. Aussi que pour les minéraux évaporitiques ; l'indice de saturation du gypse est sous saturé proche de l'équilibre qui a une tendance de se précipiter ($-0.19 < \text{IS}_{\text{gypse}} < -0.12$), l'anhydrite et halite sont sous saturés (IS est négatif) surtout pour l'halite ($-4.78 < \text{IS}_{\text{NaCl}} < -4.19$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols surtout en surface et former une couche blanchâtre, contribuant à une augmentation de la minéralisation.

🚧 Changement du sol sous irrigation

Le suivi du changement du sol sous irrigation est effectué sur une parcelle cultivée principalement en orge ajouté à une nouvelle plantation du palmier dattier. Le sondage se fait

à l'aide d'une tarière pour une profondeur de 60 cm. Les résultats analytiques sont illustrés dans le tableau suivant.

Tableau 101: Résultats analytiques du sondage P6 irrigué.

Horizon (cm)	0-20	20-40	40-60
PH1/2,5	8.48	8.49	8.44
CE 1/5 mmhos/cm	6.78	13.34	13.36
Calcaire Total. %	22.60	25.68	25.27
Gypse %	10	1.86	1.46
SAR	11.48	22.87	20.27
ESP	15.77	32.68	28.82

Tableau102 : Bilan ionique d'un extrait aqueux (rapport 1/5) de la solution du sol irrigué.

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-20	30.46	7.70	50.12	0.93	6	36.10	3	0.17
20-40	32.46	10.94	106.51	0.86	41	53.92	1.6	0.76
40-60	35.27	17.82	104.42	0.67	41.1	53.03	1.4	0.77

Interprétation

Le suivi du changement du sol cultivé en orge par un sondage à la tarière fait ressortir que ce sol est de réaction pH basique et presque homogène dans tous les horizons, le sol est de texture (limoneux-sableuse). Il est salé en surface représenté par la classe de salinité C5S4 (0-20cm) à excessivement salé en profondeur, selon (Aubert, 1986). Le profil salin est de type B due principalement à un processus descendant de la salinité sous l'influence de l'irrigation.

Selon Servant et Servat (1966), le sol a un seul type du faciès chimique qui est sulfato-chloruré ($0.2 < Cl^-/SO_4^{2-} < 1$). Le report des horizons sur le diagramme de Piper montre que les premières 60 cm ont tendance à être sulfaté sodique et de précipiter le gypse (IS gypse proche de l'équilibre -0.03). Sachant que la qualité de l'eau d'irrigation de cette exploitation est fortement salée avec un faciès chloruré sulfaté, donc on note l'influence de cette eau sur la qualité chimique de ce sol. Lorsque le milieu est riche en calcium et relativement peu en sulfates, le salant blanc de surface peut présenter une forte teneur en chlorures de Calcium et de magnésium en même temps que le sodium. C'est le salant hygroscopique, observé en particulier sur les hauts plateaux algériens (M. Pouget), voir photo(16) de l'auteur sur la plaine de Sidi Okba.

Après l'irrigation les deux paramètres d'évaluation de la sodicité du sol restent élevés surtout pour l'horizon médian (20-40 cm) là où se concentre le maximum du système rhizosphère ; le SAR est très élevé traduit une alcalinisation forte à intense. L'ESP est très important et plus de 15 % pour tous les horizons du profil. Ce jumelage SAR-ESP fort, met en jeux la qualité

de ce sol, selon le degré d'alcalinisation d'après Servant et Servat (1966), il est apprécié à forte risque de sodisation. Ce sol dont le taux de sodium échangeable est supérieur à 15 % concerne les horizons où la salinité dépasse 6.5 dS/m de l'extrait dilué (1/5) de la solution du sol.

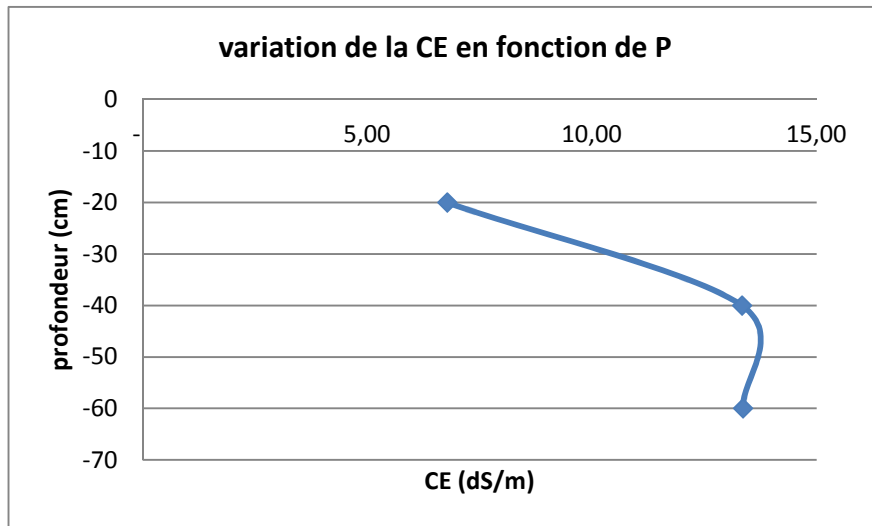


Fig.97 : Profil salin de type B selon Servant (1978) du sol irrigué limite Safel Tajdid - Haouche, Sidi-Okba.

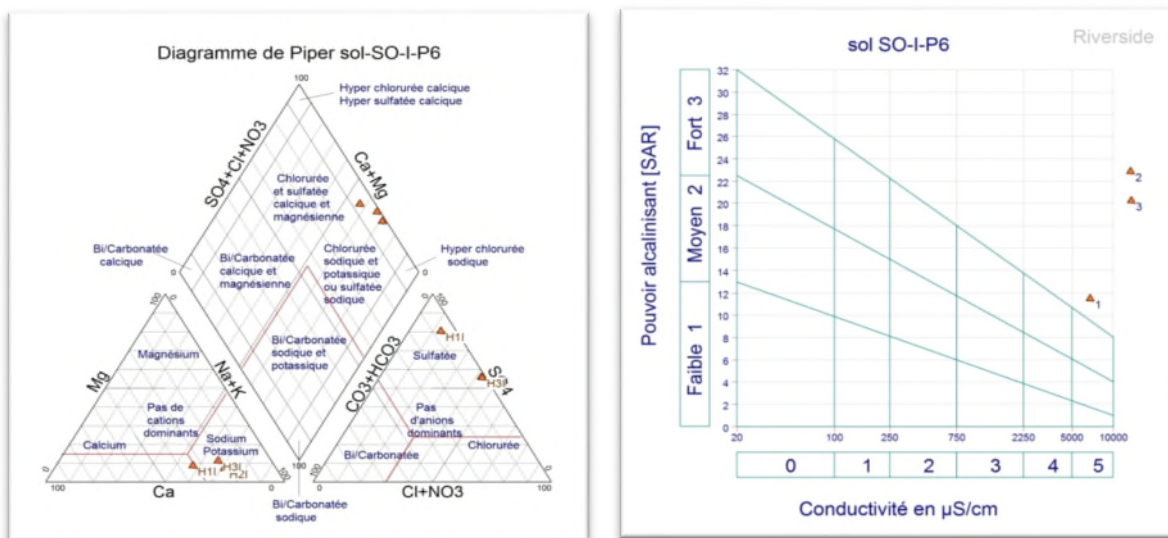


Fig.98a : Représentation sur le diagramme de Piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en orge de la sixième exploitation_ Safel Tajdid-limite Haouche ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et l'horizon 3(H3N 40-60cm).

Fig.98b : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués, cultivés en orge de la sixième exploitation_ Safel Tajdid-limite Haouche ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et l'horizon 3(H3N 40-60cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué :

Le calcul des indices de saturation (Tableau 103) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturée pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau103 : Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués du P6.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1irr	-5.32	-0.10	-0.32	1.39	1.54	2.60
H2irr	-4.20	-0.04	-0.26	1.06	1.20	2.06
H3irr	-4.21	-0.03	-0.25	0.99	1.13	2.10

Tableau 104 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué de la sixième exploitation_ Safel Tajdid-limite Haouche.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-5.32	-4.20	-4.58	0.64
IS gypsum	-0.10	-0.03	-0.06	0.04
IS anhydrite	-0.32	-0.25	-0.28	0.04
IS aragonite	0.99	1.39	1.15	0.21
IS calcite	1.13	1.54	1.29	0.22
IS dolomite	2.06	2.60	2.25	0.30

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol irrigué P6 dans la plaine de Sidi Okba montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation), varié entre 0.99 à 2.60. Aussi que pour les minéraux évaporitiques ; l'indice de saturation du gypse est sous saturé proche de l'équilibre qui a une tendance à se précipiter ($-0.10 < \text{IS gypse} < -0.03$), l'anhydrite et halite sont sous saturés (IS est négatif) surtout pour l'halite (NaCl) qui est plus dilué que dans le sol non irrigué et varie de ($-5.32 < \text{IS} < -4.20$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols surtout en surface et former une couche blanchâtre, contribuant à une augmentation de la minéralisation.

Synthèse globale des sols de la plaine de Sidi Okba (discussion et incidence sur la mise en valeur) :

L'étude du milieu de la région de Sidi-Okba, l'analyse des données pédologique et hydriques de certains travaux scientifique (thèses et rapports) ainsi que la caractérisation de six(06) profils ou solums de la région a révélé un certain nombre de contraintes et d'atouts à la mise en valeur de ces sols.

✚ Contraintes climatiques :

1. La Pluviométrie :

La faiblesse des précipitations, une observation obtenue sur la base d'une analyse des données des précipitations annuelles mesurées à la station de Biskra pour la période de 46 ans (1967/2012), montre une moyenne annuelle de 157.07mm associée à une très forte évapotranspiration (1038.89 mm), où l'ETP est sept fois la pluviométrie ($ETP=7*P$) constitue un facteur limitant pour toutes les cultures même les plus rustiques. Le recours à l'irrigation s'avère donc indispensable dans la région.

2. Le vent :

La région est très ventée. Les vents sont fréquents et répartis sur toute l'année avec des vitesses moyennes mensuelles de 4.66 m/s environ ; alors que les vitesses maximales sont enregistrées aux mois d'avril et mai (respectivement 6.15 et 5.78m/s). Il s'agit parfois de vent de sable qui constitue un agent d'érosion et d'action mécanique. D'autres fois ce sont des vents chauds, tel que le sirocco (vent brûlant très sec d'une moyenne de 58 jours/an) desséchants et provoquant des accidents physiologiques (échaudage connu surtout, selon notre enquêtes sur terrain pour les fellahs de sidi okba cultivateurs de palmiers dattiers variété Deglet Nour où leurs exploitations situées en aval avec un brise vent insuffisant, avortement, chute de fruits etc.....) Une méthode assez efficace de lutte comprend la mise en place de brise vents le plus adéquats afin de garder le maximum de l'humidité de l'air à l'intérieur des palmeraies.

3. Les températures :

La région de Biskra présente une température moyenne annuelle de 21,88°C. L'effet de continentalité est important, liée à une augmentation sensible de l'amplitude thermique .Cette forte chaleur conjuguée à une amplitude thermique très élevée, favorise une intense évaporation. Donc, Des températures très élevées qui caractérisent la région ont des

répercussions sur la demande climatique c'est à dire sur les besoins en eau des plantes qui sont augmentées, sur le fonctionnement physiologique des plantes et sur la dynamique des sels en les remontant dans la zone racinaire. En revanche, elles ont un effet favorable parce qu'elles permettent l'obtention des récoltes plus précoces étalées sur toute l'année.

Contraintes et atouts édaphiques :

1- La Topographie :

La topographie du terrain est un facteur essentiel de l'irrigation et notamment pour le choix de la méthode d'irrigation, de la conception du projet, du fonctionnement du système et du coût de l'investissement, car le nivellement du sol est une opération qui ne peut modifier la pente du terrain.

En cas d'irrigation par gravité, la conception des réseaux doit tenir compte de la topographie et de la texture du sol. C'est ainsi que plus la texture est fine et la pente faible, plus la rigole peut être longue sans qu'il y ait érosion et infiltration excessive dans la zone d'apport d'eau. En réalité à l'échelle de la région aussi bien qu'à l'échelle de l'exploitation, la topographie est favorable selon la variation de l'altitude z de 69 à 9 m.

Nous constatons une relation étroite entre la superficie du bassin versant et celles des cônes construits. En effet, l'oued Abdi, qui est à l'origine du plus grand cône de déjection du Zab oriental, accueille sur sa partie amont les villages de Seriana et Thouda, et sur sa partie aval l'oasis de Sidi Okba. Le cône de déjection qui accueille la ville de Biskra est construite par l'oued El Haï (qui devient dans sa partie aval oued Biskra). (Bougherara et Lacaze, 2009).

Par ailleurs, la combinaison de l'accumulation des matériaux en provenance des Aurès dans la plaine du Zab oriental et de la subsidence très active qui affecte la zone a permis la construction de formations alluviales récentes et actuelles sur une épaisseur dépassant les 400 m. ces formations à prédominance argilo-limoneuse sont imperméable, ce qui a rendu les eaux souterraines très loin de la surface, donc difficilement exploitable. Cette situation est restée comme un obstacle majeur pour l'exploitation agricole de cette zone, malgré l'étendue des terres cultivables régulièrement enrichies par les limons issus des épandages de crues. (Bougherara et Lacaze, 2009).

Dans toute la région, les parties centrales des bassins sont formées par une suite de vastes dépressions remplies de sédiments quaternaires (et miopliocènes par endroits), séparées par

des reliefs montagneux limités ou recoupés par des accidents transverses : des seuils (paléostructures) sur lesquels affleure le Néogène (Miocène et Pliocène).

Les massifs bordiers, tant au Nord qu'au sud de l'accident sud-atlasique, montrent des affleurements importants. Le type de l'érosion, l'absence ou la rareté de la végétation, ont permis de lever des coupes dans les sédiments siliciclastiques ou confinés sur les marges des bassins, déposées tout le long du néogène. (Chebbah, 2007).

2- La profondeur :

C'est le facteur agro pédologique le plus important pour les cultures. Dans la région, le sol est profond, il est limité par la présence d'une couche sableuse à 100 ou 150 cm selon les endroits.

3- Teneur en calcaire :

A faible taux, le calcaire est un élément favorable pour la structure notamment en conditions sodiques. Cependant à des teneurs élevées le calcaire surtout le calcaire actif (>15%) sont très défavorables à de nombreuses cultures, surtout les cultures arbustives telles que : le pommier, le poirier, le cognassier, le cerisier, le pêcher, les agrumes...En effet le calcaire actif bloque l'assimilabilité de la plupart des oligoéléments, ce qui engendre des carences ou chloroses. Par ailleurs le calcaire en grande quantité insolubilise certains éléments nutritifs et particulièrement le phosphore. Les taux en calcaire actif des sols de la région de Sidi-okba varient entre 5.25 et 17.25%, il s'agit donc de valeurs faibles à très élevées. Et les taux du calcaire total oscillent de 10 à 31.66 % selon les horizons, donc, il présente un sol fortement calcaire.

4- Le gypse :

Sa présence est détectée dans les horizons à des teneurs très variables (entre 1.46 et 7.15 %). D'une manière générale, on estime que le gypse a un effet favorable sur les sols et les cultures tant que sa teneur est inférieure à 10% (FAO, 1990). Les teneurs obtenues dans les sols de la région de Sidi Okba sont donc favorables. Source de Ca^{++} , il gêne l'adsorption de Na^+ , il est donc favorable à la structure du sol (il inhibe la dispersion et améliore la perméabilité) et à la croissance des plantes.

En effet, les teneurs en carbonates de calcium diminuent quand celles du gypse augmentent (FAO, 1990). Le gypse s'accumule en profondeur et forme des horizons gypseux suite à un lessivage puisque sa solubilité est importante, le calcaire reste dans la partie médiane du

profil, car il est très peu soluble, formant des individualisations visuelles, le gypse est toujours postérieur à la calcite (Halitim, 1984). Le gypse envahit détruit et bloque l'évolution des accumulations calcaires. La pression de cristallisation du gypse détruit les individualisations calcaires par suite de l'arrivée continue de solution sulfato-calcique, ce qui conduit à leurs précipitations.

5- La texture et structure :

La proportion de sable, de limon, d'argile déterminent la texture du sol qui influence la perméabilité, la rétention en eau qui sont des paramètres essentiels pour piloter les irrigations et notamment déterminer les doses et les fréquences des irrigations. En outre la texture du sol influence l'importance du complexe adsorbant à travers la CEC. Le sol de la région de Sidi Okba a généralement une texture assez légère sableux-limoneux.

En fonction de sa composition granulométrique et de structure, le sol peut influencer le mouvement des sels. Dans le cas de la texture sableuse, les sels sont facilement lessivés en profondeur et remontent en surface par capillarité, contrairement aux sols à texture argileuse. La texture du sol joue un rôle important dans la migration des sels due à la remontée capillaire (You et al in Djili, 2004 et Omouri, 2009). Pour Cherbuy (1991), les sols limoneux sableux sont les plus vulnérables car les vitesses de remontée sont plus importantes.

Changement du sol sous irrigation / Evolution géochimique des sols :

Tableau105 : Analyses statistiques des différents paramètres mesurés pour les sols non irrigués :

Paramètres mesurés	minimum	maximum	moyenne	écartype
CE (1/5)(dS/m)	1.48	17.41	7.16	4.33
pH 1/2.5	7.92	8.95	8.31	0.30
Gypse %	1.46	7.15	2.63	1.80
Calcaire total %	10.07	31.66	27.18	5.18
Calcaire actif %	5.25	17.25	10.55	3.86
Ca ⁺⁺ (meq/l)	6.41	43.29	26.06	9.16
Mg ⁺⁺ (meq/l)	0.41	17.82	10.39	4.82
Na ⁺ (meq/l)	2.88	150.37	49.03	45.73
K ⁺ (meq/l)	0.15	5.53	1.41	1.44
Cl ⁻ (meq/l)	10.00	48.08	25.96	12.02
SO ₄ ⁻ (meq/l)	1.68	50.54	27.75	13.95
HCO ₃ ⁻ (meq/l)	0	10.80	3.46	3.07
Cl/SO ₄	0.37	20.23	1.87	4.22
SAR	1.11	33.58	11.07	9.89
ESP %	0.37	48.59	15.16	14.69

L'examen des résultats d'analyse des paramètres physicochimiques du sol (tableau.105), montre la présence d'une salinité élevée (CE de l'extrait diluée (1/5) supérieure à 3 dS/m) pour l'ensemble des échantillons. Cette forte salinité est attribuée aux effets conjugués de la qualité de l'eau d'irrigation préalablement salée, aux conditions climatiques très arides produisant une forte évapotranspiration qui concentre la solution du sol (Cheverry et Robert, 1998), et surtout à l'absence d'un réseau de drainage. Le profil salin trouvé est de tous les types des profils salin mentionnés par Servant 1978 sont soit avant ou après l'irrigation dont le plus réponde est celui de type A indique une salinisation. Ces profils sont alternés entre salinisation(A) et résalinisation(C) passées par une désalinisation temporaire (B) ou permanente (D). Le calcaire total est présent dans tous les sols étudiés avec des teneurs qui varient entre 10.07 et 31.66%, en générale, il s'agit des échantillons peu calcaires à fortement calcaires selon l'échelle établie par Baize(1988). Quelques échantillons analysés sont pourvus du gypse mais en général le sol est dépourvu du gypse ; les teneurs varient de 1.46 à 7.15 %, il s'agit d'un sol faiblement gypsifère où $0.3\% < \text{gypse} < 10\%$, selon FAO(1990), mais il reste favorable (inférieur à 10 %). Dans l'ensemble on constate une augmentation du taux de calcaire avec une diminution du taux de gypse dans le sol.

Tous les profils sont profonds et de réaction basique (Baize, 1988) caractérisés par un pH appartient à la fourchette des pH courants pour les sols minéraux en régions arides avec une moyenne de 8.31 (normes d'interprétation du pH-eau du sol ; $7.5 < \text{pH} < 9$, Le pH est généralement basique 7.92 à très basique 8.95 selon (Mathieu et Pieltain, 2003) avec un fortement taux de calcaire total et une proportion importante de calcaire actif qui peut dépasses les 15 % selon les horizons ; seuil limite du pouvoir chlorosant. Le sol de la région de Sidi Okba est de texture fine, surtout sableux limoneuse, avec une structure lamellaire polyédrique à prismatique. Il est salé, selon l'échelle de l'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol saturé 1/5 à 25°C (Aubert, 1986), elle est non à légèrement salé ($2 \text{ mS/cm} < \text{CE} < 4 \text{ mS/cm}$) à excessivement salé ($\text{CE} > 8 \text{ mS/cm}$). Les profils salins sont réparties entre A, B et D selon Servant (1978) donc, une distribution saline présentant un maximum dans les horizons superficiels(A) et moyennement profond (B) traduisant un processus ascendant et/ ou descendant de salinisation sous l'effet de l'évaporation conjugués avec l'irrigation ou pluies.

Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique dominant des sols non irrigués est alterné entre chloruré-sulfaté et sulfato-chloruré selon la profondeur du sol et le positionnement des profils d'amont vers l'aval , la solution du sol des premières horizons (0-60 cm) est de type

chloruré-sulfaté ($1 < Cl^-/SO_4^{2-} < 5$), par contre il est de type sulfato-chloruré ($0.2 < Cl^-/SO_4^{2-} < 1$), en profondeur (à 80 cm). Le report des trois horizons sur le diagramme de piper, note la dominance de chlorure et calcium (0 à 60 cm), par contre en profondeur le sulfate et le calcium sont les plus dominants.

ESP est une fonction mathématique en fonction du SAR, et suit leur allure générale, si le SAR augmente, l'ESP augmente aussi et vis versa. Ils peuvent dépasser largement la limite conseillée (ESP >15 %).

Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès chloruré sulfaté à sulfato-chloruré en profondeur.

🚧 Changement du sol sous irrigation

Tableau106 : Analyses statistiques des différents paramètres mesurés pour les sols irrigués :

Paramètres mesurés	minimum	maximum	moyenne	écartype
CE (1/5) (dS/m)	0.73	13.36	4.03	3.69
pH 1/2.5	7.80	8.60	8.19	0.23
Gypse %	1.46	10	3.46	2.76
Calcaire total %	9.26	32.50	24.73	7.03
Calcaire actif %	0.67	18.50	11.78	6.25
Ca ⁺⁺ (meq/l)	3.21	35.27	18.60	12.13
Mg ⁺⁺ (meq/l)	4.05	24.71	9.38	5.85
Na ⁺ (meq/l)	2.72	106.51	19.29	32.21
K ⁺ (meq/l)	0.20	2.31	0.69	0.51
Cl ⁻ (meq/l)	6	41	17.32	9.78
SO ₄ ²⁻ (meq/l)	0.84	53.92	22.38	17.09
HCO ₃ ⁻ (meq/l)	1.40	11.60	4.97	2.97
Cl/SO ₄	0.17	11.90	2.30	3.04
SAR	0.69	22.87	4.52	6.46
ESP %	1.27	32.68	4.52	9.19

L'examen des résultats d'analyse des paramètres physicochimiques du sol après la mise en irrigation des cultures cultivées selon chaque exploitation, (tableau106), montre un changement bien considérable dans tous les paramètres; la présence d'une salinité élevée (CE de l'extrait diluée (1/5) supérieure à 3 dS/m) pour l'ensemble des échantillons. Cette forte salinité est attribuée aux effets conjugués de la qualité de l'eau d'irrigation préalablement salée, aux conditions climatiques très arides produisant une forte évapotranspiration qui concentre la solution du sol (Cheverry et Robert, 1998), et surtout à l'absence d'un réseau de drainage. Le profil salin trouvé est de tous les types des profils salin mentionnés par Servant 1978 après l'irrigation dont le plus répandu est celui de type A indique une salinisation comme résultat final des sols mis en irrigation. Ces profils sont alternés entre salinisation(A)

et résalinisation(C) passées par une désalinisation temporaire (B). Le sol reste bien sûr calcaire dont Le calcaire total est présent dans tous les sols étudiés avec des teneurs qui varient entre 9.26 et 32.50%, en générale, il s'agit des échantillons peu à fortement calcaires selon l'échelle établie par Baize(1988). Le pH est généralement basique 7.80 à très basique 8.60. Quelques échantillons analysés sont pourvus du gypse surtout en aval de la région d'étude, mais en général le sol est dépourvu du gypse ; les teneurs varient de 1.46 à 10 % ,il s'agit d'un sol faiblement gypsifère où $0.3\% < \text{gypse} < 10\%$, selon FAO(1990), mais il reste favorable (inférieur à 10 %). Dans l'ensemble on constate une augmentation du taux de calcaire avec une diminution du taux de gypse dans le sol.

Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique dominant des sols irrigués est alterné entre chloruré-sulfaté et sulfato-chloruré selon la profondeur du sol et le positionnement des profils d'amont vers l'aval , sachant que un faciès de salinité du sol chloruro-sulfaté largement représenté dans les régions arides est constitué de sels à réaction proche de la neutralité, très solubles, donc très mobiles et susceptibles de se concentrer fortement sous ces climats ; ils sont constitués de chlorures dominants, sodiques, calciques ou magnésiens, associés à des sulfate. (Bouteyre et Loyer, 1992).

ESP est une fonction mathématique en fonction du SAR, et suit leur allure générale, si le SAR augmente, l'ESP augmente aussi et vis versa. Ils peuvent dépasser largement la limite conseillée ($\text{ESP} > 15\%$).

Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès chloruré sulfaté à sulfato-chloruré en profondeur.

On conclut que dans la région d'étude existe 2 type du sol **Sols salés à structure non dégradée :**

- **En amont**, Garta-faidh elghareg-Tajdid-Mangae bougtaf : Sols salins ou « solontchaks » : dont la salinité globale déterminée sur pâte saturée est supérieure à 4 mmhos/cm à 25°C (classification américaine) ou à 7 mmhos (CPCS, 1967) et l'ESP inférieur à 15% (classification américaine) et à 10 % (CPCS, 1967). **On note que un fellah nous dise qu'il ya un proverbe reflète la qualité appréciable du sol de la région : un bon sol est dans nfidha, faidh ekghareg et kak kfouf.(c'est-à-dire cette région mentionnée).(photo06,09).**

- **En aval**, limite Safel Tajdid-Haouche dans les profils 5 et 6 : a partir du profil 5, la qualité chimique du sol est changée où on note SAR et ESP très élevés ; Sols salins à alcali ou sols salins- sodiques ou solontchaks-solonzets : dont la salinité globale est supérieure à 4 ou 7 mmhos/cm et l'ESP est supérieure à 10 ou 15%.(photos10,11).

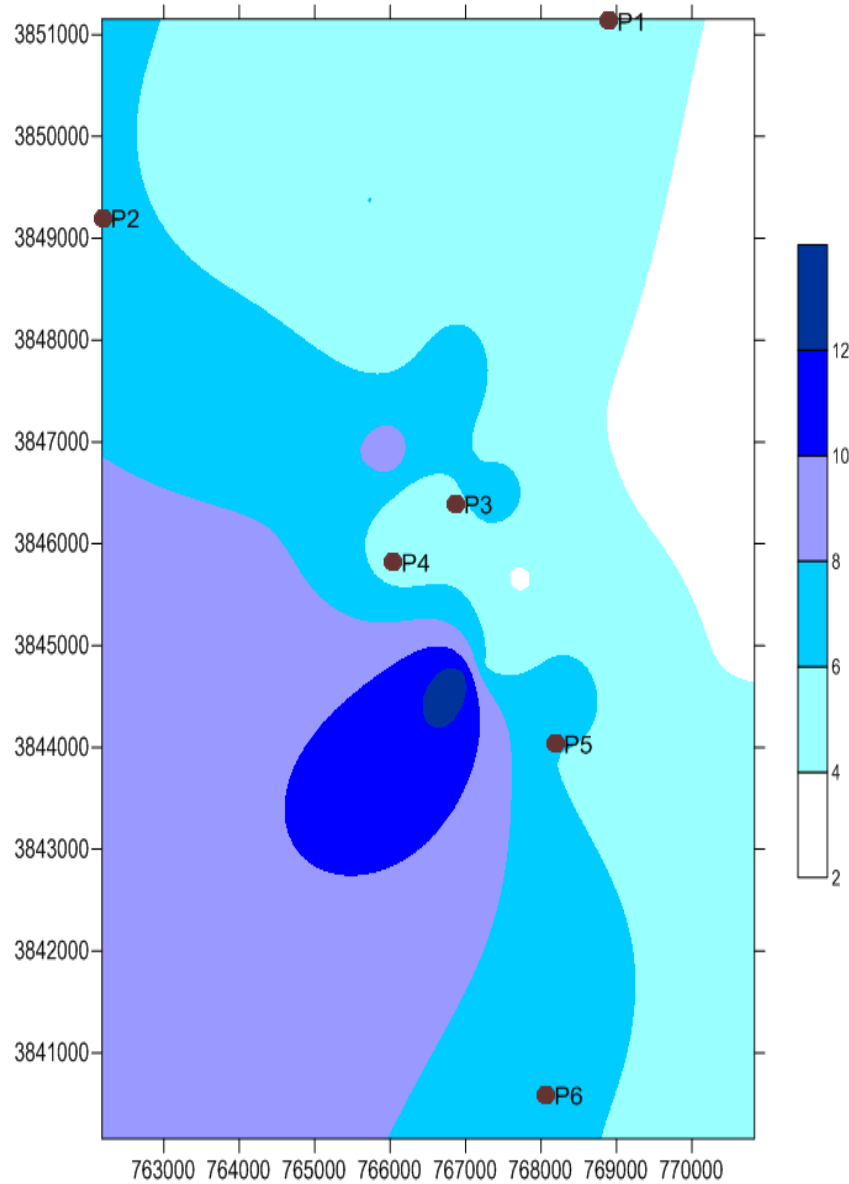


Fig. 99 : Carte de positionnement des profils du sol sur la carte de salinité (CE dS/m) des eaux des forages de la région de Sidi okba.

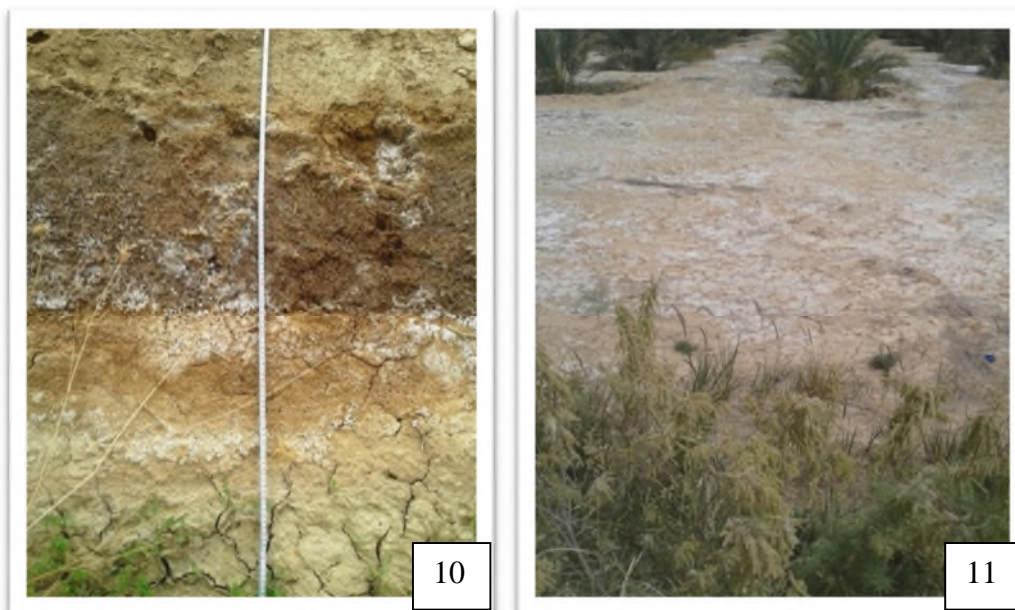


Photo 10: Profil d'un sol salé sous l'influence de l'irrigation ; l'horizon médian est le plus influencé par le sel. (Auteur, 2014).

Photo11 : L'état de surface envahie par les sels-sol salin (sol Solontchaks -fech-fech) et les plantes halophytes (tamarix-sueda) d'une palmeraie à l'extrême sud de la région d'étude Sidi okba (safel tajdid-limte haouche). Le sel (sodique en particulier) remonte par ascension capillaire et va cristalliser en surface et recouvrir les terres irriguées sous forme souvent des efflorescences blanches en surface. (Auteur, 2014).

VIII-2- Sol de la région de Bordj Ben Azouz -Zab Gharbi ; nappe des calcaires.

🚧 Présentation et description de la zone d'étude :

La région de Bordj Ben Azouz, qui nous intéresse dans notre recherche, a une superficie agricole utile SAU de 1666 ha (0.9% de SAU totale de Biskra). Zone à vocation phoeniculture, (statistique de 2012 ; 4800000/17000000, amendés par les statistiques de Messak2016 ; montre qu'il existe 5600.000 palmiers dattiers à Biskra/18600000 en Algérie). A peine masquées par un peu de sables ou couronnées par le « debdeb », ces alluvions s'étalent dans la partie occidentale des Ziban (Zab Gherbi), et constituent la vaste plaine d'El-Amri, entre Tolga et Doucen. Elles sont parfois argilo-calcaires ; ces sols sont particulièrement fertiles assurent une bonne production des cultures de maraichage et des dattes surtout la variété Deglet Nour. Les sols gypseux ou « debdeb » sont les témoins de

l'extension des sols salés après dissolution et entraînent des sels solubles vers le bas-fond ; la présence du gypse dans le Bas-Sahara serait la preuve de l'existence ancienne d'une grande zone salée, qui s'étendait vers le Sud jusqu'à Touggourt. (Durand, 1988). Les sols gypseux peuvent être cultivés après que la croûte dure est brisée, permettent de produire de bonnes récoltes.

Le système d'irrigation gravitaire par séguia est le plus pratiqué par rapport aux autres (goutte-goutte ou aspersion). La répartition de la surface irriguée par système d'irrigation (selon PMH 2010 en ha) est comme suit :

Tableau 107 : La superficie irriguée dans la région de Bordj Ben Azouz.

Mode d'irrigation	Gravitaire	Aspersion	Goute goutte	à Total irrigué (ha)	SAU (ha)
Superficie irriguée (ha)	1550	0	87	1637	1666

Notre étude est effectuée au niveau de quatre stations choisis selon les critères suivants :

- la topographie et reliefs ;
- la présence d'eau (irrigation par puits principalement ainsi que forage),
- le réseau du drainage,
- la profondeur du sol et la présence de la croûte,
- l'état de la salinité et hydromorphie en surface.

Ces critères nous permet de localiser 4 sites :

- 1) site 1 ; d'une palmeraie de Paul ozval existe depuis 1923 ; irrigué par puits,
- 2) site2 ; la palmeraie de Khaled Laejal et ses frères planté depuis 2001 dans le cadre de FNDA, irriguée par puits et forage, et suivi d'un sol non cultivé près d'un réseau du drainage (principale et secondaire) :

Chmora (Foughala, Bordj, Elghrous) → Ghadar → Ezarga → Lioua
 Sehaira → oued Djedi.

- 3) site3 ; Le troisième point c'est Bir attia, là où il ya une nappe phréatique proche de la surface (profondeur 1m).

Là où il ya un sol à texture fine aussi que les signes de l'hydromorphie (sol Gley), pour répondre à ce type de problème, le fellah apporte du sable à une dose d'un camion (12 tonnes)

pour chaque 4 pieds du palmier dattier avec une fréquence de 5ans. Le sable est à texture grossière pour le but de retarder ou bloquer la remonté capillaire.

- 4) Site4 ; Le quatrième point est la zone d'accumulation des eaux du drainage, une dépression chotteuse Ezerga ; **constitue l'exutoire nature de la nappe phréatique provient par le réseau du drainage.**

C'est une zone de dépression, elle est caractérisée par un sol nu dépourvu de végétation au centre avec une hydromorphie permanente (sol Gley de couleur vert et gris) où le niveau de la nappe phréatique est à la surface, ensuite elle est entourée par une végétation spontanée de type halophyte comme *Salicornia fruticosa* (chénopodiacées), *Aeluropus littoralis* (poacées) , peu d'atriplex (*Atriplex halimus*) (chénopodiacées) , puis une végétation cultivée spécifique ; le palmier dattier. Behour. — On doit appeler l'attention sur les dispositions spéciales qu'affectent certains de ces points d'eau; ce sont tout d'abord les behour (bahr), petits lacs correspondant à des gouffres, comme ceux que l'on rencontre dans l'Oued Righ et dans le Zab central (près Hammam-Selam). Ezerga— Source située au Sud-Sud - Ouest de EI-Bordj ; à 3 kilomètres environ. Elle forme un petit lac de 60 à 70 mètres de diamètre avec rebord périphérique de terre édifié par les habitants de Lioua pour utiliser l'afflux d'eau d'hiver plus considérable. Profondeur inconnue. (Anonyme, 1908). Sachant que les lacs ou ces zones de dépression c'est eux qui gardent le système en équilibre (zone d'accumulation des sels viennent des palmeraies à travers un réseau du drainage efficace).

Dans cette étude, une dizaine d'échantillon d'eau destinés à l'irrigation des terres agricoles cultivées principalement en palmier dattier dans les lieux de Chmora, Ferme Paul Ozval, ferme Taleb Ahmed, Magtoufa, Ezerga, Bir attia ont été sélectionnés durant la campagne agricole 2014. Les eaux d'irrigation proviennent de double exploitation, principalement des eaux des puits de la nappe phréatique, ensuite viennent les forages. Deux modes d'irrigation (localisé pour les jeunes palmiers et gravitaire pour celles âgés) sont pratiqués dans cette région; les techniques de plantation des palmiers dattiers sont en tranché pour les palmiers âgés et planche pour les jeunes associées à des strates arbustes comme l'oranger, figuier, grenadier, vigne et une strate herbacées par l'orge(joue un rôle d'éponge) et la luzerne(engrais vert ou aliment de bétail), la plantation se fait après la cassure de la croute gypso-calcaire « debdeb » située à une profondeur de 2 à 4 m .

La collecte des eaux du drainage semble est plus que nécessaire afin de connaitre et contrôler le bilan salin de l'eau et du sol.

Entrée eau → lessivage et drainage → sortie eau

Autrement dit, de point de vue agronomique, le périmètre oasisien est formé par deux types de sols : des sols cultivés donc irrigués à l'intérieur de palmeraie et des sols non cultivés donc non irrigués à l'extérieur. (Askri et Bouhlila, 2010).

VIII-1- 2- Résultats et discussion : caractérisation et qualité des sols sous irrigation:

🚧 **Historique Site 01** : Le premier point est la palmeraie de Paul Ozval (Taleb Ahmed).

Paul Ozval, gérant des exploitations agricoles de Foughala, Bordj ben Azouz et d'El-Amri (Elghrouss). C'est lui qui construit le château à l'intérieur de la palmeraie en 1923 avec une architecture très développée et l'utilisation des ressources naturelles locales 100% (pierres des montagnes et les déchets du palmier dattiers (troncs (stipe), palmes, seaf (feuilles)). L'architecture de château se caractérise par la non arrachage d'aucun pied du palmier malgré qu'il a une superficie de 2000 m² et plus d'une dizaine de chambres acclimatées avec le climat aride de la région. Il contient beaucoup de magasins : pour les dattes, fruits et légumes, élevage des vaches (le fournisseur quotidien de l'hôpital Biskra Hakim Saadane par le lait), élevage des ovins, élevage de volaille, jus des dattes et ghars et autres dgoul, élevage des cochons (khinzir) qui persiste trouvable jusqu'à l'heure actuelle. Elle a trois sources d'eau : Ain Barka, Ain Souzi (le nom de fille du colonel), Ain Sari pompe à travers l'énergie des vents. Type des arbres fruitiers : polycultures ; 12000 palmiers dattiers de toutes variétés avec une hauteur de 25 m de stipe, oranger, figuier, olivier avec une variété rare nommée datte.

La production des dattes est très bonne avec une diversité biologique extraordinaire où un rendement de 80 kg net /palmier dattier. Avec l'âge de 90 ans, la régénération des palmiers est prise en place. La région est plane et bien nivelée, la terre se caractérise par un très bon état et leur choix par le colonel ne vient pas au hasard, il fait tous les analyses du sol. La région a été inerte de toute culture sauf la zone d'Améri (ElGhrouss) et Zaâtcha (Lichana).

Elle contient 12000 palmier dattier datée depuis 1923, source d'eau est (Ain Suzie) à une profondeur de 85 m ; ces palmier est en bon état. Elle contient aussi d'autres espèces mais sous forme intercalaire comme : abricotier, mandarine, oranger, olivier, genévrier, bombo (khaysoran), figuier, bananier. (Cataldo, 1988). (photo12).

Sa situation géo référenciée est comme suit : N 34° 42' 45.9'', E 005° 19' 45.0'', Z 139.9m.



Photo 12: Palmeraie de Ozval (Bordj ben Azouz) montre la régénération des anciens palmiers dattiers. (Auteur, 2014).

Profil 01 :

Nom : palmeraie de Paul Ozval(P3sur carte)(photo13).

Situation géographique: bordj -ben- Azzouz-daïra tolga

Coordonnées géoreferenciemment : N 34°42'45.9'', E 005°19'45.0'' Alt 139.9m

Conditions climatiques : temps ensoleillé

Topographie : plane

Géomorphologie : glacis

Géologie : alluvions

Aspect de surface : croûte

Végétation : palmeraie, nombre de palmiers : 12000 palmiers dattiers

Age : depuis 1923

Rendement : 80 kg/ palmier dattier

Autres spéculations : abricotier, mandarine, oranger, olivier, genévrier, bombo (khaysoran), figuier, bananier.

Système Irrigation : Seguia (planche)

Source d'irrigation : puits, profondeur de 6 m.

Profondeurs cm)	Description morphologique
0-24	Sec, (5 YR 7/4 sec), sableuse, forte effervescence généralisée à l'HCl, matière organique faible, meuble, polyédrique, tâches blanchâtres peu nombreuses, traces d'activité peu nombreuse (coquilles), racines peu nombreuses de taille fines, poreux, limite ondulée, transition peu nette.
24-73	Sec, (5 YR 5/4 sec), sableuse à sablo-limoneux, forte effervescence généralisée à l'HCl, absence de matière organique, peu compact, polyédrique, tâches blanchâtres très peu nombreuses, traces d'activité peu nombreuse (charbon de bois), absence de racines, peu poreux, limite

	régulière, transition nette.
73-130	Sec, (5 YR 7/3 sec), sableuse, forte effervescence généralisée à l'HCl, matière organique faible, peu compact, polyédrique, absence de tâches blanchâtres, traces d'activité peu nombreuse (racines décortiquées), racines peu nombreuses de taille moyenne, peu poreux, limite ondulée, transition nette.
130-210	Sec, (5 YR 7/4 sec), Limono-argileux, forte effervescence généralisée à l'HCl, matière organique moyenne, très compact, sur structure massive à sous structure polyédrique, tâches blanchâtres assez nombreuses, traces d'activité peu nombreuse (racines décortiquées), racines assez nombreuses de taille moyenne, peu poreux, limite ondulée, transition nette.
> 210	Frais, (5 YR 7/4 sec), Limono-sableux, forte effervescence généralisée à l'HCl, absence de matière organique, compact, sur structure massive à sous structure polyédrique, tâches blanchâtres peu nombreuses, traces d'activité peu nombreuse (charbon de bois), absence de racines, non poreux.



Photo13 : Profil ou solum de bordj ben Azouj (ferme Paul Ozval). (Prise, CRSTRA, 2014)

Ce profil(photo13), est retenu comme sol de référence. La description d'un profil pédologique a permis de caractériser 5 horizons. Leur résultats analytiques sont portés dans les tableaux suivants :

Tableau 108 : Analyse des paramètres physico-chimique du profil 1-BBA.

Horizon (cm)	0-24	24-73	73-130	130-210	> 210
L+A	11.20	10.63	5.01	17.35	
SF	59.76	50.42	56.78	42.68	
SG	28.83	38.72	37.04	39.46	
pH 1/2.5	7.8	7.6	7.7	8	7.5
CEe (mS/cm)	4.56	45.2	46.6	107.6	41.3
Calcaire total %	21.32	25.01	24.6	23	18.86
Gypse %	24.16	2.15	14.28	17.55	18.50
SAR	0.001	20.26	21.70	87.46	40.94
ESP	0	28.81	30.94	128.57	59.51

Tableau109 : Bilan ionique de la solution du sol du profil pédologique de la palmeraie Ozval (Bordj ben Azouz)

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻⁻	HCO3 ⁻	
0-24	30.07	329.06	----	1.04	50	252.48	30	0.20
24-73	205.41	179.21	281.01	20.96	520	206.88	50	2.51
73-130	154.31	174.15	278.04	6.19	610	243.36	26	2.51
130-210	49.1	116.44	795.65	1.14	1530	1008.96	36	1.52
>210	44.09	116.44	366.77	0.48	480	836.36	40	0.57

Interprétation

Les sols des oasis et de leur environnement sont soumis à un certain équilibre de salure qui est en fonction de la quantité, de la nature et de la fréquence des apports d'eau d'irrigation d'une part, et des conditions de drainage d'autre part ; dans la plupart des cas, ils sont caractérisés par un encroustement gypseux ou gypso calcaire. (Dutil, 1971). Le sol est fortement gypseux pour tous les horizons sauf pour l'horizon médian (24-73cm) où il est faiblement gypsifère (FAO, 1990), avec forte présence du calcaire total ce qui conduit à un sol gypso-calcaire. Selon Dubost(2002), et dans les Ziban, où les eaux sont plutôt moins salées et plus calcaires, il se forme habituellement deux horizons distincts, l'un gypseux entre 50 et 110 cm de profondeur (le deb-deb) et l'autre calcaire entre 110 et 150 cm (l'oglat), dans la zone de fluctuation de la nappe phréatique. Dont les agriculteurs de la région de Tolga (surtout la localité de Bordj ben Azouz selon notre observation sur le terrain) plantent les palmiers au contact de la nappe en pratiquant des cuvettes individuelles qu'ils creusent en extrayant ces couches indurées. Sachant que, Le gypse envahit détruit et bloque l'évolution des accumulations calcaires. La pression de cristallisation du gypse détruit les individualisations calcaires par suite de l'arrivée continue de solution sulfato-calcique, ce qui conduit à leurs précipitations. Le gypse s'accumule en profondeur et forme des horizons gypseux suite à un

lessivage puisque sa solubilité est importante, le calcaire reste dans la partie médiane du profil, car il est très peu soluble, formant des individualisations visuelles, le gypse est toujours postérieur à la calcite (Halitim, 1984). Les pourcentages de calcaire total que le gypse sont proches surtout en surface et au delà de 70 cm de profondeur.

Le faciès chimique du sol est hyper sulfaté sodique. Les sels solubles qui contiennent ce profil sont dans l'ordre suivant : pour l'horizon de surface (0-24 cm) : magnésium, sulfate ensuite les chlorures et en portions égaux les bicarbonates et le calcium viennent essentiellement de la dissolution du gypse (taux du gypse présent est de 24.16% et calcaire 21.32%).

La CE augmente en fonction de la profondeur du sol, mais au delà de 210 cm elle diminue près de la nappe phréatique (voir photo 18), cela explique par une double source de la salinité l'une descendante vient des eaux d'irrigation et l'autre ascendante originaire de la remontée capillaire de la nappe phréatique. Donc, elle a un profil salin de type B, selon Servant et Servat, 1966. On tient ce profil comme sol de référence, non irrigué près de la nappe à (3.5 à 4 m) Les 5 horizons sont à faciès sulfaté sous l'influence de la dissolution de la croûte gypso-calcaire debdeb et magnésique pour l'horizon de surface (présence de dolomie) et sodique et potassique pour le reste des horizons sous l'influence de la qualité des eaux d'irrigation (puits et forage).

Le profil I de la ferme Paul Ozval est profond (plus de 210 cm) et de réaction pH neutre à basique (Baize, 1988) caractérisé par un pH appartient à la fourchette des pH courants pour les sols minéraux en régions arides (normes d'interprétation du pH-eau du sol ; $7.5 < \text{pH} < 9$) selon (Mathieu et Pieltain, 2003). Ce sol est généralement modérément calcaire (18 % à 25 %), selon Baize(1988) et gypseux (2.15% à 24.16 %) (FAO, 1990). Il est de texture fine et surtout sableuse –limoneuse favorable à l'infiltration de l'eau et le transfert des solutés, avec une structure polyédrique à prismatique. Il est salé à extrêmement salé avec une conductivité électrique, selon l'échelle de l'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la pâte saturée à 25°C (USSSL, 1954), elle augmente en profondeur. Selon le digramme de Riverside, tous les horizons sont classés comme C5S4 et plus sauf pour le premier horizon C5S1. Donc, une concentration plus forte dans les horizons médians et profonds du profil traduisant un mouvement des sels descendant. Donc, tous les horizons ont une salinité très excessive au delà de la class C5 proposé par USSSL(1954) et modifié par Durand (1958) et ne peuvent pas être illustrés sur ce diagramme d'où la nécessité de proposer d'autres classes.

Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique de la solution du sol du premier horizon (0-24 cm) est de type sulfaté ($0 < Cl^-/SO_4^{2-} < 0.20$), par contre, dans les horizons médians (24cm à 210cm) il est chloruré-sulfaté ($1 < Cl^-/SO_4^{2-} < 5$), il devient sulfato-chloruré ($0.2 < Cl^-/SO_4^{2-} < 1$), en profondeur (>210 cm). Le report des trois horizons sur le diagramme de piper note la dominance de sulfate, chlorure, calcium, magnésium et sodium, c'est-à-dire tous les minéraux évaporitiques et carbonatés.

A l'exception du premier horizon, l'ESP et le SAR, suivent même allure générale, pour tous le reste des horizons de ce profil, le SAR est très élevé traduit une alcalinisation forte à intense. L'ESP est très important et plus de 15 %. Ce jumelage SAR-ESP fort, met en jeu la qualité de ce sol, selon le degré d'alcalinisation d'après Servant et Servat (1966), il est apprécié à forte risque de sodisation. Selon la classification de Riverside, le SAR est presque nul pour l'horizon de la surface, mais il augmente en profondeur et atteint son maximum dans l'horizon 4 (130-210 cm) d'où vient le faciès sulfaté sodique et potassique. On peut lire même allure générale pour la CE.

Il s'agit donc d'un Sols salins à alcali ou sols salins- sodiques ou Solontchaks- solonetz à structure non dégradée avec un faciès sulfaté en surface et chloruré sulfaté à sulfato-chloruré en profondeur.

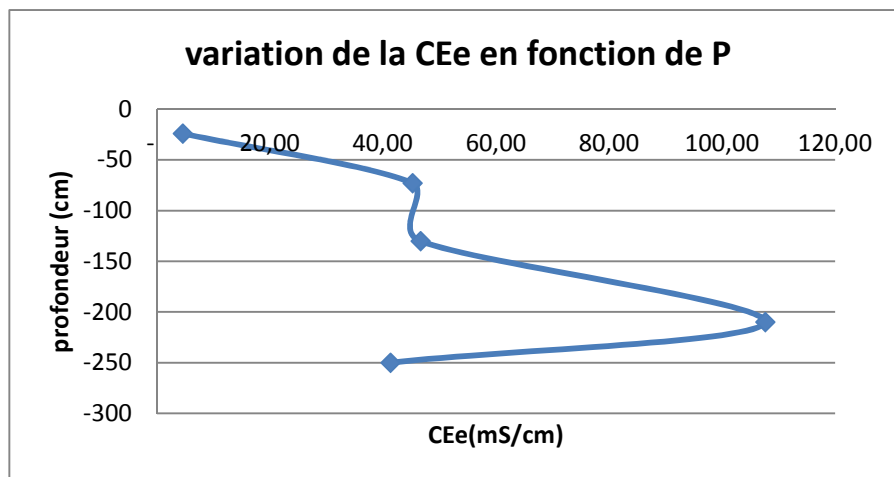


Fig. 100: Profil salin de type B selon Servant (1978) du sol non irrigué de Bordj ben Azouz.

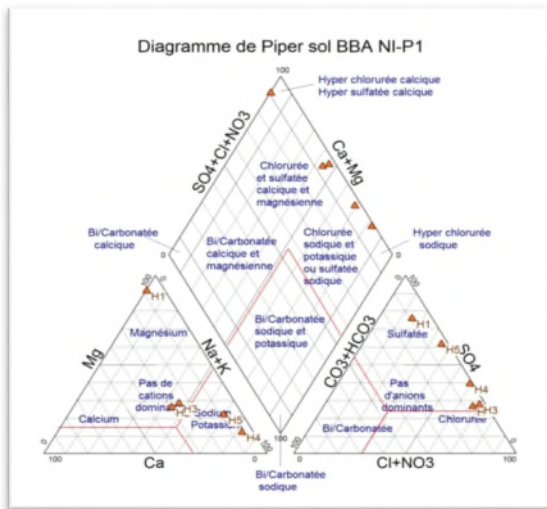


Fig.101 : Représentation sur le diagramme de piper des solutions du sol non irrigués, cultivés en palmier dattier de la ferme Paul Ozval-BBA de cinq horizon ; horizon1 (H1N 0-24 cm), horizon 2 (H2N 24-73cm), horizon 3(H3N 73-130cm), horizon 4 (H4N 130-210cm) et horizon 5 (H5N >210 cm).

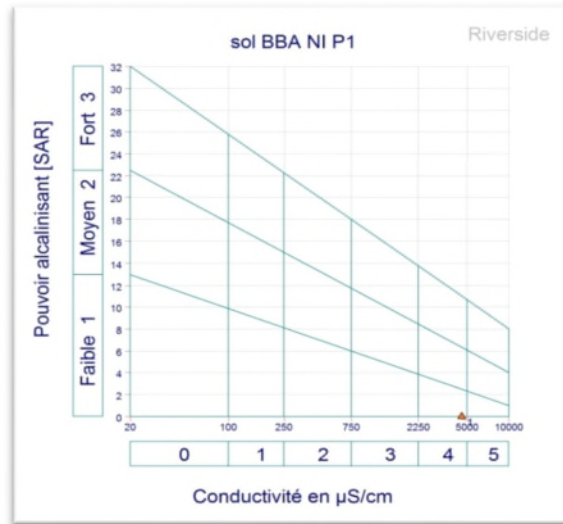


Fig. 102 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions du sol non irrigués, cultivés en palmier dattier de la ferme Paul Ozval-BBA de cinq horizon ; horizon1 (H1N 0-24 cm), horizon 2 (H2N 24-73cm), horizon 3(H3N 73-130cm), horizon 4 (H4N 130-210cm) et horizon 5 (H5N >210 cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué :

Le calcul des indices de saturation (Tableau 110) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et notamment le gypse et sous-saturées pour l'halite et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés ajoutés aux gypses sont susceptibles de se précipiter par contre les deux minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 110: Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P1 de bordj Ben Azouz.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1N	-8.21	0.06	-0.15	1.38	1.52	4.21
H2N	-2.76	0.72	0.52	2.21	2.36	4.82
H3N	-2.70	0.70	0.50	1.91	2.06	4.32
H4N	-1.79	0.66	0.49	1.78	1.92	4.36
H5N	-2.73	0.54	0.34	1.19	1.34	3.21

Tableau 111 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué du P1 de bordj Ben Azouz.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-8.21	-1.79	-3.64	2.59
IS gypsum	0.06	0.72	0.54	0.28
IS anhydrite	-0.15	0.52	0.34	0.28
IS aragonite	1.19	2.21	1.69	0.41
IS calcite	1.34	2.36	1.84	0.41
IS dolomite	3.21	4.82	4.18	0.59

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol non irrigué P1 dans la plaine de Bordj Ben Azouz montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3) ainsi que le **gypse** $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation) et varié entre 1.19 à 4.82, sachant que la quantité importante de magnésium en solution amène la solution à la sursaturation vis-à-vis de la dolomite en premier lieu et en grande quantité ($3.21 < \text{IS}_{\text{dolomite}} < 4.82$). Ajouter aux ces minéraux carbonatés, les minéraux évaporitiques comme le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est sur saturé avec IS positive traduisant une forte précipitation du gypse dans le sol ($0.06 < \text{IS}_{\text{gypse}} < 0.72$), surtout dans les horizons médians (24-210 cm) où se trouve la croûte gypso-calcaire surtout avec une nappe saturée ou proche de la saturation vis-à-vis du gypse (voir partie eau). Ainsi que pour l'anhydrite qui a un IS positive pour tous les horizons sauf en surface, conduit à leur tour à se précipiter surtout en profondeur. Par ailleurs, l'indice de saturation d'halite (NaCl) est négative, se présente largement sous saturé ($-8.21 < \text{IS} < -1.79$) surtout en profondeur (>24 cm), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols contribuant à une augmentation de la minéralisation. On remarque aussi quand l'indice de saturation d'halite proche de l'équilibre, l'indice de saturation de gypse augmente et devient positive conduit à sa précipitation.

Dans une solution saturée en gypse et en calcaire, une élévation de la tension CO_2 permettent une nouvelle dissolution du CaCO_3 augmente le nombre d'ions Ca^{2+} et précipite ainsi une certaine quantité de gypse dont la solubilité diminue (Scoeller, 1962 in Pouget, 1969 in Mostephaoui, 2015).

La sursaturation des solutions du sol en gypse a été mentionnée par de nombreux auteurs dans les hautes plaines de l'Algérie (Halitim, 1985), les nappes de la basse vallée de l'Euphrate (Dosso, 1980) et sur les eaux de surface de Chott El Jerid en Tunisie (Perret, 1968 in Job, 1982).

🚧 Changement du sol sous irrigation

Le suivi du changement du sol sous irrigation est mené dans cette exploitation en exploitant un sondage sous des pieds irrigués des palmiers dattiers de variété Deglet-Nour.

Profil 01 irrigué

Nom de fellah/ exploitant : Tastas Mohamed, **Commune** : Bordj Ben Azouz

Lieu dit : ferme de Paul Osval (Chmora)

Culture installée : 120 palmiers dattier

Age : depuis 1923 (91ans)

Plantation 10*10

Coordonnées GPS : N 34° 42' 44.1' E 005° 19' 53.5'' Alt 137m

Tableau112 : Description d'un profil cultural (sous pied de palmier dattier 91ans).

Horizon (cm)	description
H1 0-20	Humide 5YR4/4 reddish Brown, présence de filaments racinaires, présence de matière organique, texture sableuse limoneuse, friable, absence de tâches blanches, moyenne effervescence à HCl.
H2 20-40	Humide 5 YR 5/6 yellowish red, friable, présence de filaments racinaires, présence de matière organique, se peut colmater à la tarière, absence de taches blanches, moyenne effervescence à HCl.
H3 40-60	Humide 5YR 4/6 yellowish red, texture sableuse limoneuse à tendance sableuse, présence de filaments racinaires, présence de matière organique, forte (3) effervescence à HCl.
H4 60-80	Humide 5 YR5/8 yellowish red, présence de filaments racinaires, présence de matière organique, forte (3) effervescence à HCl.
H5 80-100	Humide 5 YR 5/8 yellowish red, texture sableuse, forte (3) effervescence à HCl.

Tableau113 : Résultats analytiques du sondage 1 sol irrigué.

Horizon (cm)	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
PH1/2,5	8.19	8.12	7.89	7.87	7.8
CE 1/5 mmhos/cm	0.70	0.93	3.08	2.96	2.97
Calcaire Total.%	22.5	25.42	25	18.33	15
Calcaire actif %	6.5	14	12.5	11.5	12.5
Gypse %	trace	trace	trace	trace	trace
SAR	1.29	1.29	0.69	0.60	0.66
ESP	0.64	0.64	0.25	0.39	0.30

Tableau114 : Bilan ionique de la solution aqueux du sol (rapport 1/5).

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-20	4.61	3.04	3.19	0.43	6	1.25	7.2	4.80
20-40	6.61	2.23	3.58	0.29	9	2.14	7	4.20
40-60	29.46	8.30	3.98	0.87	15	29.46	5.2	0.51
60-80	29.25	6.07	3.38	0.36	15	31.61	5.6	0.47
80-100	30.03	6.07	3.78	0.35	15	29.46	6.4	0.51

Interprétation :

Le profil 1 irrigué est profond (100 cm limite où se présente de l'eau de la nappe) et de réaction basique avec un sol modérément calcaire. Il est de texture grossière, surtout sableuses et limoneuse. Il est non salé dans l'horizon 0-40 cm due à lessivage des sels par l'irrigation à légèrement salin en profondeur où se concentre les sels. Selon (Aubert, 1986), la CE de l'extrait dilué (1/5) de la solution du sol est élevé, et selon le digramme de Riverside, elle est représentée par la classe C2S1 et C3S1 au premiers 40 cm à C4S1 en profondeur, traduisant un mouvement descendant des sels due à leurs lessivage par l'irrigation (profil salin de type B, selon Servan 1978) exprimant une désalinisation temporaire grâce à la présence du drainage.

Selon Servant et Servat (1966), le sol a 2 types du faciès chimique il est, dans les premiers horizons (0-40cm) chloruré-sulfaté ($1 < Cl^-/SO_4^{2-} < 5$), à sulfato-chloruré ($0.2 < Cl^-/SO_4^{2-} < 1$), en profondeur.

Le SAR et l'ESP sont très faible traduisent une absence d'alcalinisation ou sodisation, car le sol est irrigué avec des eaux du puits sulfatés ajouté à la présence du drainage. Donc, l'effet du drain est appréciable.

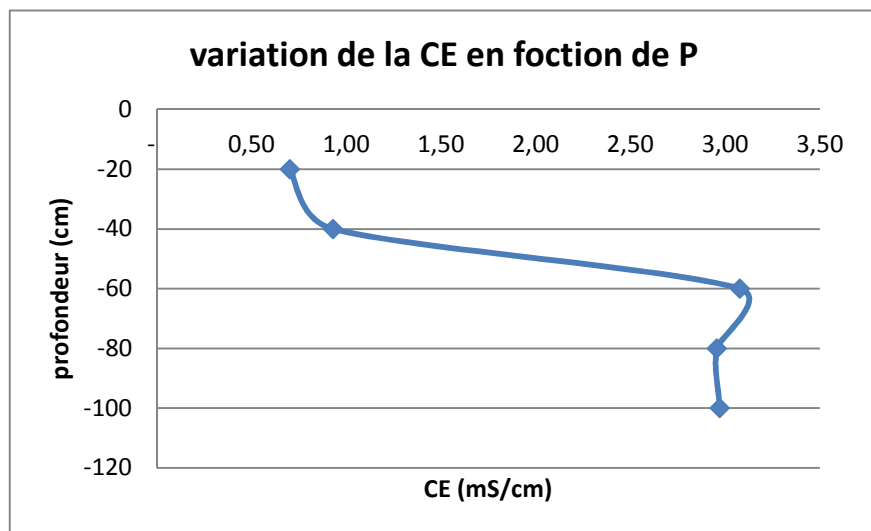


Fig. 103: Profil salin de type B selon Servant (1978) du sol irrigué de Bordj ben Azouz.

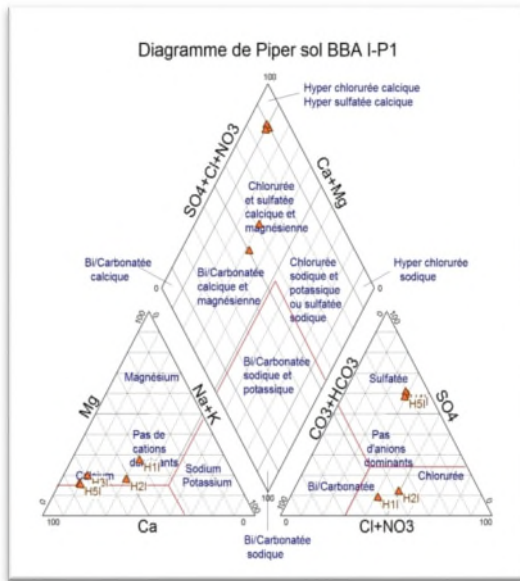


Fig.104 : Représentation sur le diagramme de piper des solutions du sol irrigués, cultivés en palmier dattier de la ferme Paul Ozval-BBA.

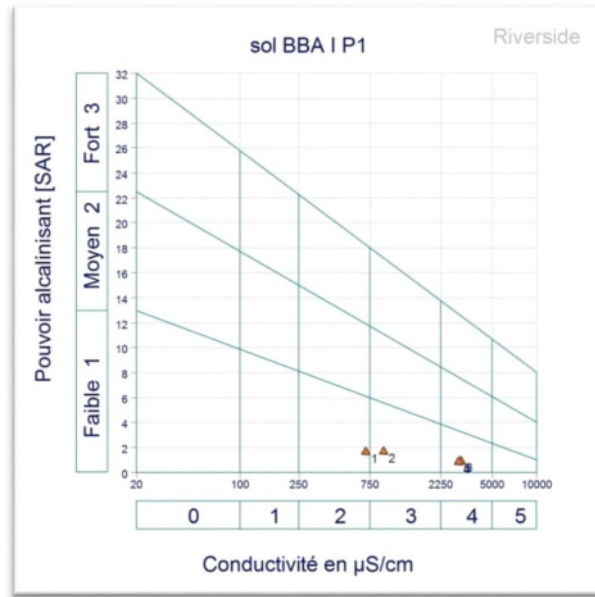


Fig.105 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions du sol irrigué, cultivés en palmier dattier de la ferme Paul Ozval-BBA.

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué P1:

Le calcul des indices de saturation (Tableau 115) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturées pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre. On constate qu'au niveau du deuxième horizon, que la dynamique des sels se fonctionne.

Tableau 115 : Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P2.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1irr	-6.41	-1.85	-2.07	1.06	1.21	2.37
H2irr	-6.19	-1.50	-1.72	1.12	1.26	2.18
H3irr	-6.00	-0.12	-0.34	1.15	1.29	2.15
H4irr	-6.07	-0.09	-0.31	1.15	1.29	2.02
H5irr	-6.02	-0.10	-0.32	1.16	1.30	2.03

Tableau 116 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué de la ferme Paul Ozval_BBA.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-6.41	-6.00	-6.14	0.17
IS gypsum	-1.85	-0.09	-0.73	0.87
IS anhydrite	-2.07	-0.31	-0.95	0.87
IS aragonite	1.06	1.16	1.13	0.04
IS calcite	1.21	1.3	1.27	0.04
IS dolomite	2.02	2.37	2.15	0.14

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol irrigué P1 dans la plaine de Bordj Ben Azouz montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation) et varié entre 1.06 à 2.37 (ils sont moins faible que le sol non irrigué c'est-à-dire plus dilués). Par contre, les minéraux évaporitiques sont sous saturés mais comme le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) est proche de l'équilibre avec IS négative surtout en profondeur au-delà de 60 cm traduisant un début de précipitation du gypse dans le sol ($-1.85 < \text{IS}_{\text{gypse}} < -0.09$), donc, la dissolution du gypse en surface et sa précipitation se fait en profondeur. Ainsi que pour l'anhydrite qui a un IS négative pour tous les horizons conduit à leur tour à se dissoudre surtout en surface. Par ailleurs, l'indice de saturation d'halite (NaCl) est négative, se présente largement sous saturé ($-6.41 < \text{IS} < -6.00$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols contribuant à une augmentation de la minéralisation.

Profil 02 non irrigué (P1 sur carte de positionnement)

Nom de fellah/ exploitant : Laejal Nejma , **Commune :** Bordj Ben Azouz

Lieu dit : Chmora - Bordj Ben Azouz

Culture installée : sol nu (voir photo 20)

Coordonnées GPS : N 34° 42' 29.3'' E 005° 19' 38.6'' Alt 139m

Situation : à proximité du drainage principal

Végétations spontanées :

- *Salicornia articulata*, espèce dominante
- *Sueda mollus*
- *Tamarix*
- *Atriplex halimus*
- *Semmar*

Description d'un autre profil cultural dans un sol nu apparait comme avant irrigation (précédant sol avant l'implantation de la culture de palmier dattier terre blanche), près de drainage principal.

Drainage principal (Ghadar) → Ezarga → Lioua-Shaira → oued Djedi

Tableau 117: Description du profil 2 d'un sol non irrigué-nu et non cultivé dominé par les halophytes.

Horizon (cm)	description
H1 0-20	Humide 5YR 6/3 light reddish Brown, peu -absence de filaments racinaires, moyenne effervescence à HCl(2).
H2 20-50	Humide 5 YR 6/6 reddish yellow, texture argileuse sableuse, pas de filaments racinaires, absence de taches blanches, moyenne effervescence à HCl.
H3 50-80	Humide 5YR 5/6 reddish yellow, texture argileuse sableuse, présence de taches blanches sous forme de cristaux (5%), moyenne effervescence à HCl.
H4 80-100	Humide 5 YR6/4 light reddish Brown, texture argileuse- limoneuse se colmate avec la tarière, moyenne effervescence à HCl.



Photo14 : profil du sol non irrigué à BBA palmeraie de Laejal non encore cultivé. (Auteur, 2014).

Photo 15 : pédopaysage d'un sol non cultivé, non irrigué avec ses cortèges floristiques à base des plantes halophytes à BBA (de référence). (Auteur, 2014).

Tableau 118 : Résultats analytiques du profil 2 d'un sol non irrigué.

Horizon (cm)	0-20	20-50	50-80	80-100
PH1/2,5	8.45	8.56	8.48	8.44
CE 1/5 mmhos/cm	19.31	11.56	11.77	6.70
Calcaire Total.%	7.92	13.33	15	16.25
Calcaire actif %	12.75	12.5	12.75	13.5
Gypse %	10.37	8.48	5.63	traces
SAR	18.42	13.48	12.76	7.70
ESP	26.07	18.74	17.68	10.16

Tableau119 : Bilan ionique de la solution aqueux du sol (rapport 1/5).

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-20	31.26	87.08	159.29	8.21	135	47.32	7.60	2.85
20-50	30.06	49.01	99.56	5.16	80	21.79	6.40	3.67
50-80	26.85	63.18	97.57	4.34	18	83.04	6.40	0.22
80-100	30.06	23.49	49.78	1.51	10	33.21	6.40	0.30

Interprétation

Le profil 2 non irrigué est profond et de réaction basique avec un sol modérément calcaire avec présence d'un taux non négligeable du calcaire actif, il est gypseux surtout dans l'horizon de la surface. Selon (Aubert, 1986), la CE de l'extrait dilué (1/5) de la solution du sol est forte traduit une salinité excessive surtout dans les premiers 80cm à salé en profondeur, selon le digramme de Riverside, elle est représentée par la classe C5S3 en profondeur et au delà de cette classe pour le reste des horizons (de 0 à 80 cm), traduisant un mouvement ascendant des sels due à leurs remonté capillaire d'une part (profil salin de type A, selon Servant 1978) et l'évapotranspiration d'autre part laissant précipitation des sels et un cortège floristique des plantes halophytes s'apparaissent (voir photos 19 et 20).

Selon Servant et Servat (1966), le sol a 2 types du faciès chimique il est, dans le premier horizon (0-50cm) chloruré-sulfaté ($1 < Cl^-/SO_4^{2-} < 5$), sulfato-chloruré ($0.2 < Cl^-/SO_4^{2-} < 1$), de 50 à 100 cm.

L'ESP et le SAR, suivent même allure générale, ils sont très fort surtout pour les premiers 80 cm ; le SAR est très élevé traduit une alcalinisation forte à intense. L'ESP est très important et plus de 15 %. Ce jumelage SAR-ESP fort, mettant en jeux la qualité de ce sol, selon le degré d'alcalinisation d'après Servant et Servat (1966), il est apprécié à forte risque de sodisation. Donc, Le SAR et l'ESP sont très fort traduisent une présence d'alcalinisation ou sodisation.

Il s'agit donc d'un Sol salin à alcali ou sols salins- sodiques ou Solontchaks- solonetz à structure non dégradée avec un faciès chloruré sulfaté en surface à sulfato-chloruré en profondeur.

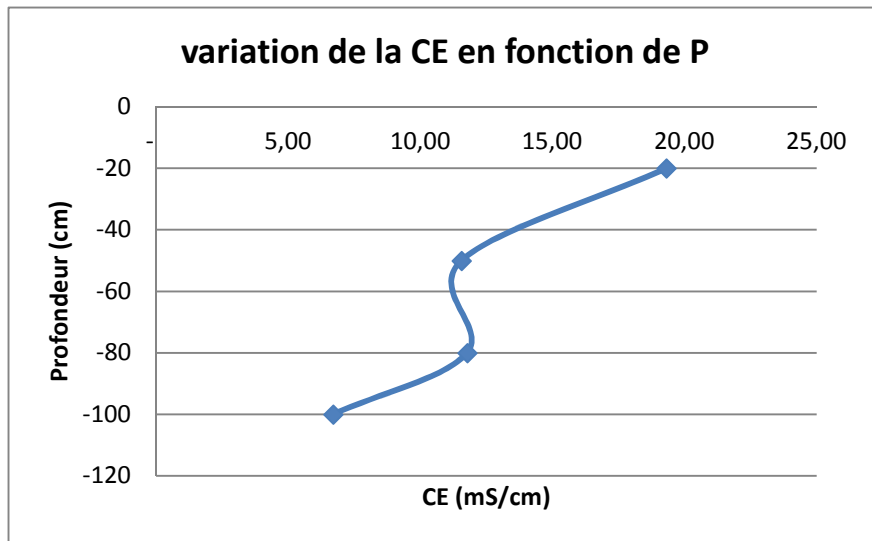


Fig. 106: Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol non irrigué près du réseau du drainage de Chmora de Bordj ben Azouz.

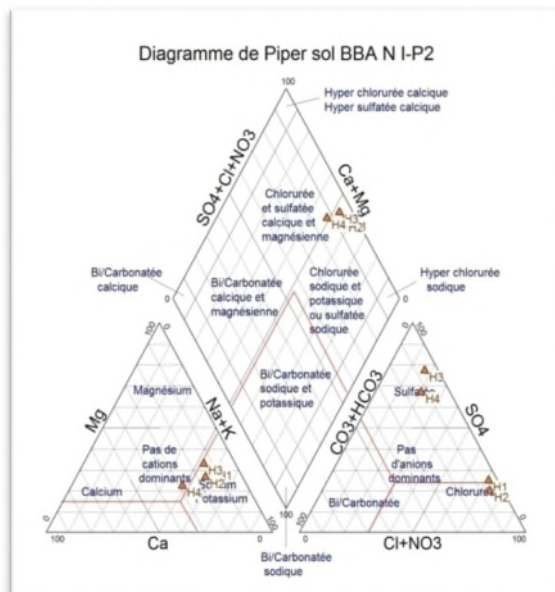


Fig.107 : Représentation sur le diagramme de piper des solutions du sol non irrigués, non cultivés en palmier dattier du sol près du réseau du drainage de Chmora-BBA.

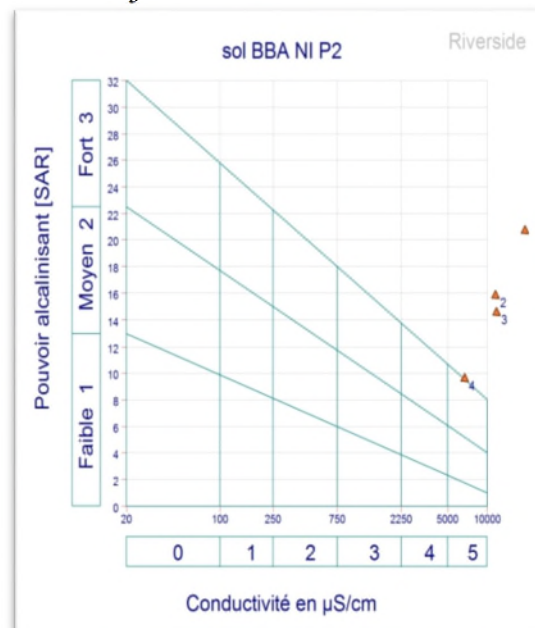


Fig.108 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions du sol non irrigués, non cultivés en palmier dattier du sol près du réseau du drainage de Chmora-BBA.

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué :

Le calcul des indices de saturation (Tableau 120) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturée pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 120 : Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués du P2.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1N	-3.55	-0.35	-0.57	1.57	1.72	4.03
H2N	-3.94	-0.54	-0.76	1.68	1.82	4.00
H3N	-4.61	-0.09	-0.30	1.48	1.63	3.75
H4N	-5.11	-0.20	-0.42	1.66	1.80	3.63

Tableau 121 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué P2 de Chmora _BBA.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-5.11	-3.55	-4.30	0.69
IS gypsum	-0.54	-0.09	-0.29	0.20
IS anhydrite	-0.76	-0.3	-0.51	0.20
IS aragonite	1.48	1.68	1.60	0.09
IS calcite	1.63	1.82	1.74	0.09
IS dolomite	3.63	4.03	3.85	0.19

La simulation à l'évaporation naturelle des de la solution du sol non irrigué P2 dans l'oasis de Bordj Ben Azouz montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas surtout **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) où l'horizon de la surface est riche ou saturé vis-à-vis du magnésium, **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation), varié entre 1.48 à 4.03. Par contre, les minéraux évaporitiques sont sous saturés mais comme le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) est proche de l'équilibre avec IS négative surtout en profondeur au-delà de 50 cm traduisant un début de précipitation du gypse dans le sol ($-0.54 < \text{IS gypse} < -0.09$), donc, la dissolution du gypse en surface et sa précipitation se fait en profondeur. Ainsi que pour l'anhydrite qui a un IS négative pour tous les horizons conduit à leur tour de se dissoudre surtout en surface. Par ailleurs, l'indice de saturation d'halite(NaCl) est négative, se présente largement sous saturé ($-5.11 < \text{IS} < -3.55$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols contribuant à une augmentation de la minéralisation.

Profil02 irrigué : (P1 sur carte de positionnement).

Nom de fellah/ exploitant : Laejal Mohamed Saleh, **Commune :** Bordj Ben Azouz

Lieu dit : Chmora - Bordj Ben Azouz

Culture installée : 700 palmiers dattier

Age : depuis 2002 (12ans)

Plantation 10*10

Coordonnées GPS : N 34° 42' 44.1' E 005° 19' 53.5'' Alt 145m

Source d'eau d'irrigation : 1forage/1 puits

Profondeur : forage 80 m, puits 4 m ;

Tableau 122 : Description d'un profil cultural (sous pied de palmier dattier apparait sain et sans troubles physiologiques).

Horizon (cm)	Description
H1 0-20	Humide 5YR6/4 light reddish Brown, présence de filaments racinaires sous pieds de palmier dattier, présence de matière organique, texture sableuse limoneuse, friable, présence de tâches blanches horizon de couleur blanchâtre, forte effervescence à HCl.
H2 20-40	Humide 5 YR 7/4 pink, texture sableuse limoneuse, friable, présence de filaments racinaires, présence de fumier, forte effervescence à HCl.
H3 40-60	Humide 5YR 7/4 pink, texture sableuse limoneuse, présence de filaments racinaires, présence de fumier, couleur vers blanchâtre, moyenne effervescence à HCl.
H4 60-80	Humide 5 YR7/4 pink, texture équilibrée argileuse- limoneuse- sableuse se colmate avec la tarière, moyenne effervescence à HCl.
H5 80-100	Humide 5 YR 5/8 yellowish red, texture sableuse, forte (3) effervescence à HCl.



Photo 16: L'état de la surface d'une palmeraie à un seul étage ou strate arbre, du palmier dattier à coté du drain principal à BBA (Auteur, 2014)

Tableau 123 : Résultats analytiques du profil 2 sol irrigué.

Horizon (cm)	0-20	20-40	40-60	60-80
PH1/2,5	7.9	8.08	8.17	8.12
CE 1/5 mmhos/cm	2.81	2.80	2.80	3.14
Calcaire Total.%	9.16	7.5	6.66	5
Calcaire actif %	16	8.75	11	10.5
Gypse %	24.16	7.9	16.47	21.47
SAR	0.50	0.93	0.47	1.24
ESP	0	0.11	0	0.57

Tableau 124 : Bilan ionique de la solution aqueux du sol (rapport 1/5).

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-20	33.27	4.46	2.99	0.41	10	25.54	2.4	0.39
20-40	34.87	2.03	5.58	0.32	10	27.86	2.5	0.36
40-60	32.87	3.65	2.79	0.25	12	28.39	2.5	0.42
60-80	33.27	7.69	7.57	0.35	10	33.21	3.6	0.30

Interprétation

Le profil 2 irrigué, avec des eaux sulfatées de puits, est un sondage à la tarière effectué sur le maximum du profil cultural où se trouvent les racines. Il est de réaction pH basique avec un sol modérément calcaire avec présence d'un taux non négligeable du calcaire actif. Il est gypseux avec des pourcentages très élevés sachant que, Afin d'installer la culture du palmier dattier, le recours à la cassure du debdeb où les fellahs pratiquent cette technique apparaît obligatoire afin de faciliter la pénétration des racines, en revanche il ya redistribution du gypse à travers le profil. Il est légèrement salin et homogène le long des horizons due à lessivage continu des sels par l'irrigation d'un côté et la présence d'un réseau du drainage primaire et secondaire à l'intérieur de la palmeraie d'un autre côté qui permette l'évacuation des eaux du drainage en dehors du système hydro pédologique pour éviter la salinisation. Cette dynamique des sels a été observé dans des sols irrigués de plusieurs sites, selon (Daddi Bouhoun et Brinis, 2004) on site ; la vallée du M'Zab (Daddi Bouhoun, 1977), et au sud de la Tunisie, à Tozeur, dans les sols gypseux (Bahri, 1987) et (Mhiri et al. 1998). Selon (Aubert, 1986), la CE de l'extrait dilué (1/5) de la solution du sol est faiblement salée, elle est acceptable vue la tolérance de la culture pratiquée, selon Ayers et Wetscot (1976, 1988), cette salinité n'a aucun effet négatif sur la production des dattes, selon le digramme de Riverside elle est représentée par la classe C4S1 traduisant un mouvement descendant et stable des sels due à leurs lessivage par l'irrigation ; c'est une désalinisation permanente (profil salin de type D, selon Servant 1978) ajouté à la présence du drainage.

Selon Servant et Servat (1966), le sol a un seul type du faciès sulfato-chloruré ($0.2 < Cl-/SO_4 < 1$), qui domine la solution du sol irrigué. Sachant que l'eau d'irrigation provient d'un puits du faciès sulfaté.

Le SAR et l'ESP sont très faible presque négligeable tant que le profil est irrigué avec des eaux du puits sulfatés ajouté à la présence du drain traduisent une absence d'alcalinisation ou sodisation grâce à la présence de drainage.

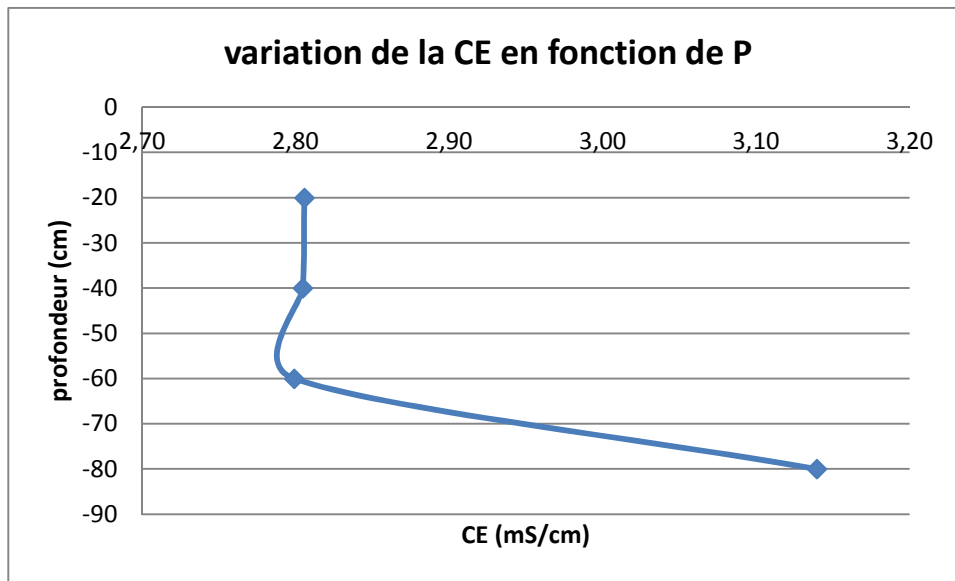


Fig.109 : Profil salin de type D selon Servant (1978) du sol irrigué près du réseau du drainage de Chmora de Bordj ben Azouz.

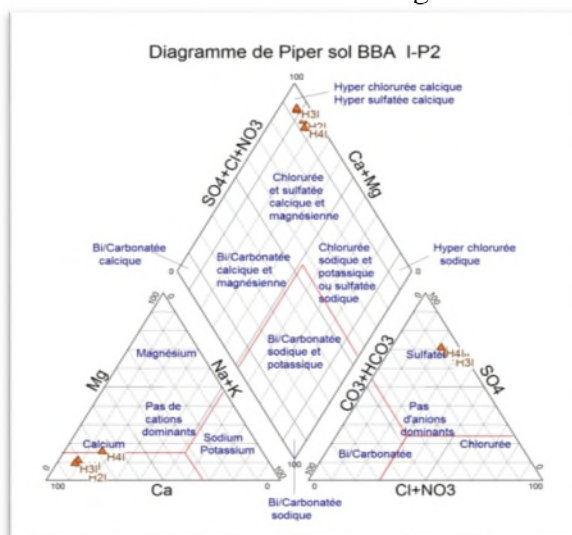


Fig.110 : Représentation sur le diagramme de Piper des solutions du sol irrigués P2, cultivés en palmier dattier du sol près du réseau du drainage de Chmora-BBA.

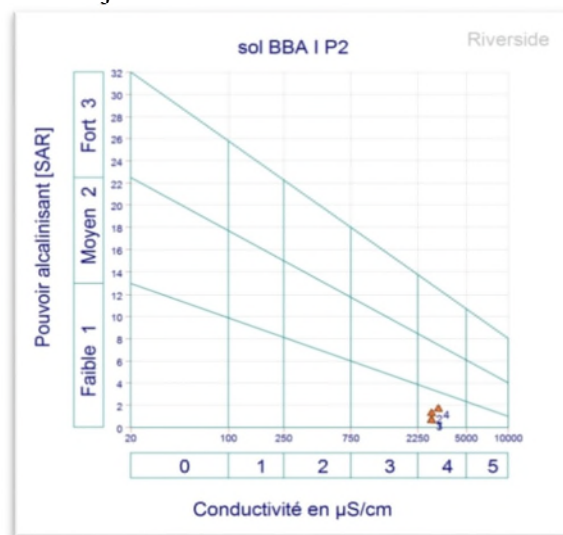


Fig.111 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions du sol irrigués P2, cultivés en palmier dattier du sol près du réseau du drainage de Chmora-BBA.

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué P2 :

Le calcul des indices de saturation (Tableau 125) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturées pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau125 : Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués du P2.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1irr	-6.29	-0.10	-0.32	0.90	1.05	1.34
H2irr	-6.02	-0.05	-0.27	1.09	1.24	1.36
H3irr	-6.24	-0.06	-0.28	1.15	1.29	1.75
H4irr	-5.90	-0.04	-0.26	1.24	1.38	2.24

Tableau 126 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué P2 de Chmora _BBA.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-6.29	-5.9	-6.11	0.18
IS gypsum	-0.1	-0.04	-0.06	0.03
IS anhydrite	-0.32	-0.26	-0.28	0.03
IS aragonite	0.9	1.24	1.10	1.14
IS calcite	1.05	1.38	1.24	0.14
IS dolomite	1.34	2.24	1.67	0.42

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol irrigué P2 dans l'oasis de Bordj Ben Azouz montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas surtout **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) où l'horizon de la surface est riche en magnésium, **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation) et varié entre 0.9 à 2.24. Par contre, les minéraux évaporitiques sont sous saturés mais comme le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) est proche de l'équilibre traduisant un début et une tendance à la précipitation du gypse dans le sol, elle est confirmée par le taux élevé du gypse présent dans le sol avec $(-0.1 < \text{IS gypse} < -0.04)$ d'où la provenance du gypse des eaux d'irrigation qui sont initialement très chargées en sulfates (voir partie eau), donc, la dissolution du gypse en surface et sa précipitation se fait en profondeur vu le lessivage du aux eaux d'irrigation . Ainsi que pour l'anhydrite qui a un IS négative pour tous les horizons conduit à leur tour à se dissoudre. Par ailleurs, l'indice de saturation d'halite(NaCl) est négative, se présente largement sous saturé $(-6.29 < \text{IS} < -5.9)$, ce qui lui permet de se dissoudre

d'avantage dans les sols. On remarque que quand l'indice de saturation du gypse augmente, l'indice de saturation en halite diminue surtout pour les sols irrigués.

Profil 03 zone de dépression (Ezarga)

Cette zone est plein d'hydromorphie(photo 17), le recours au sondage par tarière est facile. On a déjà expliqué sa situation ainsi que leur contexte du paysage dans la partie eau.

Tableau 127 : Données physico-chimiques de la solution du sol.

Horizon (cm)	0-20	20-40	40-60
PH1/2,5	8.41	8.12	8.16
CE 1/5 mmhos/cm	7.94	6.75	6.38
SAR	4.30	1.20	1.39
ESP	5.11	0.50	0.79

Tableau 128 : Bilan ionique de la solution aqueux du sol (rapport 1/5).

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻⁻	HCO3 ⁻	
0-20	30.06	36.45	28.22	2.28	95	64.80	9	1.47
20-40	32.06	20.25	6.27	2.15	70	60.20	11	1.16
40-60	28.05	42.52	8.45	1.31	60	58.11	8	1.03



Photo 17 : Zone de dépression où s'accumule les eaux de drainage (écosystème saharien-oasien : Ezarga, bordj ben Azouz). (Auteur, 2014).

Interprétation

Le profil Ezarga, zone de dépression-zone chotteuse, est un sondage à la tarière effectué sur le maximum du 60 cm (présence de l'eau phréatique) de réaction pH basique. Il est salé surtout en surface due principalement à l'évapotranspiration ajoutée à une zone d'évacuation

et d'accumulation des eaux du drainage en dehors du système hydro pédologique des palmeraies en périphérie afin d'éviter la salinisation. Selon (Aubert, 1986), la CE de l'extrait dilué (1/5) de la solution du sol est élevée et selon le digramme de Riverside elle est représentée par deux classe : C5S1 et C5S3. Dans la région de bordj ben Azouz (BBA), le gypse constitue parfois un véritable encroûtement qui est en même temps salé. Il peut alors se trouver plus en profondeur, lié aux mouvements d'une phréatique séléniteuse et salée. (Aubert, 1976). Le profil salin est de forme A, se caractérise par une distribution saline présentant un maximum dans les horizons superficiels ; elle témoigne d'un processus ascendant de salinisation sous l'effet de l'évaporation.

Selon Servant et Servat (1966), le sol a un seul type du faciès équilibré à tendance chloruré-sulfaté ($1 < Cl^-/SO_4^{2-} < 5$), qui domine la solution du sol irrigué.

Le SAR et l'ESP sont assez élevés en surface et diminuent en profondeur mais ils restent sans effet nocif sur le sol traduisent une absence d'alcalinisation ou sodisation grâce à la présence de drainage.

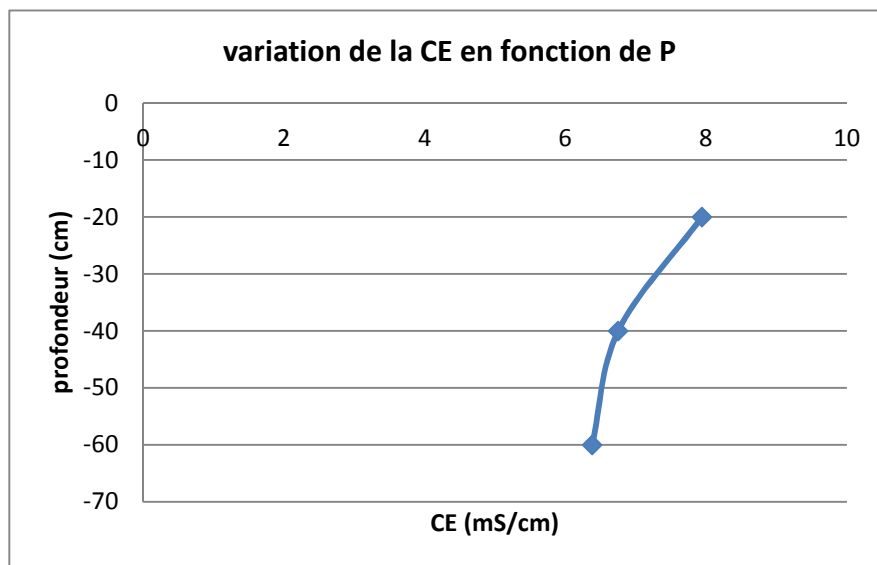


Fig. 112: Profil salin de type A selon Servant (1978) du sol de la zone de dépression (Ezarga) de Bordj ben Azouz.



Fig.113a : Représentation sur le diagramme de Piper des solutions du sol Ezarga-BBA.

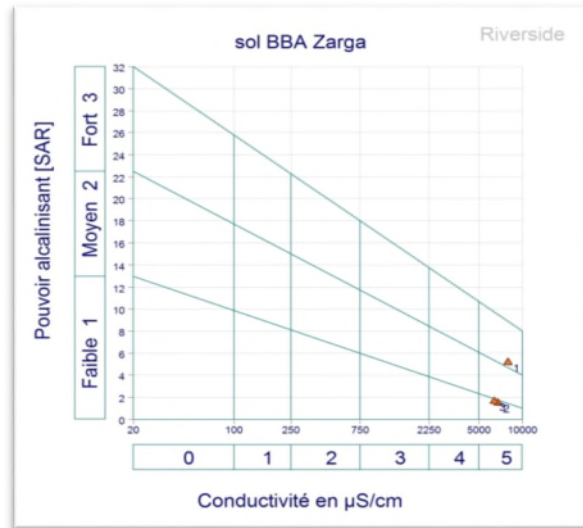


Fig.113b : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions du sol Ezarga-BBA.

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol Ezarga :

Le calcul des indices de saturation (Tableau 129) montre que la solution du sol étudiée dépasse l'état de saturation par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et est sous-saturée pour l'halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau129 : Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols d'Ezarga.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1	-4.39	-0.05	-0.27	1.67	1.81	3.84
H2	-5.09	0.02	-0.20	1.56	1.71	3.34
H3	-5.06	-0.09	-0.31	1.41	1.56	3.42

Tableau 130 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol d'Ezarga_BBA.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-5.09	-4.39	-4.91	0.40
IS gypsum	-0.09	0.02	-0.05	0.06
IS anhydrite	-0.31	-0.20	-0.27	0.06
IS aragonite	1.41	1.67	1.51	0.13
IS calcite	1.56	1.81	1.66	0.13
IS dolomite	3.34	3.84	3.49	0.27

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol de la zone de dépression Ezarga dans la plaine de Bordj Ben Azouz montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas surtout **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3) où l'horizon de la surface est riche en ces minéraux. L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés dépasse largement l'état de saturation (positive) et se cristallise (précipitation), il est varié de 1.41 à 3.84. Par contre, les minéraux évaporitiques sont sous saturés mais comme le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) est proche de l'équilibre traduisant un début de son précipitation dans le sol même elle dépasse l'état de saturation dans l'horizon médian (20-40 cm où IS est positive) ($-0.09 < \text{IS}_{\text{gypse}} < 0.02$), donc, la dissolution du gypse en surface et en profondeur, en revanche sa précipitation se fait en moyenne profondeur. Cette observation est confirmée par Aubert(1976) où dans certains sols il peut y avoir un véritable stockage du gypse à moyenne profondeur. Pour l'anhydrite qui a un IS négative pour tous les horizons conduit à leur tour à se dissoudre. Par ailleurs, l'indice de saturation d'halite(NaCl) est négative, se présente largement sous saturé ($-5.09 < \text{IS} < -4.39$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols.

Synthèse sur le sol de BBA

Les oasis sont généralement disposées en bordure de « chotts », dépressions topographiques salées qui constituent l'exutoire naturel des eaux de drainage (Job, 1992). De plus, la zone de transition entre la partie cultivée et le chott est de plus en plus exploitée pour augmenter la surface des exploitations et bénéficier du droit à l'eau d'irrigation (cas oasis de BBA). Dans de nombreux cas, les faibles dénivelées entre les oasis et les chotts limitent la bonne évacuation des eaux et des sels. En conséquence, une majorité de ces oasis est sujette à des manifestations d'engorgement et de salinité, souvent accentuées par une gestion de l'irrigation peu efficace et des systèmes de drainage peu performants. Le drainage est souvent associé à des apports réguliers en sable dunaire et en fumier pour contrôler l'engorgement et la salinité des horizons superficiels (Omrani, 2002). Cette dernière observation est plus remarquable dans la zone située entre Bir Attia et Ezarga où les agriculteurs font appel à l'apport du sable à une dose d'un camion (12 tonnes) pour 4 pieds des palmiers dattiers pour faire face à l'engorgement et la remontée de la nappe. Dans les périmètres irrigués que dans les oasis, la salinisation secondaire a une double origine : l'eau d'irrigation et les remontées des plans d'eau souterrains. Hachicha et al. (1992) qui indiquent que l'effet salinisant des eaux d'irrigation est négligeable par rapport à celui de la nappe; les sols à drainage déficient sont, en effet, ceux qui sont les plus chargés en sels. (Ben Hassine, 2005).

Sachant que le palmier dattier avec d'autres plantes du désert absorbe l'eau du sol par les racines, mais celles-ci ont une particularité : elles sont capables d'absorber l'eau mais de « refuser » le sulfate de calcium ou le chlorure de sodium dissouts : la racine joue le rôle d'un filtre en absorbant sélectivement les molécules de la nappe. L'amendement gypseux dans ce sol est déconseillé car il n'est pas en besoin de cet élément.). Le sol est de texture fine et surtout sableuse –limoneuse favorable à l'infiltration de l'eau et le transfert des solutés comme partout des oasis surtout celle tunisienne. (Askri et Bouhlila, 2010). Les quantités apportées sont appliquées sur les cuvettes d'irrigation qui occupent la plus grande surface de la parcelle cultivée dans les oasis de BBA que celle observé en Tunisie. (Zogari et al, 2016).

Le bas-Sahara est caractérisé par une forte empreinte gypseuse. (Dutil, 1971). Il apparait ainsi qu'au cours des dernières périodes humides quaternaires, le gypse a été un élément très mobile dans le paysages du Bas-Sahara, à tel point qu'il est venu tapisser tous les Bas-fonds de cette région. (Dutil, 1971 et Aidaoui, 1994). On les trouve dans les oasis sous formes de fins cristaux dans la plupart des sols de Bas-Sahara et principalement dans les encroûtements gypseux asséchés ou fonctionnelle. (Job, 1992 ; Mostephaoui, 2015).

Un sol est gypseux lorsqu'il présente une teneur en gypse supérieure à 5 % (FAO, 1990), ces sols occupent 1.8 % de la surface de la terre mais 12.2 % de la surface de l'Algérie. (Razi et Halitim, 2008).

Les phénomènes de dissolution-précipitation du gypse sont très fréquents dans les sols étudiés surtout irrigués de Bordj ben Azouz. Or, les phénomènes de dissolution-précipitation du gypse sont très réduits et n'apparaissent que dans les sols très irrigués sans évoluer vers un horizon induré de gypse. (Job, 1992).

Les sels potentiellement précipitables en aval, dans la dépression chotteuse Ezarga, préexistent à l'état d'ions appariés en tout point dans la nappe phréatique (véhicules des sels) de l'oasis de Bordj ben Azouz.

Les sols des oasis y sont quelquefois très salés et cependant ils sont cultivés depuis des siècles. Où une bonne structure du sol est un élément essentiel de la préservation saine d'un agro-ecosystème. La solution clef est l'irrigation qui remplace différents stress touchée la structure du sol. (Murray et Grant, 2007).

Les sols des oasis et de leur environnement sont soumis à un certain équilibre de salure qui est en fonction de la quantité, de la nature et de la fréquence des apports d'eau d'irrigation d'une

part, et des conditions de drainage d'autre part ; dans la plupart des cas, ils sont caractérisés par un encroustement gypseux ou gypso calcaire. (Dutil, 1971). Le sol est gypseux pour tous les horizons avec forte présence du calcaire total ce qui conduit à un sol gypso-calcaire, car sous irrigation, la précipitation concomitante de gypse pourrait aussi avoir des conséquences importantes sur les propriétés physiques par une cimentation des particules du sol sous forme d'accumulation calcaire-gypseux, tout particulièrement dans les zones où la nappe est la plus superficielle et la plus concentrée. (Marlet et al, 2007).

L'irrigation traditionnelle seule permet de maintenir le système oasien en équilibre avec son environnement. (Job, 1992), cette observation est bien marquée dans les oasis de Bordj ben Azouz. Si on suit la séquence topographique, la formation du gypse est claire et nette dans le sol de la région de BBA surtout quand l'eau d'irrigation soit sulfatée.

Sol non irrigué

Tableau 131: Analyses statistiques des différents paramètres mesurés pour les sols non irrigués de BBA:

Paramètres mesurés	minimum	maximum	moyenne	Ecartype
CE (1/5)(dS/m)	4.56	107.60(CE _e)	32.73	32.72
pH 1/2.5	7.50	8.56	8.06	0.43
Gypse %	traces	24.16	6.12	4.52
Calcaire total %	7.92	25.01	18.37	5.74
Calcaire actif %	4	13.50	10.44	3.17
Ca ⁺⁺ (meq/l)	26.85	205.41	66.80	65.77
Mg ⁺⁺ (meq/l)	23.49	329.06	126.45	92.51
Na ⁺ (meq/l)	0.01	795.65	236.41	241.90
K ⁺ (meq/l)	0.48	20.96	5.45	6.41
Cl ⁻ (meq/l)	10	1530	381.44	491.41
SO ₄ ⁻ (meq/l)	21.79	1005.96	303.71	364.66
HCO ₃ ⁻ (meq/l)	6.40	50	23.20	16.99
Cl/SO ₄	0.20	3.67	1.59	1.33
SAR	0	87.46	24.75	26.07
ESP %	0	128.57	35.47	38.71

L'examen des résultats d'analyse des paramètres physicochimiques du sol non irrigué (tableau.131), montre la présence d'une salinité élevée (CE de l'extrait diluée (1/5) supérieure à 3 dS/m) pour l'ensemble des échantillons surtout en moyenne profondeur du sol, selon l'échelle de l'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol saturé 1/5 à 25°C (Aubert, 1986), exprime des profils salins moyens de type A et B reflétant un état alterné entre salinisation (A) à désalinisation temporaire (B), donc, une distribution saline présentant un maximum dans les horizons superficiels(A) et moyennement

profond (B) traduisant un processus ascendant et/ ou descendant de salinisation , selon servant 1978. Cette forte salinité est attribuée aux effets conjugués de la qualité de l'eau d'irrigation préalablement salée, aux conditions climatiques très arides produisant une forte évapotranspiration qui concentre la solution du sol (Cheverry et Robert, 1998), et surtout qu'ils sont loins d'un réseau de drainage à ciel ouvert (traditionnel inventorié par les fellahs de la région). Ce sol est généralement calcaire (7 % à 25%), selon Baize(1988) et dépourvu à gypseux (trace à 25 %). Le sol est profond (plus de 210 cm) et de texture fine surtout sableuse –limoneuse favorable à l'infiltration de l'eau et le transfert des solutés. Il est de réaction pH neutre à basique (Baize, 1988) caractérisé par un pH appartient à la fourchette des pH courants pour les sols minéraux en régions arides (normes d'interprétation du pH-eau du sol ; $7.5 < \text{pH} < 9$) selon (Mathieu et Pieltain, 2003).

Selon Servant et Servat (1966), Le faciès géochimique dominant du sol non irrigué est alterné entre sulfaté calcique ou sodique à chloruré sodique. Selon la profondeur du sol et le positionnement des profils près ou loin du réseau de drainage.

L'ESP et le SAR, suivent même allure générale, le SAR est très élevé traduit une alcalinisation forte à intense. L'ESP est très important et dépasse la limite conseillée de 15 %. Ce jumelage SAR-ESP fort, met en jeu la qualité de ce sol, selon le degré d'alcalinisation d'après Servant et Servat (1966), il est apprécié à forte risque de sodisation.

Le génie de fellah de la région de BBA, le conduit à briser la croûte gypseuse afin d'installer la culture du palmier dattier car la présence de cette croute empêche le drainage en profondeur et constitue un obstacle mécanique à la pénétration des racines (Hatira et al. 2005 in Askri et Bouhlila, 2010).

Tableau 132 : Moyenne de l'IS de tous les sols non irrigués.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-8.21	-1.79	-3.93	1.91
IS gypsum	-0.54	0.72	0.17	0.49
IS anhydrite	-0.76	0.52	-0.04	0.51
IS aragonite	1.19	2.21	1.65	0.30
IS calcite	1.34	2.36	1.80	0.30
IS dolomite	3.21	4.82	4.04	0.47

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol non irrigué de la zone de l'oasis de Bordj Ben Azouz montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas surtout les minéraux carbonatés : Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés dépasse largement l'état de

saturation (positive) et se cristallise (précipitation), il est varié de 1.19 à 4.82. Par contre, les minéraux évaporitiques sont saturés comme le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) et l'anhydrite proche de l'équilibre même le dépasse largement pour la plupart des échantillons du sol traduisant une précipitation dans le sol même, elle dépasse l'état de saturation dans l'horizon médian (20-40 cm où IS est positive) ($-0.09 < \text{IS}_{\text{gypse}} < 0.02$), où se trouve la croûte gypso-calcaire donc, la dissolution du gypse en surface et en profondeur, en revanche sa précipitation se fait en moyenne profondeur. Cette observation est confirmée par Aubert(1976) où dans certains sols il peut y avoir un véritable stockage du gypse à moyenne profondeur. Par ailleurs, l'indice de saturation d'halite(NaCl) est négative, se présente largement sous saturé ($-5.09 < \text{IS} < -4.39$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols exprime une dynamique actuelle des sels dominée par la halite (Job, 1992).

Il s'agit donc d'un Sols salins à alcali ou sols salins- sodiques ou Solontchaks- solonetz à structure non dégradée avec un faciès sulfaté en surface et chloruré sulfaté à sulfato-chloruré en profondeur.

Changement de la qualité des sols sous irrigation.

Tableau 133 : Analyses statistiques des différents paramètres mesurés pour les sols irrigués de BBA:

Paramètres mesurés	minimum	maximum	moyenne	Ecartype
CE (1/5) (dS/m)	0.70	3.14	2.46	0.95
pH 1/2.5	7.80	8.19	8.02	0.15
Gypse %	trace	24.17	7.78	10.21
Calcaire total %	5	24.42	14.95	8.18
Calcaire actif %	6.50	16.00	11.47	2.79
Ca^{++} (meq/l)	4.61	34.87	26.03	11.75
Mg^{++} (meq/l)	2.03	8.30	4.84	2.31
Na^+ (meq/l)	2.79	7.57	4.09	1.54
K^+ (meq/l)	0.25	0.87	0.40	0.18
Cl^- (meq/l)	6	15	11.33	3.16
SO_4^- (meq/l)	1.25	33.21	23.21	12.40
HCO_3^- (meq/l)	2.40	3.60	2.75	0.57
Cl/SO4	0.30	4.80	1.33	1.80
SAR	0.47	1.29	0.85	0.34
ESP %	0	0.64	0.01	0.51

L'examen des résultats d'analyse des paramètres physicochimiques du changement du sol sous irrigation (tableau133), montre que le sol est légèrement salin selon norme d'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol saturé 1/5 à 25°C (Aubert, 1986) pour l'ensemble des échantillons surtout en moyenne profondeur

du sol, selon l'échelle de d'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol saturé 1/5 à 25°C (Aubert, 1986), exprime des profils salins moyens de type B et D reflétant un état alterné entre désalinisation temporaire (B) à désalinisation permanente (D), donc, une distribution saline présentant un maximum dans les horizons moyennement profond (B) traduisant un processus descendant de salinisation, selon servant 1978 grâce à la présence d'un réseau de drainage efficace ajouté à une texture légère surtout sableuse (un filtre naturel). Ce sol est généralement modérément à fortement calcaire (5 % à 24.42 %), selon Baize(1988), presque même pourcentage du sol pour le gypse (0 à 24.17 %) dû principalement à leur précipitation plus que sa dissolution. Il est de réaction pH basique (Baize, 1988) caractérisé par un pH appartient à la fourchette des pH courants pour les sols minéraux en régions arides (normes d'interprétation du pH-eau du sol ; $7.5 < \text{pH} < 9$) selon (Mathieu et Pieltain, 2003).

Selon Servant et Servat (1966), Le faciès chimique dominant du sol irrigué est alterné entre sulfaté calcique ou sodique à chloruré- sulfaté selon la profondeur du sol et le positionnement des profils près ou loin du réseau de drainage.

L'ESP et le SAR, suivent même allure générale, ils sont très réduits grâce au lessivage des sels en présence d'un réseau du drainage conjugué avec une texture légère. Les sols irrigués et bien entretenus (drains) présentent une salinité relativement faible.

Par conséquent, une des raisons de la minéralisation des eaux de la nappe est liée au phénomène dissolution/précipitation du gypse (Hatira et al. 2007 ; Marlet et al. 2007 in Askri et Bouhlila, 2010).

Il s'agit donc d'un Sol salin à alcali ou sols salin- sodique ou Solontchak- solonetz à structure non dégradée avec un faciès sulfaté en surface et chloruré sulfaté à sulfato-chloruré en profondeur.

Tableau 134 : Indice de saturation(IS) du changement du sol sous irrigation.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-6.41	-5.90	-6.13	0.16
IS gypsum	-1.85	-0.04	-0.43	0.71
IS anhydrite	-2.07	-0.26	-0.65	0.71
IS aragonite	0.90	1.24	1.11	0.09
IS calcite	1.05	1.38	1.26	0.09
IS dolomite	1.34	2.37	1.94	0.37

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol irrigué dans l'oasis de Bordj Ben Azouz montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas surtout Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation) et varié entre 0.9 à 2.37. Par contre, les minéraux évaporitiques sont sous saturés mais comme le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) est proche de l'équilibre traduisant un début de précipitation du gypse dans le sol ($-1.85 < \text{IS}_{\text{gypse}} < -0.04$), elle est confirmée par le taux élevé du gypse présent dans le sol irrigué par des eaux de puits sulfatées, ainsi que pour l'anhydrite qui a un IS négative pour tous les échantillons conduit à leur tour à se dissoudre. Par ailleurs, l'indice de saturation d'halite (NaCl) est négative, se présente largement sous saturé ($-6.41 < \text{IS} < -5.9$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols.

Une bonne compréhension des régimes hydriques et salins de sol et de la nappe phréatique et de leurs évolutions spatiales et temporelles permet de pouvoir élaborer des règles nécessaires à une meilleure gestion des eaux et des sols (Hachicha et al, 2007 in Askri et Bouhlila, 2010) en tenant compte des paramètres abiotique de l'oasis.

L'amélioration des sols salés reste réalisable mais avec présence d'un aménagement minimum qui garanti une profondeur satisfaisante de la nappe phréatique en intensifiant le réseau du drainage à l'intérieur des palmeraies et à l'extérieur au périphérie en les reliant avec ses axes naturelles comme les oueds vers l'exutoire naturel oued Djedi, passant par une valorisation des eaux de drainage pour la lutte contre la désertification et l'ensablement des oasis et l'amélioration du couvert végétal par la plantation d'arbustes fourragers autour de l'oasis, comme celles des pratiques appliquées aux niveaux des oasis de notre voisin la Tunisie, sans oublier des opérations d'entretien du réseau du drainage existant et une meilleure gestion des eaux d'irrigation quelque soit leurs provenance (puits, forage) en tenant compte des facteurs climatiques, pédologiques, hydrogéologiques et topographiques du sol étudié.

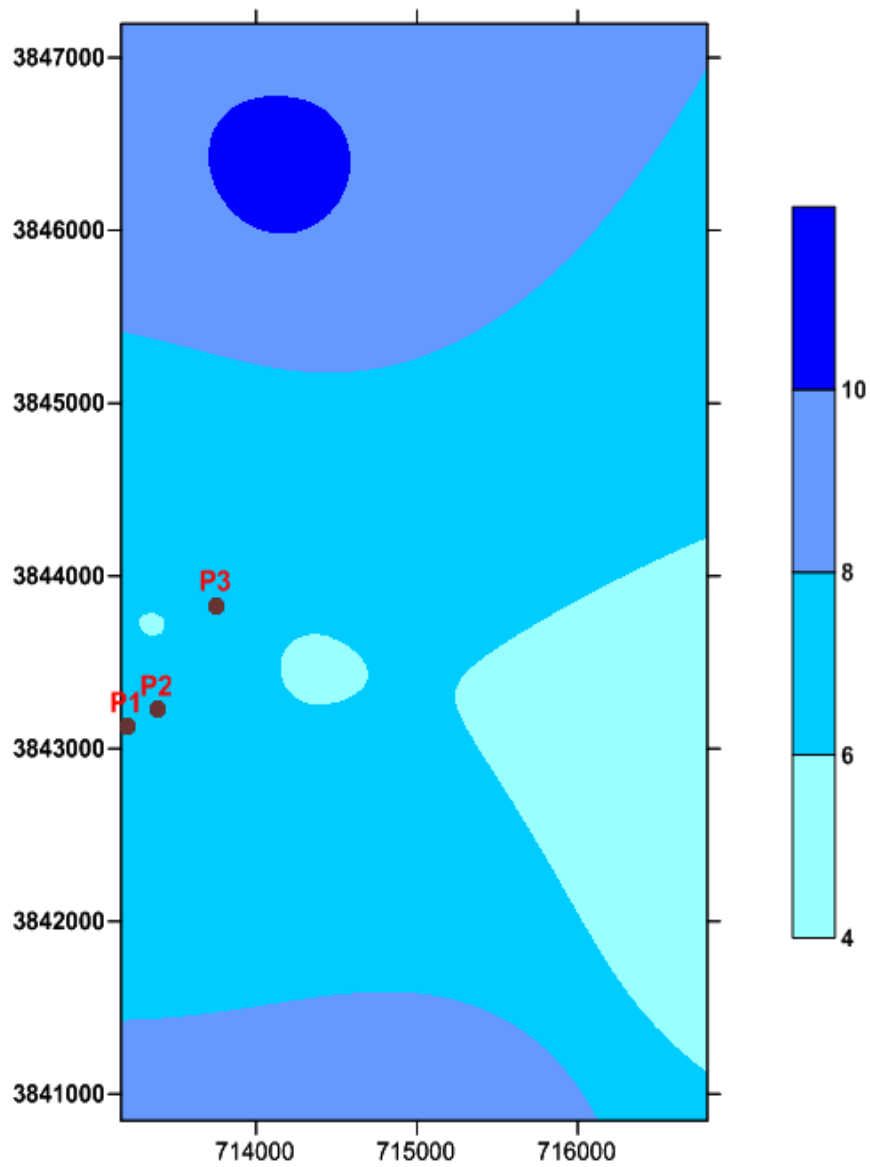


Fig.114 : Carte de positionnement des profils du sol à l'intérieur de l'oasis de BBA (palmeraie ozval(P3) et Laejal (P1et P2)) sur la carte de salinité (CE dS/m) des eaux des puits (la nappe phréatique).

VIII-3- Evaluation de la qualité des sols de la plaine d'El-Outaya

Le chemin de Barika, Mdoukal, el-Amri les traverse par le kheneg Salzou au pied du djebel el-Guelb. C'est un des principaux passages des nomades lors de leurs migrations. Ce passage conduit dans le petit bassin de la **daya de Sildjen**, appelée aussi **plaine d'el-Outaya**, où se trouvent d'excellentes terres de culture et de fort beaux pâturages. (Noix, 1890). La situation de la plaine d'El Outaya, (appelée aussi promontoire de Biskra par Guiraud) juste au Nord de la flexure sud atlasique, lui confère une grande importance, quand à la compréhension des relations hydrogéologiques entre le Nord et le Sud. La plaine d'El Outaya est un glacis en pente douce qui s'étale au Sud-Ouest du Djebel Maghraoua et du pied des Aurès à des altitudes qui s'abaissent d'une manière régulière de 250 à 180m. Les talwegs qui s'enfoncent lors des fortes pluies de 1 à 3m, montrent une nappe de graviers. Elle est entourée de crêtes qui culminent aux altitudes de 415 m (Djebel Boughzal) et de 483m (Djebel Maghraoua). Dans l'ensemble c'est le plat qui caractérise la région, avec une pente générale qui voisine les 0,2% suivant la direction Nord-Ouest. Elle comprend une série de dépressions synclinales centrées sur bled Mazouchia, à l'Ouest d' El Outaya, au centre et à bled Selga sebkha formant la plaine au sud. (Chabour, 2006).

En 1980 et 1984, l'ANRH a réalisé une étude pour inventorier les ressources en sols pour l'El Outaya, elle a trouvé qu'en 1980, 10667 ha des sols irrigués. En 1984, 3286 ha. La somme est de 13953 ha des sols irrigables considérés aptes à la mise en valeur hydro-agricole sur la base de leurs propriétés physico-chimiques, ainsi que différents facteurs naturels (géomorphologie, topographie, climat,...). (Rechachi, 2010). Il ressort de l'étude agro pédologique de la plaine d'El Outaya (Lezzar, 1980) que les sols se répartissent sur 03 classes selon la classification CPCS 1967, à savoir :

- sols minéraux bruts : 2,70%
- Sols peu évolués : 36,50%
- Sols halomorphes : 63,4%

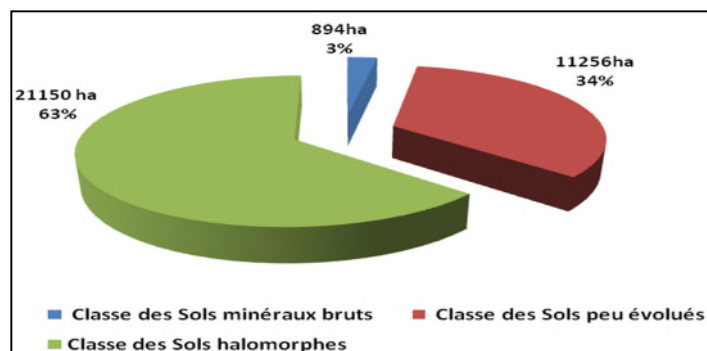


Fig.115-a : Représentation graphique de la Répartition de la superficie des classes du sol de la plaine d'El Outaya ; D'après Lezzar, 1980)

Ainsi, selon la carte réalisée par Abdelhafid (2011), sur la base de l'étude de Lezzar (1980), les sols salés couvrent la plus grande partie de cette plaine de 33.300 ha.

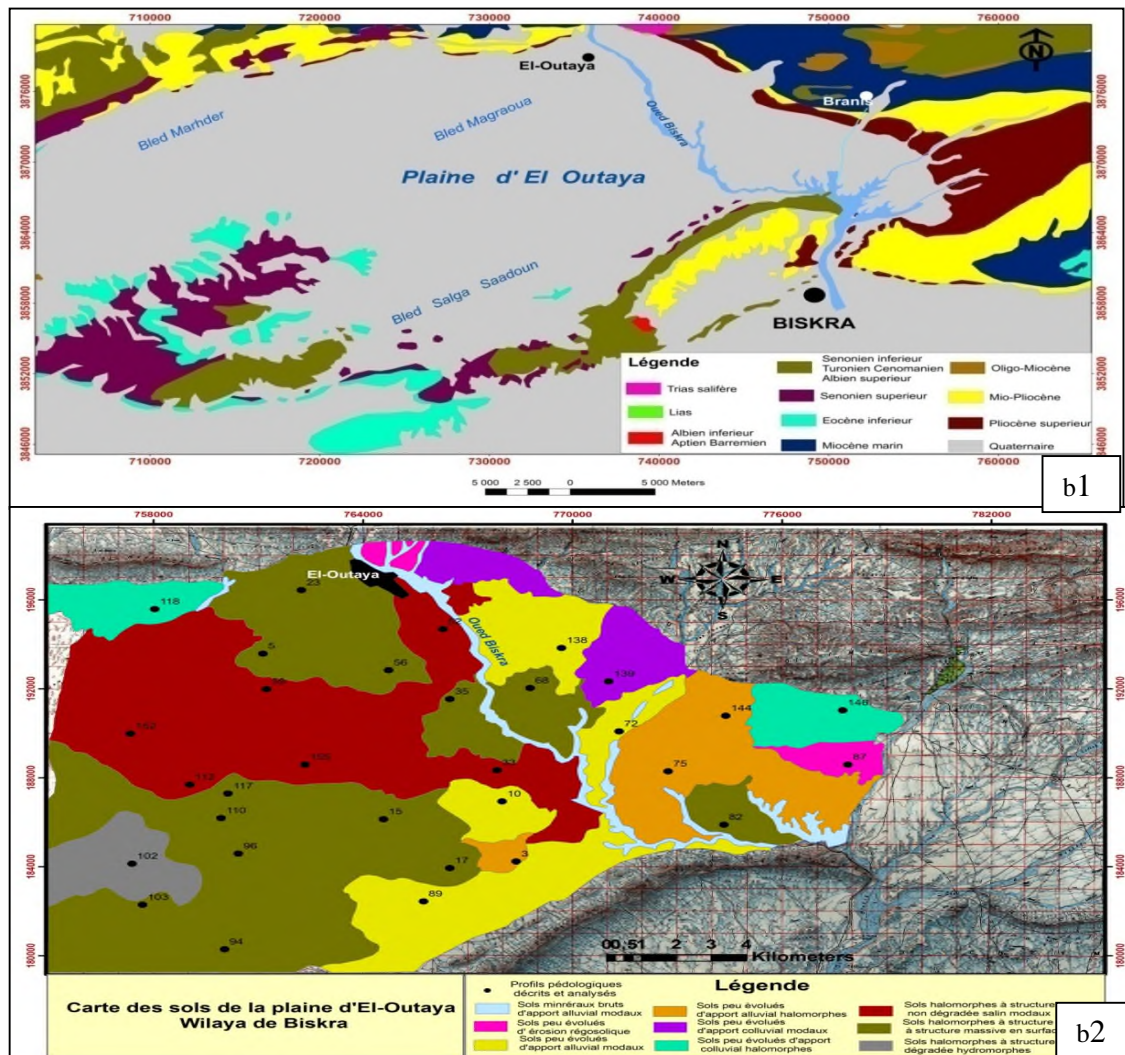


Fig. 115b: Carte de la lithologie (b1) et des sols (b2) de la plaine d'El-Outaya (Source : Abdelhafid, 2011; d'après Carte hydrogéologique ANRH, 1980 et Lezzar, 1980 respectivement).

Selon Benaouda et al, (2008) les sols de la région sont de texture variable mais avec beaucoup d'horizons de texture fine. Ils sont basiques (pH entre 7,4 et 8,6) avec un taux de matière organique entre 0,3 et 3,1%, mais généralement faible, très à excessivement calcaire (entre 26,6 et 63,6% et gypseux à très gypseux (entre 6,3 et 28,6%). Ces sols sont non salés à excessivement salés (CE de la pâte saturée de 0,4 à 57,8 mmhos/cm à 25°C), non sodiques à excessivement sodiques (SAR varie de 0,4 à 67,3). L'ESP varie de 8.78 à 68.23%.

Les sols sont de parcours steppique dont la végétation naturelle est dégradée ; la région dispose d'une grande variété de sols ayant pour genèse l'interférence de la géologie et de la

géomorphologie. (Haouchine et al, 2010). On distingue au niveau de la plaine d'El Outaya des sols peu évolués d'apport alluvial modal, des sols colluviaux halomorphes, des sols salins, sols salins sodiques (CPCS, 1967). Sachant que les régions sédimentaires, grandes fournisseurs des anions et cations caractérisant la salure. (Dutil, 1971).

La substitution des eaux des crues aux eaux des forages ou bien du barrage dans la région d'El Outaya n'est pas sans effets sur le changement des propriétés du sol de cette région. Il s'agit d'une eau très salée vis à vis des sols, et peu salée vis à vis des plantes, et faiblement sodique. Cependant cette eau chlorurée sulfatée est très riche en magnésium, ce qui mérite une étude particulière sur les conséquences de l'utilisation d'une telle eau sur les sols et les plantes. Les effets de ce cation étant très controversés (Daoud et al. 1993).

Ces sols se caractérisent par des textures variables dont la réponse à la salinité et à la sodicité est différente (fig. 115c).

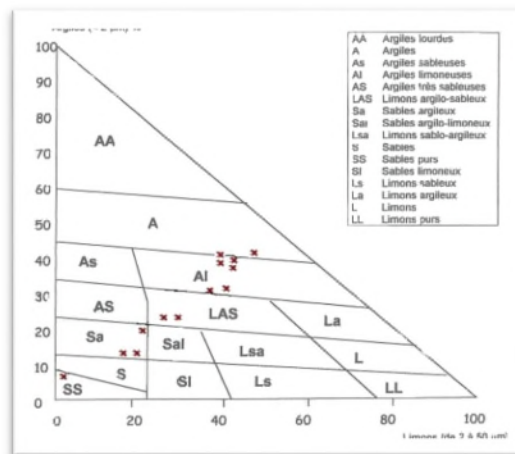


Fig.115-c: Triangle texturale du sol de la région d'El Outaya. (In Benaouda et al, 2008).

La qualité des sols a d'abord été définie comme étant son aptitude à fournir à l'ensemble de la biomasse, et en particulier aux plantes, un milieu propice à leur développement. (Tessier et al, 1996). La vocation agricole de la plaine d'El-Outaya est indiscutable. Mais La disponibilité et la bonne gestion de la ressource hydrique reste le seul problème qui remis en cause la bonne exploitation de ces terres dont 45% ne sont pas irriguées. Les eaux d'irrigation proviennent de deux sources: l'une est le Barrage fontaine des gazelles (à l'amont) avec des eaux présentant un résidu sec de 1296 g et une conductivité de 1370 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (relativement bonne à l'irrigation). L'autre s'est les eaux souterraines qui présentent une salinité assez

élevée (résidu sec jusqu'à 5 g). Une bonne gestion de cette ressource pourrait élargir la surface irriguée tout en préservant les sols de la plaine. Le suivi de l'évolution du faciès suivant les axes des écoulements souterrains met en évidence une concurrence entre les deux faciès dominants (sulfaté et chloruré). La zone nord est influencée surtout par la dissolution de la halite (NaCl) et plus on se déplace vers le centre de la plaine l'influence des gypses se fait sentir. (Brinis et al, 2010). Les facteurs climatiques sont très favorables à l'ascension des sels, à la concentration de la solution du sol et à la précipitation des sels dans la zone racinaire et l'horizon superficiel entraînant la salinisation. Cette salinisation peut être naturelle ou anthropogénique. En Tunisie lors de la précipitation de certains sels dans un ordre déterminé (calcite, gypse, etc.) avec celle de NaCl en dernier lieu. (Hachicha, 2007).

Concernant le faciès chimique des eaux de la solution du sol, il est variable, chloruré, sulfaté, chloruré magnésien, chloruré calcique, chloruré sodiques, sulfato-magnésien, sulfato-calcique et sulfato-sodiques.

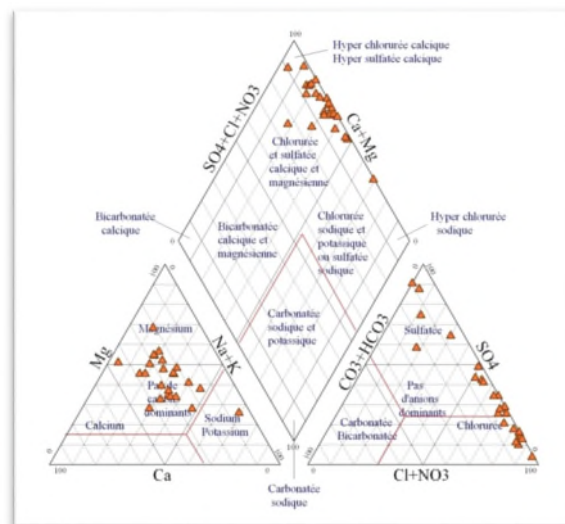


Fig. 116 : Diagrammes de Piper de la solution du sol de la plaine d'El Outaya.

La caractérisation rigoureuse de la salinité des sols exige la détermination des ions présents. Pour les effets osmotiques, la conductivité électrique de l'eau ou de la solution du sol suffit pour avoir un aperçu sommaire. Cet aspect a été étudié pendant les deux prélèvements du sol, l'un avant ou au cours de l'irrigation et l'autre en fin de la campagne agricole. On s'est intéressé à connaître le niveau de la salinité globale des sols par l'intermédiaire de leur CE et de leur bilan ionique. Deux exploitations agricoles ont été choisies dans la plaine, bled Maghraoua, ainsi que le périmètre irrigué Mkinet.

La mesure de la salinité totale d'un sol est indispensable afin de reconnaître le type de sol auquel on a à faire. Toutefois, comme les propriétés des sols diffèrent fortement suivant la

composition chimique et la concentration des sels présents, l'identification des sels solubles, sur extrait de pâte saturée, permet de fournir des renseignements sur les principaux sels présents dans ces sols et d'envisager l'étude de l'évolution de leur salinité surtout lorsqu'ils sont soumis à une irrigation avec une eau salée. Ces sels peuvent également être dosés dans des extraits aqueux plus dilués (1/5 et autres rapport sol/eau) ; et l'extraction est plus rapide et moins consommatrice en quantité de terre (Mathieu et Pieltain, 2003).

Tanq que la plaine à vocation céréalière et maraichage, on a fait des sondages à la tarière dans des parcelles cultivées donc irriguées et autres non à des profondeurs de 60 cm.

Deux séries de prélèvements des échantillons du sol ont été effectués sur deux compagnes, dans les deux exploitations d'étude ; une avant ou au cours de l'installation de la culture annuelle (orge ou blé en général) entre le mois Octobre et Novembre et l'autre à la fin de la campagne agricole y compris l'irrigation entre Juin et Juillet. Les échantillons du sol sont prélevés à l'aide d'une tarière de 0 à 60 cm (profils à 3 horizons), séchés, broyés et tamisés à 2 mm. L'un des trois périmètres est irrigué à partir de l'eau du barrage fontaine des gazelles, (périmètre irrigué M'Kinet) les deux autres exploitations sont irrigués par des eaux souterraines (2 forges, F1 et F2).

Pour caractériser la salinité des sols, on met habituellement l'accent sur la détermination de la composition ionique de la solution d'un extrait aqueux de sol (Halitim, 1988). Afin de réaliser ce but, les analyses de l'eau et du sol sont effectuées, toujours, au niveau du laboratoire central du CRSTRA.

VIII-3- 1- Résultats et discussion : caractérisation et qualité des sols sous irrigation

VIII-3- 1-1-Sol irrigué par l'eau du barrage (SEO).

🚧 Sol non irrigué de la station de Bioressource(SEO) d'El-Outaya(CRSTRA)

Tableau 135 : Caractéristique physico-chimique du sol non irrigué de la (SEO)

Horizon (cm)	0-20	20-40	40-60
PH1/2,5	7.49	7.28	7.43
CE 1/5 mmhos/cm 25°C.	2.21	5.21	2.72
Calcaire Total %	27.5	30.3	32.8
texture % avec (L : 58.5 ; A : 33 et sable 8.5)	LA	LA	---
SAR	5	6	6.2
ESP %	5.74	7.03	7.28

Tableau 136 : Bilan ionique de la solution du sol non irrigué de la station (SEO).

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-20	12.02	5.67	14.13	0.13	19	2.58	4.5	7.36
20-40	30.46	12.55	27.54	0.02	47.5	24.2	3	1.96
40-60	13.43	4.86	18.48	0.02	28	9.3	2.5	3.01

Interprétation

D'après les analyses physico-chimiques du sondage du sol non irrigué de la station expérimentale d'El-Outaya, il est assez profond (0-60 cm selon le système racinaire de la plante cultivée), il s'agit d'un sol calcaire (autour de 30 %) avec un pH neutre selon norme d'interprétation de Baize, 1988 ; $6.5 < \text{pH} < 7.5$) mettant le sol dans une ambiance physico-chimique bien particulier. Sachant que la texture du sol pour les premières 30 cm est limono-argileuse concorde avec les résultats de nombreux travaux sur la station comme ceux de (Abdelhafid et al,2016) La conductivité électrique, selon l'échelle de l'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol saturé 1/5 à 25°C (Aubert, 1986), elle est légèrement salin en surface et en profondeur ($4 \text{ mS/cm} < \text{CE} < 8 \text{ mS/cm}$) à salé en moyenne profondeur, tous les horizons ont la même classe C4S2. Le profil salin est de Type B du sol non irrigué reflète une désalinisation temporaire.

Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique de la solution du sol des premiers horizons (0-20 cm) est de type chloruré ($\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} > 5$), par contre il est de type chloruré-sulfaté ($1 < \text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} < 5$), en profondeur (20 à 60 cm). L'ESP est une fonction mathématique en fonction du SAR, et suit leur allure générale, si le SAR augmente, l'ESP augmente aussi et vis versa. L'ESP est inférieur à 15 %, donc non sodique, avec une salinité de type chlorurée sulfatée. Il s'agit d'un sol salin à structure non dégradée. Ces résultats sont confirmés par différentes études réalisées spécialement sur les sols de la station de Bioressource du CRSTRA, parmi eux celles de l'équipe sol du projet sur les phases salines, Rechachi (2010) et Abdelhafid et al(2016).

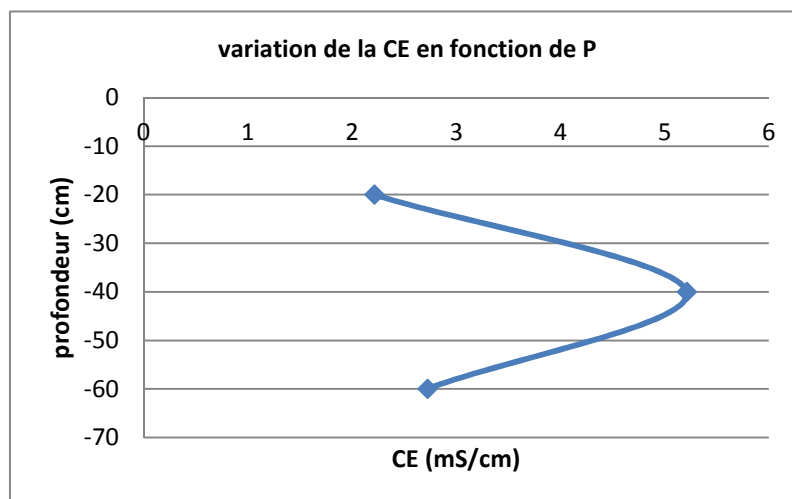


Fig.117 : Profil salin de Type B de sol non irrigué de la station (SEO) El-Outaya.



Fig.118 : Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la de la station bio ressource El-Outaya; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60 cm).



Fig. 119 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la de la station bio ressource El-Outaya; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60 cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué

Le calcul des indices de saturation (Tableau 137) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturées pour la halite, le gypse et l'anhydrite pour les sondages (0-20 cm /20-40 cm et 40-60 cm).Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 137 : Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués.

eau	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1NI	-5.31	-1.32	-1.54	0.50	0.65	1.10
H2NI	-4.68	-0.26	-0.48	0.32	0.46	0.66
H3NI	-5.04	-0.78	-1.00	0.17	0.31	0.32

Tableau 138 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la station Bioressource El-Outaya SEO.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-5.31	-4.68	-5.01	0.32
IS gypsum	-1.32	-0.26	-0.79	0.53
IS anhydrite	-1.54	-0.48	-1.01	0.53
IS aragonite	0.17	0.5	0.33	0.17
IS calcite	0.31	0.65	0.47	0.17
IS dolomite	0.32	1.1	0.69	0.39

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol a été effectuée à l'aide du logiciel thermodynamique « Phreeqi 2.8 » (*versionfree*), en termes d'équilibres sels/solution. Elle montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive varié entre 0.17 et 1.1.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans la solution du sol indique que seuls les minéraux carbonatés tendent à précipiter surtout sous la forme de dolomite. Par contre les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation, cela peut être expliqué par l'effet des valeurs élevées de la constante d'équilibre des minéraux évaporitiques (NaCl 1.58) ; CaSO_4 (-4.58)), ce qui permet aux éléments évaporitiques de se présenter dans l'eau à des concentrations élevées. Par contre pour les minéraux carbonatés, la constante d'équilibre est plus faible (dolomite (-17.09), calcite (-8.48) et aragonite (-8.34)), ce qui produit une précipitation rapide des minéraux carbonatés.

Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des sols analysés et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se trouvent dans la solution du sol à l'état de sursaturation et précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

🚧 Changement de la qualité du Sol sous irrigation

L'eau du barrage « fontaine des gazelles », en 2015, a une salinité élevée (CE de 4.62 mS/cm) et SAR de 6.49 avec un faciès sulfato-chloruré, donc une classe de C4S3.

Tableau 139 : Caractéristique physico-chimique du sol irrigué de la station bio ressource El-Outaya.

Horizon (cm)	0-20	20-40	40-60
PH1/2,5	7.08	7.11	7.55
CE 1/5 mmhos/cm 25°C.	3.26	6.25	5.20
Calcaire Total %	27.5	30.3	32.8
SAR	3.68	4.92	4
ESP %	3.98	5.64	4.42

Tableau 140 : Bilan ionique de la solution du sol irrigué de la station bio ressource El-Outaya.

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-20	22.44	7.29	14.06	0.44	23	25.19	3.5	0.91
20-40	32.06	12.15	23.12	0.4	30	30.24	3.5	0.99
40-60	32.46	8.91	18.04	0.17	35	27.08	3	1.29

Interprétation

D'après les analyses physico-chimiques du sondage du sol irrigué de la station expérimentale d'El-Outaya, il est assez profond (0-60 cm selon le système racinaire de la plante cultivée), il s'agit d'un sol calcaire (autour de 30 %) avec un pH neutre à légèrement basique selon norme d'interprétation de Baize, 1988 ; $6.5 < \text{pH} < 7.5$) mettant le sol dans une ambiance physico-chimique bien particulier. La conductivité électrique, selon l'échelle de d'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol saturé 1/5 à 25°C (Aubert, 1986), elle est légèrement salin en surface (0-20 cm) à salé et augmente au-delà de 20 cm ($4 \text{ mS/cm} < \text{CE} < 8 \text{ mS/cm}$) sous l'effet conjugué de l'irrigation et l'évapotranspiration avec une texture lourde et en absence de drainage, le profil salin est de type B du sol irrigué reflète une désalinisation temporaire. Les horizons ont deux classes C4S2 et C5S2. La salinité augmente sous irrigation mais sans affectation de la sodicité.

Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique de la solution du sol des premières horizons (0-40 cm) est de type sulfato-chloruré ($0.2 < \text{Cl}/\text{SO}_4 < 1$), par contre il est de type chloruré-sulfaté ($1 < \text{Cl}/\text{SO}_4 < 5$), en profondeur de 60 cm. L'ESP est inférieur à 15 %, donc non sodique. Il s'agit d'un sol salin à structure non dégradée.

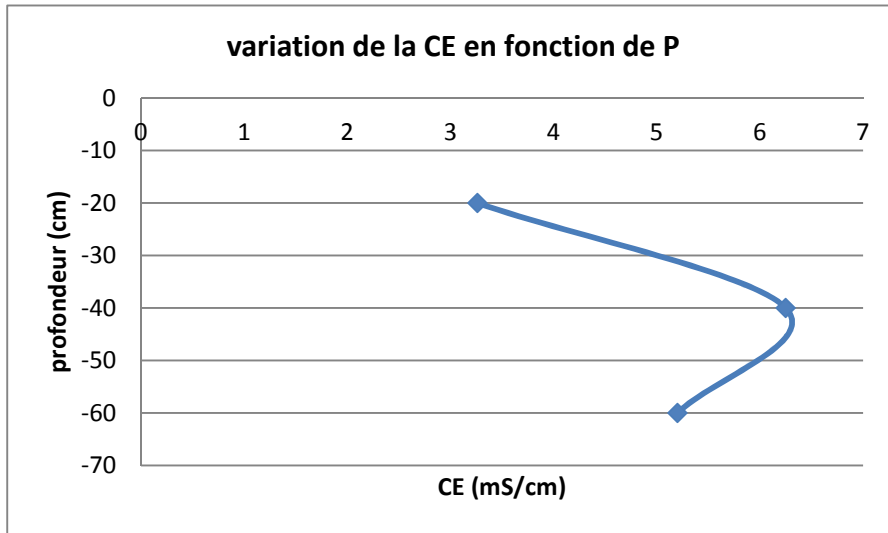


Fig120 : Profil salin de Type B de sol irrigué de la station bio ressource El-Outaya.



Fig. 121 : Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués de la de la station bio ressource El-Outaya; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60 cm).

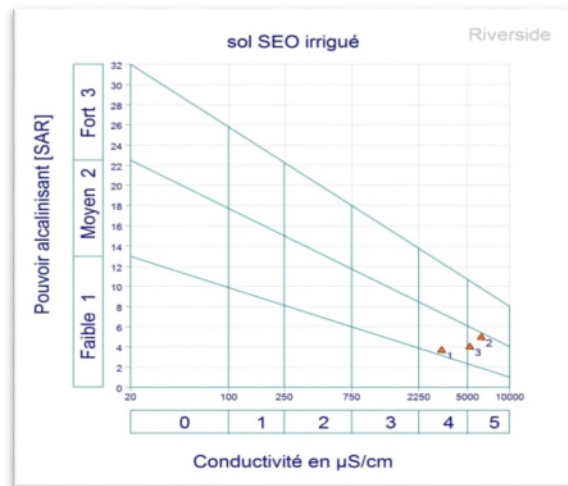


Fig.122 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués de la de la station bio ressource El-Outaya; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60 cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué

Le calcul des indices de saturation (Tableau 141) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturées pour la halite, le gypse et l'anhydrite pour les sondages. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 141 : Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués.

Eau	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1I	-5.26	-0.27	-0.49	0.09	0.23	0.10
H2I	-4.95	-0.14	-0.36	0.23	0.37	0.44
H3I	-4.99	-0.16	-0.38	0.61	0.76	1.07

Tableau 142 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué de la station bio ressource El-Outaya.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-5.26	-4.95	-5.07	0.17
IS gypsum	-0.27	-0.14	-0.19	0.07
IS anhydrite	-0.49	-0.36	-0.41	0.07
IS aragonite	0.09	0.61	0.31	0.27
IS calcite	0.23	0.76	0.45	0.27
IS dolomite	0.1	1.07	0.54	0.49

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol a montré que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive, varié entre 0.09 et 1.07. Par contre les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation, et on note que le gypse est proche de l'équilibre ($-0.27 < \text{IS}_{\text{gypse}} < -0.14$), qui permet de le précipiter surtout dans l'horizon médian (20-40 cm).

Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des sols analysées et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se trouvent dans la solution du sol à l'état de sursaturation et précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

VIII-3- 1-2-Sol irrigué par l'eau de forages

Tableau 143: Composition physico-chimiques des eaux d'irrigation souterraine utilisées dans l'irrigation des deux périmètres.

exploitation	eau	pH	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	Cl/SO4	SAR
Exp01(P1)	F1	7.34	3.94	14.03	19.84	16.86	0.17	24.82	8.04	4.2	3.09	4.1
Exp02(P2)	F2	7.4	4.27	12.82	9.31	17.05	0.17	22	17.68	4.5	1.24	5.2

La salinité de l'eau d'irrigation dépasse la limite standard du seuil de salinité, estimé à 3 dS/m par Ayers et Westcot (1976). On note la dominance du faciès sulfatés (exp02) où cette zone est loin de l'influence du Diapir par rapport faciès chlorurés (exp01) (voir fig.134).

✚ Sol de la première exploitation irrigué par F1 à faciès chloruré (sol P1 sur fig134).

1- Sol non irrigué (N 35°00'43.1" E 005°00'43.1" Z 238,7m) Maghraoua

Tableau144 : Résultats analytiques des moyens des sondages.

Horizon (cm)	0-20	20-40	40-60
PH1/2,5	8.31	8.04	8.04
CE 1/5 mmhos/cm	0.92	2.53	4.47
Calcaire Total %	41.25	40.42	39.6
Calcaire actif.%	15	16	19
SAR	2.27	2.75	4.74
ESP %	2.04	2.71	5.39

Tableau145 : Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5).

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-20	6.41	2.43	4.78	0.48	19	3.74	0.8	5.08
20-40	24.85	2.43	10.15	0.37	8	19.07	3.6	0.42
40-60	26.05	9.31	19.91	0.35	14	36.72	4	0.38

Interprétation

D'après les analyses physico-chimiques du sondage du sol non irrigué de la première exploitation, il est assez profond (0-60 cm selon le système racinaire de la plante cultivée), il s'agit d'un sol à horizons fortement calcaire (autour de 40 %) avec présence de calcaire actif à 15 % qui est un indice de pouvoir chlorosant, avec un pH élevé et basique (selon Baize, 1988 $7.5 < \text{pH} < 8.7$) mettant le sol dans une ambiance physico-chimique bien particulier caractérisée par la surabondance de cation Ca⁺⁺.

La conductivité électrique, selon l'échelle de l'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol saturé 1/5 à 25°C (Aubert, 1986), elle est non salé en surface (CE < 2 mS/cm) à légèrement salin en profondeur (4 mS/cm < CE < 8 mS/cm) et augmente en profondeur. Donc, la salinité augmente avec la profondeur où cette zone est la plus sujette aux mouvements des sels, traduisant un profil salin moyen de type D selon Servant 1978. Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique de la solution du sol des premiers horizons (0-20 cm) est de type chloruré (Cl-/SO4 > 5), par contre il est de type sulfato-chloruré (0.2 < Cl-/SO4 < 1), en profondeur (20 à 60 cm).

ESP est une fonction mathématique en fonction du SAR, et suit leur allure générale, si le SAR augmente, l'ESP augmente aussi et vis versa. L'ESP de tous les horizons de ce sondage varie (2.04% à 2.71%) il reste faible et inférieur à 15 % c'est-à-dire le risque de sodisation est

négligeable. Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès chloruré à sulfato-chloruré en profondeur.

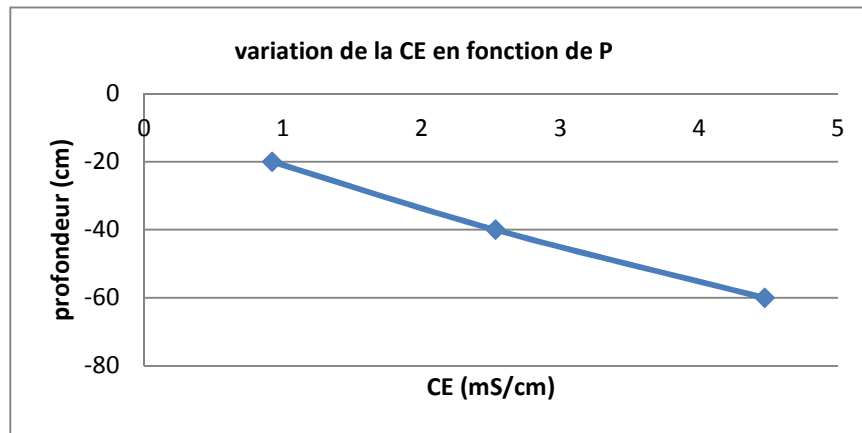


Fig123 : Profil salin de Type D de sol non irrigué de la première exploitation(Exp01)

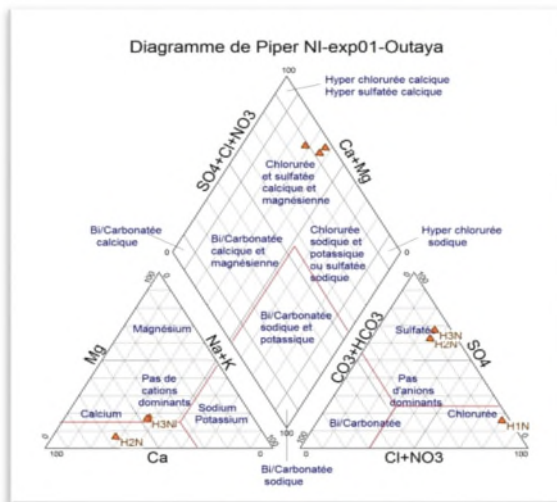


Fig124 : Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la première exploitation ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon3 (H3N 40-60 cm).

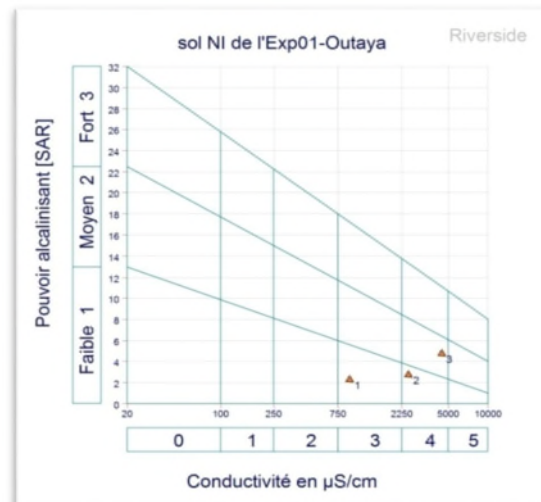


Fig125 : Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la première exploitation ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon3 (H3N 40-60 cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué

Le calcul des indices de saturation (Tableau 146) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturées pour la halite, le gypse et l'anhydrite pour les trois horizons successifs (0-20 cm /20-40 cm et 40-60 cm).

Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 146 : Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués.

eau	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1NI	-5.75	-1.29	-1.51	0.33	0.47	0.65
H2NI	-5.84	-0.28	-0.50	1.13	1.27	1.65
H3NI	-5.34	-0.12	-0.33	1.08	1.23	2.13

Tableau 147 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la première exploitation.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-5.84	-5.34	-5.64	0.27
IS gypsum	-1.29	-0.12	-0.56	0.63
IS anhydrite	-1.51	-0.33	-0.78	0.64
IS aragonite	0.33	1.13	0.85	0.45
IS calcite	0.47	1.27	0.99	0.45
IS dolomite	0.65	2.13	1.48	0.76

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol a été effectuée à l'aide du logiciel thermodynamique « Phreeqi 2.8 » (*versionfree*), en termes d'équilibres sels/solution. Elle montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est varié entre 0.33 et 2.13. donc, le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans la solution du sol indique que seuls les minéraux carbonatés tendent à précipiter surtout sous la forme de dolomite. Par contre les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation, et note que le gypse est proche de l'équilibre ($-1.29 < \text{IS gypse} < -0.12$), qui permet de se précipiter surtout dans l'horizon profond (40-60 cm).

Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des sols analysés et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se trouvent dans la solution du sol à l'état d'équilibre (saturés) à sursaturation et précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

Changement du sol sous irrigation, cultivé en Poacées (orge)

En Algérie, les céréales constituent 69% de la ration alimentaire, ce qui fait d'elle une culture stratégique qui s'occupe presque les 50% de la surface agricole utilisée (SAU). Les deux tiers de cette superficie sont localisés sur les hauts plateaux et les hautes plaines. (Hadj-Youcef, 2009). Elles sont pratiquées en irrigué dans les Régions Arides.

La céréaliculture dans la wilaya de Biskra est pratiquée essentiellement en irriguée avec une superficie de **27 166 ha** (Statistique de 2013) et une production de **666917 qx**. (statistique de 2013) or les statistiques de la campagne agricole (2015/2016) ont donné une superficie total récolté de **25542 ha** avec une production de **777 752 qx** figuré par une augmentation de rendement , les communes productives de céréales sont surtout indiqués dans le tableau ci-dessous, dont la plaine d’El-Outaya prend le 5^{ème} rang des communes productives avec 2420 ha irrigués réservés aux céréales où une superficie de 970 ha récoltée en grains d’orges selon les statistiques de la campagne 2014.(DSA,2014). Sachant que la production totale de la wilaya de Biskra en orge est de 192 143 qx avec 23 qx/ha(2014), pour 2016 elle est de 210993 qx avec 24qx/ha. Ces données confirment que l’orge est la deuxième céréale après le blé dur. (Tellah, 2005).

Tableau 148 : Les principales communes à vocation céréalières. (Statistique 2013).

Commune	Répartition de la superficie irriguée réservée pour les céréales (ha)
Ain Naga	4940.00
El-Faïdh	4651.00
Zeribet el-oued	3887.00
Elhaouche	3450.00
El-Outaya	2420.00
Doucen	1925.00
Mziraâ	1557.00
Sidi-Okba	1530.00

En effet, dans ces régions l’eau d’irrigation, à cause de sa forte concentration en sels, a un impact négatif sur le développement et la productivité des cultures, mais il diffère selon plusieurs paramètres (caractéristiques des sols, types de sels, nature des plantes et stade physiologique (Daoud et Halitim, 1994). Parmi les voies et les moyens permettant de lutter contre la salinité des eaux et des sols il est fait souvent appel à la sélection des espèces et/ou variétés adaptées à ces conditions d’une part et, à la maîtrise du couple irrigation-drainage et à l’amélioration du potentiel nutritif du sol et notamment azoté d’autre part. On note aussi que les agriculteurs peuvent adapter les cultures au niveau de salinité : agrumes, oliviers, grenadiers et autres cultures dites sensibles en amont, dans les parcelles peu salées, et artichauts et cucurbitacées en aval, dans les zones plus salées, selon l’étude réalisé par (Hartani et al, 2009), d’où la nécessité d’une véritable stratégie nationale impliquant tous les secteurs(Formation-Recherche-Agriculture-Eau-Energie-Industrie-Commerce,...)et toutes les disciplines (Agronomie-Hydraulique Génétique-Biotechnologie-Economie,...).

Les résultats analytiques des moyens des sondages du sol irrigué de la première exploitation sont mentionnés dans les tableaux suivants.

Tableau 149 : Résultats analytiques des moyens des sondages du sol irrigué.

Horizon (cm)	0-20	20-40	40-60
PH1/2,5	8.21	8.10	8.15
CE 1/5 mmhos/cm	1.48	4.47	5
Calcaire Total %	41.25	41.25	38.75
Calcaire actif.%	17	17	17
SAR	3.32	4.73	4.67
ESP %	3.50	5.39	5.31

Tableau 150: Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5).

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-20	8.02	4.05	8.16	0.57	11	3.21	1.4	3.43
20-40	26.05	9.32	19.91	0.35	14	36.72	4	0.38
40-60	30.06	4.8	19.51	0.20	14	42.78	4	0.33

D'après les analyses physico-chimiques du changement du sol sous irrigation de la première exploitation, il est assez profond (0-60 cm selon le système racinaire de la plante cultivée orge principalement), il s'agit d'un sol à horizons fortement calcaire (autour de 40 %) avec présence de calcaire actif de 17 % qui est un indice de pouvoir chlorosant induit à une augmentation du pH du sol irrigué et il est basique (selon Baize, 1988 $7.5 < \text{pH} < 8.7$) mettant le sol dans une ambiance physico-chimique bien particulier caractérisée par la surabondance de cation Ca⁺⁺ et l'anion SO4⁻ surtout en profondeur. La conductivité électrique, selon l'échelle de l'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol saturé 1/5 à 25°C (Aubert, 1986), elle est légèrement salin à salé ($2 \text{ mS/cm} < \text{CE} < 8 \text{ mS/cm}$) et augmente en profondeur caractérisé un profil salin de type D par rapport au sol de référence, l'effet de l'irrigation est apparait.

Selon le digramme de Riverside de l'horizon de surface (0-20cm) a une classe de C3S1, on note ici l'effet de la culture de l'orge sur l'absorption des sels comme une plante tolérante ajouté au lessivage, par contre l'autre horizon en profondeurs a une classe de C4S2 où s'accumule les sels. La salinité du sol enregistrée après irrigation reste supérieur à 2 dS/m (salinité du sol non irrigué), elle est suffisante pour un bon rendement chez la culture de Poacées (orge principalement), mais il ne faut pas dépasser pour un sol irrigué 8 dS/m ; seuil de baisse de rendement (Ayers et Westcot, 1976). Le profil salin est de type D présente une

augmentation régulière de la salinité avec la profondeur. Elle correspond à un processus permanent de désalinisation si la salinité reste faible.

Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique de la solution du sol de première horizons (0-20 cm) est de type chloruré-sulfaté ($1 < Cl^-/SO_4^{2-} < 5$), par contre il est de type sulfato-chloruré ($0.2 < Cl^-/SO_4^{2-} < 1$), en profondeur (20 à 60 cm).

ESP est une fonction mathématique en fonction du SAR, et suit leur allure générale, si le SAR augmente, l'ESP augmente aussi et vis versa. L'ESP de tous les horizons de ce sondage varie (3.50% pour l'horizon de surface à 5.31% en profondeur). Par rapport le sol de référence (non irrigué), le SAR et ESP augmentent mais d'une façon non significative ; le SAR est inférieur à 8 et ESP reste faible et inférieur à 15 % c'est-à-dire, selon Servant et Servat (1966), le risque de sodisation est faible. Donc, **Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès chloruré-sulfaté à sulfato-chloruré en profondeur.**

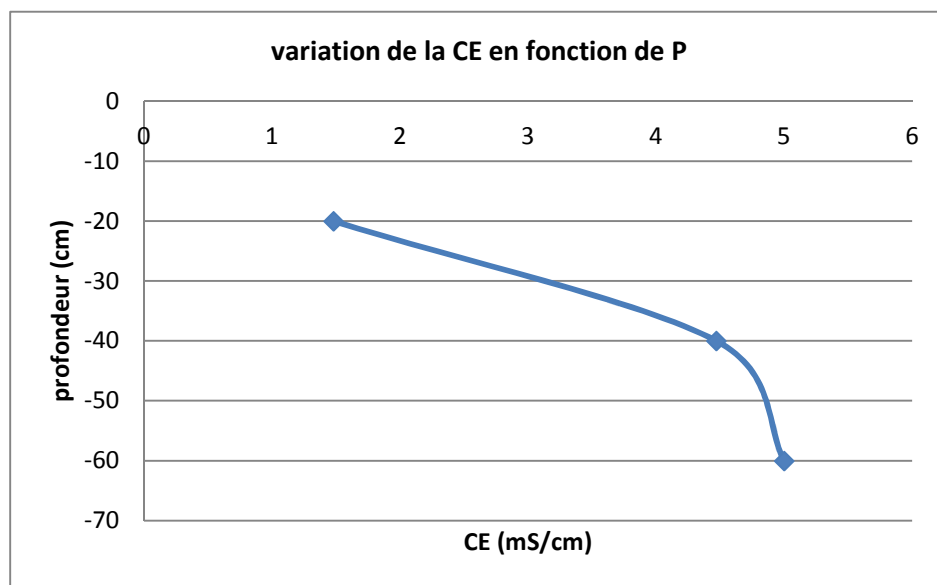


Fig126 : Profil salin de Type D de sol irrigué de la première exploitation(Exp01).

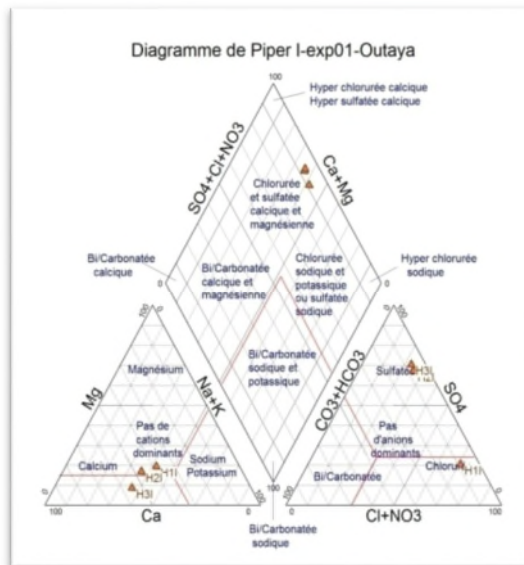


Fig.127 : Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués de la première exploitation ; horizon1 (H1I 0-20 cm), horizon 2 (H2I 20-40cm) et H3I (40-60cm).

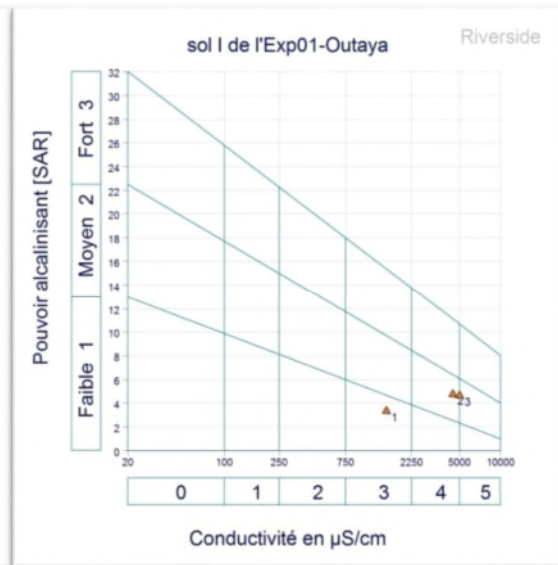


Fig. 128: Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués de la première exploitation ; horizon1 (H1I 0-20 cm), horizon 2 (H2I 20-40cm) et H3I (40-60cm).

Tableau 151 : Matrice de corrélation des sols de la première exploitation.

	CE	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	pH
CE	1,000	0,880	0,862	0,988	-0,777	-0,256	0,985	0,910	-0,854
Ca		1,000	0,517	0,800	-0,902	-0,510	0,908	0,994	-0,968
Mg			1,000	0,926	-0,435	0,079	0,804	0,578	-0,505
Na				1,000	-0,680	-0,203	0,953	0,844	-0,789
K					1,000	0,146	-0,870	-0,859	0,765
Cl						1,000	-0,191	-0,538	0,682
SO4							1,000	0,920	-0,843
HCO3								1,000	-0,983
pH									- 1,000

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol

Le calcul des indices de saturation (Tableau 152) montre que les sols étudiés sont saturés par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturées pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation, donc susceptibles de se dissoudre. On constate qu'au niveau du deuxième horizon, que la dynamique des sels se fonctionne.

Tableau152 : Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1irr	-5.76	-1.29	-1.51	0.57	0.71	1.26
H2irr	-5.34	-0.12	-0.33	1.08	1.23	2.13
H3irr	-5.35	-0.01	-0.23	1.22	1.36	2.04

Tableau 153 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué de la première exploitation.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-5.76	-5.34	-5.48	0.24
IS gypsum	-1.29	-0.01	-0.47	0.71
IS anhydrite	-1.51	-0.23	-0.69	0.71
IS aragonite	0.57	1.22	0.96	0.34
IS calcite	0.71	1.36	1.10	0.34
IS dolomite	1.26	2.13	1.81	0.48

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol irrigué dans la plaine d'el-Outaya montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation) et varié entre 0.57 à 2.13. On constate aussi que l'indice de saturation du gypse ($\text{Ca SO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) ; minéral évaporitique, est proche de la saturation (état d'équilibre IS gypse -0.01) donc, il ya une tendance de se précipiter le gypse en profondeur de 60 cm.

Pour les autres minéraux évaporitiques, il se trouvent sous saturation et on constate que le anhydrite (CaSO_4) proche de la saturation (état d'équilibre) pour l'horizon de 40à 60 cm de profondeur indique leur état en voie de précipitation, alors que l'halite(NaCl) se présente largement sous saturé ($-5.76 < \text{IS} < -5.34$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans la solution du sol contribuant à une augmentation de la minéralisation.(quel que soit le sol irrigué ou non, le sodium, le sulfate sont nettement lié avec la conductivité électrique selon la matrice de corrélation du tableau 152).on constate aussi une relation hautement significative entre les minéraux carbonatés : Ca-HCO_3 , et évaporitiques : Na-SO_4).

Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des sols analysés et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés dépassent l'état d'équilibre et se précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomie.

✚ Sol de la deuxième exploitation irrigué par F2 à faciès sulfaté (sol P2 sur fig.134).

1-Sol non irrigué (N 34°59'42.1"E 005°32'25.0" Z 223,4 m) Maghraoua

Tableau 154 : Résultats analytiques des moyens des sondages.

Horizon (cm)	0-20	20-40	40-60
PH1/2,5	7.92	7.96	8.2
CE 1/5 mmhos/cm	1	0.92	0.69
Calcaire Total %	41.66	38.33	41.66
Calcaire actif.%	8.5	12.75	16.5
SAR	2.75	8.48	2.54
ESP %	2.71	10.07	2.42

Tableau 155 : Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5) de moyens des sondages.

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-20	8.02	7.09	7.57	0.27	14	29.23	1.4	0.48
20-40	10.02	1.01	19.91	0.21	9	24.78	2.4	0.36
40-60	9.02	2.03	5.97	0.29	6	15.15	2.4	0.40

D'après les analyses physico-chimiques du sondage du sol non irrigué de la deuxième exploitation, il est assez profond (0-60 cm), il s'agit d'un sol à horizons fortement calcaire (autour de 40 %) avec présence de calcaire actif supérieur à 15 % au-delà de 40 cm de profondeur qui est un indice de pouvoir chlorosant, avec un pH élevé et basique (selon Baize, 1988 $7.5 < \text{pH} < 8.7$) mettant le sol dans une ambiance physico-chimique bien particulier caractérisée par la surabondance de cation Ca⁺⁺. Na⁺ et SO4⁻.

La conductivité électrique, selon l'échelle de l'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol saturé 1/5 à 25°C (Aubert, 1986), elle est non salé pour tous les horizons (CE < 2 mS/cm). Selon le diagramme de Riverside, on peut ressortir trois classes : C3S1 et C3S2 pour l'horizon de surface et médian (0-40 cm) et C2S1 pour la profondeur. Le profil salin est de type A avec une salinité qui affecte l'horizon de surface.

Selon Servant et Servat (1966), tous les horizons du sol non irrigués ont le même faciès chimique de la solution du sol sulfato-chloruré ($0.2 < \text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} < 1$), le report des deux horizons sur le diagramme de piper, fait ressortir un horizon à faciès sulfaté –calciq en surface, et en profondeur un autre horizon à faciès sulfaté calciq et sodiq en horizon moyen profondeur d'où l'augmentation du SAR : C3S2.

L'allure générale de l'ESP suit celle de SAR, les deux paramètres sont faible et proche en surface (0-20cm) et en profondeur, par contre ils ont augmenté en horizon médian et multiplier en facteur de 4 fois et arrivent à 10 % d'ESP et 8.5 pour le SAR qui sont contraignant et posent un danger d'alcalinisation. Donc, **Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès sulfato-chloruré.**

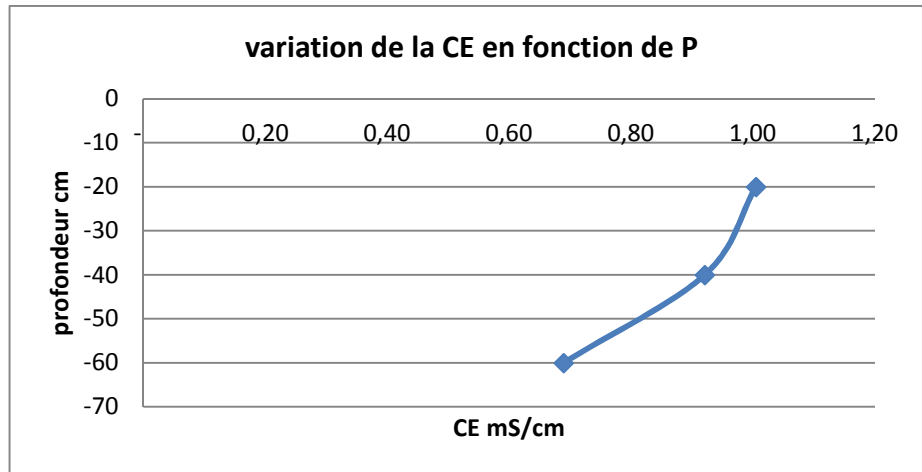


Fig129 : Profil salin de Type A du sol non irrigué de la deuxième exploitation El-Outaya.

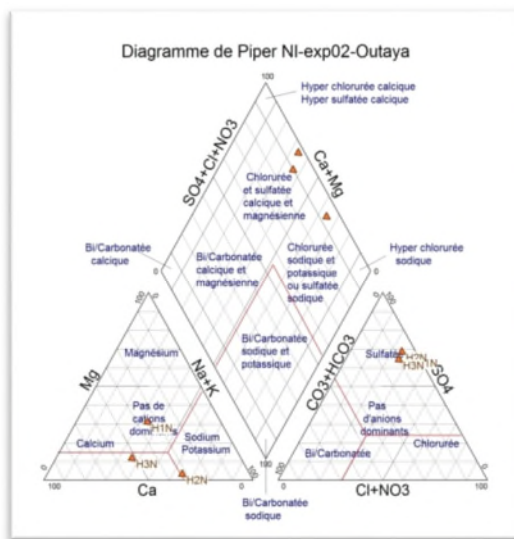


Fig130 : Représentation sur le diagramme de Piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la deuxième exploitation ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60 cm).

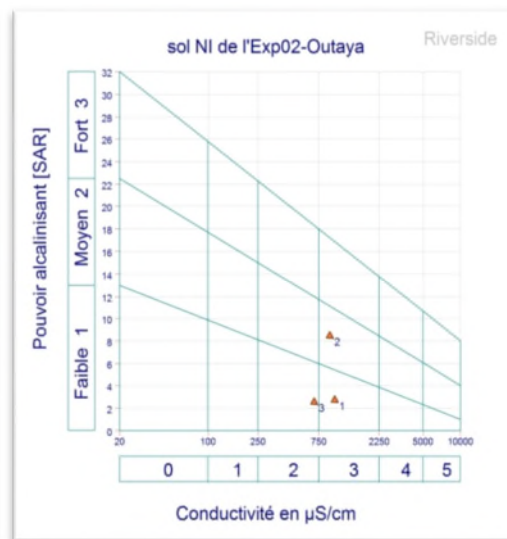


Fig.131: Représentation sur le diagramme de Riverside des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols non irrigués de la deuxième exploitation ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60 cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué

Le calcul des indices de saturation (Tableau 156) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturée pour la halite, le gypse et l'anhydrite pour les trois horizons successifs (0-20 cm /20-40 cm et 40-60 cm). Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 156 : Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols non irrigués.

eau	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1NI	-5.73	-0.57	-0.79	0.07	0.21	0.49
H2NI	-5.50	-0.51	-0.73	0.46	0.60	0.32
H3NI	-6.17	-0.65	-0.87	0.74	0.88	1.23

Tableau 157 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la deuxième exploitation.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-6.17	-5.50	-5.80	0.34
IS gypsum	-0.65	-0.51	-0.58	0.07
IS anhydrite	-0.87	-0.73	-0.80	0.07
IS aragonite	0.07	0.74	0.42	0.34
IS calcite	0.21	0.88	0.56	0.34
IS dolomite	0.32	1.23	0.68	0.48

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol a été effectuée à l'aide du logiciel thermodynamique « **Phreeqci 2.8** » (*versionfree*), en termes d'équilibres sels/solution. Elle montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positif et varié de 0.07 à 1.23. Par contre les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation, surtout l'halite qui est largement dissous qui exprime la salinité des sols analysés.

Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des sols analysés et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se trouvent dans la solution du sol à l'état d'équilibre (saturés) à sursaturation et précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

2-Sol irrigué et cultivé en cucurbitacées (N 35°00'40.8" E 005°33'27.2" Z 235,2 m).

La pastèque et melon est un fruit de la famille de cucurbitacées largement cultivés dans la wilaya de Biskra en irrigué et en plein champs. Un fruit qui tolère la salinité des eaux et de sols, sa production est affectée à 50 % dès une conductivité électrique de l'eau d'irrigation de 6.1 mS/cm (selon ayers et Westcot, 1976).

Tableau 158 : Résultats analytiques des moyens des sondages du sol irrigué.

Horizon (cm)	0-20	20-40	40-60
PH1/2,5	7.92	7.97	7.95
CE 1/5 mmhos/cm	2.48	3.41	3.32
Calcaire Total %	39.58	39.16	40
Calcaire actif.%	20.5	22	18.75
SAR	3.18	3.80	4.02
ESP %	3.31	4.15	4.45

Tableau 159 : Bilan ionique de la solution du sol (rapport 1/5) de moyen des sondages.

Horizon (cm)	Cations solubles meq/l				Anions solubles meq/l			Cl/SO4
	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ⁻	HCO3 ⁻	
0-20	24.05	5.06	12.15	0.49	12	24.24	4.2	0.5
20-40	22.04	12.15	15.73	0.26	9	32.44	2	0.28
40-60	24.05	8.1	16.13	0.35	12	35.47	2.2	0.34

D'après les analyses physico-chimiques du sondage du sol irrigué de la deuxième exploitation, il est assez profond (0-60 cm), il s'agit d'un sol à horizons fortement calcaire (autour de 40 %), très bien pourvus en réserves calciques (calcaire actif supérieur à 15 % et peut atteindre au moyenne 20%) qui est un indice de pouvoir chlorosant, avec un pH élevé, et ne varie pas le long du sondage, basique (selon Baize (1988) 7.5<pH<8.7) mettant le sol dans une ambiance physico-chimique bien particulier caractérisée par la surabondance des ions Ca⁺⁺. Na⁺, Cl⁻ et SO4⁻.

La conductivité électrique, selon l'échelle de l'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol saturé 1/5 à 25°C (Aubert, 1986), elle est légèrement salée pour les trois horizons et augmente en profondeur de 60 cm (2 mS/cm <CE<4 mS/cm). Selon le digramme de Riverside l'horizon de surface (0-20cm) a une classe de C4S1, par contre les deux autres horizons en profondeurs ont une classe de C4S2. La salinité du sol enregistrée après irrigation reste supérieur à 1 dS/m (salinité du sol non irrigué), elle est suffisante pour provoquer une baisse de rendement chez la culture de cucurbitacées (pastèque et melon) surtout pour une CE du sol irrigué dépasse 2.2 dS/m, une réduction de 50 % de rendement à un CE du sol de 9.1 dS/m (Ayers et Westcot, 1976) d'où la nécessité du

drainage. Le profil salin est de type B exprime une salinisation en moyenne profondeur sous l'influence de l'irrigation.

Selon Servant et Servat (1966), les trois horizons du sol irrigués ont le même faciès chimique de la solution du sol sulfato-chloruré ($0.2 < Cl-/SO_4 < 1$), le report des trois horizons sur le diagramme de piper, note la dominance de sulfate et de calcium. La dominance du faciès sulfaté par rapport au faciès chloruré car en plus du faciès sulfaté des eaux d'irrigation, cette zone est donc loin de l'influence du Diapir.

L'allure générale de l'ESP suit celle de SAR, les deux paramètres sont faible et proche le long du sondage accumulé une profondeur de 60cm, sachant que l'irrigation a conduit à lessiver les sels au-delà de 60 cm, c'est pour ça on remarque l'abaissement de ces deux paramètres par rapport au sol non irrigué surtout dans le moyen horizon, donc, ils ne sont pas contraignants et ne posent pas un danger d'alcalinisation. Donc, **Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès sulfato-chloruré.**

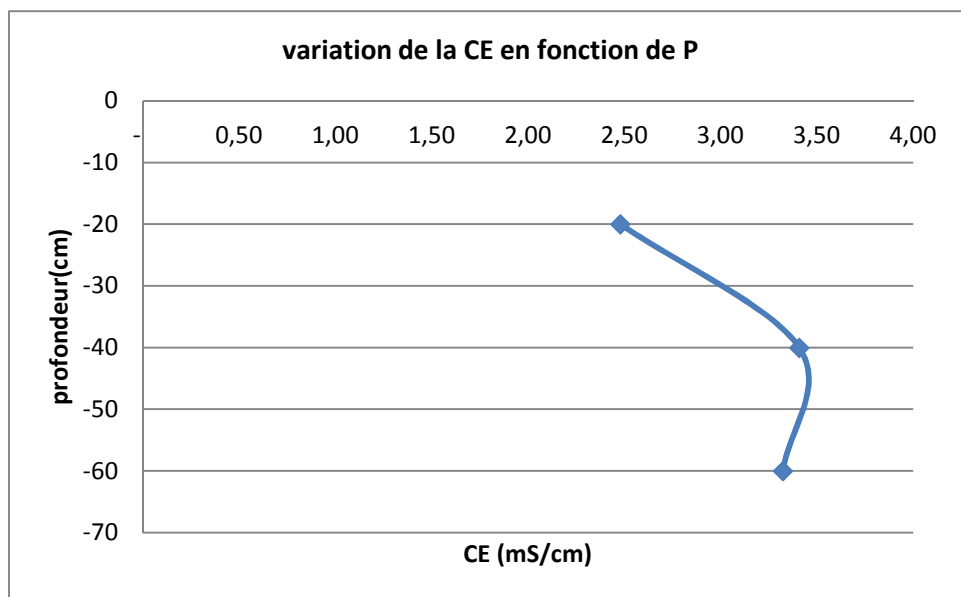


Fig132 : Profil salin de Type B du sol irrigué de la deuxième exploitation El-Outaya.

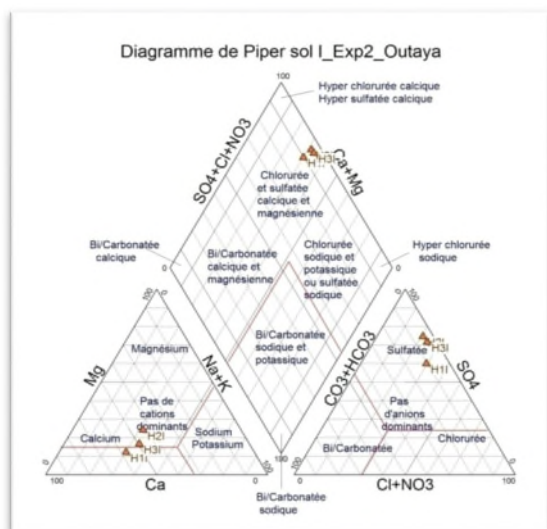


Fig.133a : Représentation sur le diagramme de piper des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués de la deuxième exploitation ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60cm).

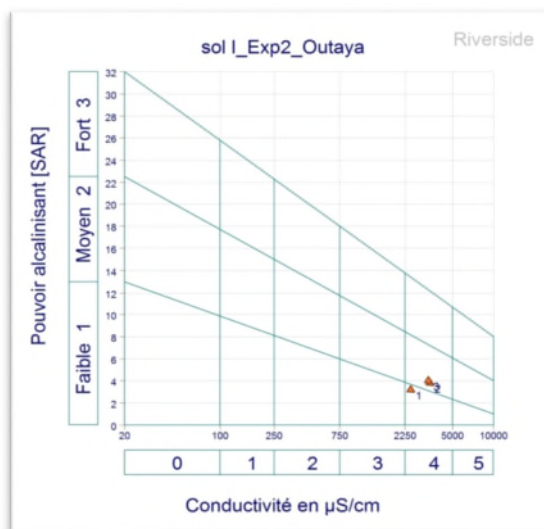


Fig.133 b: Représentation sur le diagramme de Riverside de la salinité et sodicité des solutions d'extraits aqueux 1/5 de sols irrigués de la deuxième exploitation ; horizon1 (H1N 0-20 cm), horizon 2 (H2N 20-40cm) et horizon 3(H3N 40-60cm).

Géochimie et l'Indice de saturation (SI) des minéraux présents dans la solution du sol irrigué

Le calcul des indices de saturation (Tableau 160) montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturée pour la halite, le gypse et l'anhydrite pour les trois horizons successifs (0-20 cm /20-40 cm et 40-60 cm). Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre.

Tableau 160 : Composition moyenne de l'Indice de Saturation des minéraux présents dans la solution des sols irrigués.

sol	IS halite	IS gypsum	IS anhydrite	IS aragonite	IS calcite	IS dolomite
H1irr	-5.60	-0.23	-0.45	1.03	1.17	1.79
H2irr	-5.62	-0.20	-0.42	0.68	0.82	1.50
H3irr	-5.49	-0.13	-0.35	0.72	0.87	1.37

Tableau 161 : Etude statistique de l'indice de saturation (IS) des minéraux présents dans la solution du sol non irrigué de la première exploitation.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-5.62	-5.49	-5.57	0.07
IS gypsum	-0.23	-0.13	-0.19	0.05
IS anhydrite	-0.45	-0.35	-0.41	0.05
IS aragonite	0.68	1.03	0.81	0.19
IS calcite	0.82	1.17	0.95	0.19
IS dolomite	1.37	1.79	1.55	0.22

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol a été effectuée à l'aide du logiciel thermodynamique « **Phreeqi 2.8** » (*versionfree*), en termes d'équilibres sels/solution. Elle montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas **Dolomite** ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), **Calcite** (CaCO_3), **Aragonite** (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positif et varié de 0.68 à 1.79. En revanche, Les minéraux évaporitiques augmentent en profondeur de 60 cm et tendent à saturer surtout pour le gypse, par contre les minéraux carbonatés sont en maximum en surface et positifs donc se précipitent toujours.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans la solution du sol indique que seuls les minéraux carbonatés tendent à précipiter surtout sous la forme de dolomite. Par contre les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation, cela peut être expliqué par l'effet des valeurs élevées, pour le sol irrigué des trois horizons, de la constante d'équilibre des minéraux évaporitiques (NaCl 1.58 ; CaSO_4 (-4.58)), ce qui permet aux éléments évaporitiques de se présenter dans l'eau à des concentrations élevées. Par contre pour les minéraux carbonatés, la constante d'équilibre est plus faible (dolomite (-17.09), calcite (-8.48) et aragonite (-8.34)), ce qui produit une précipitation rapide des minéraux carbonatés.

Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des sols analysées et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se trouvent dans la solution du sol à l'état d'équilibre (saturés) à sursaturation et précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

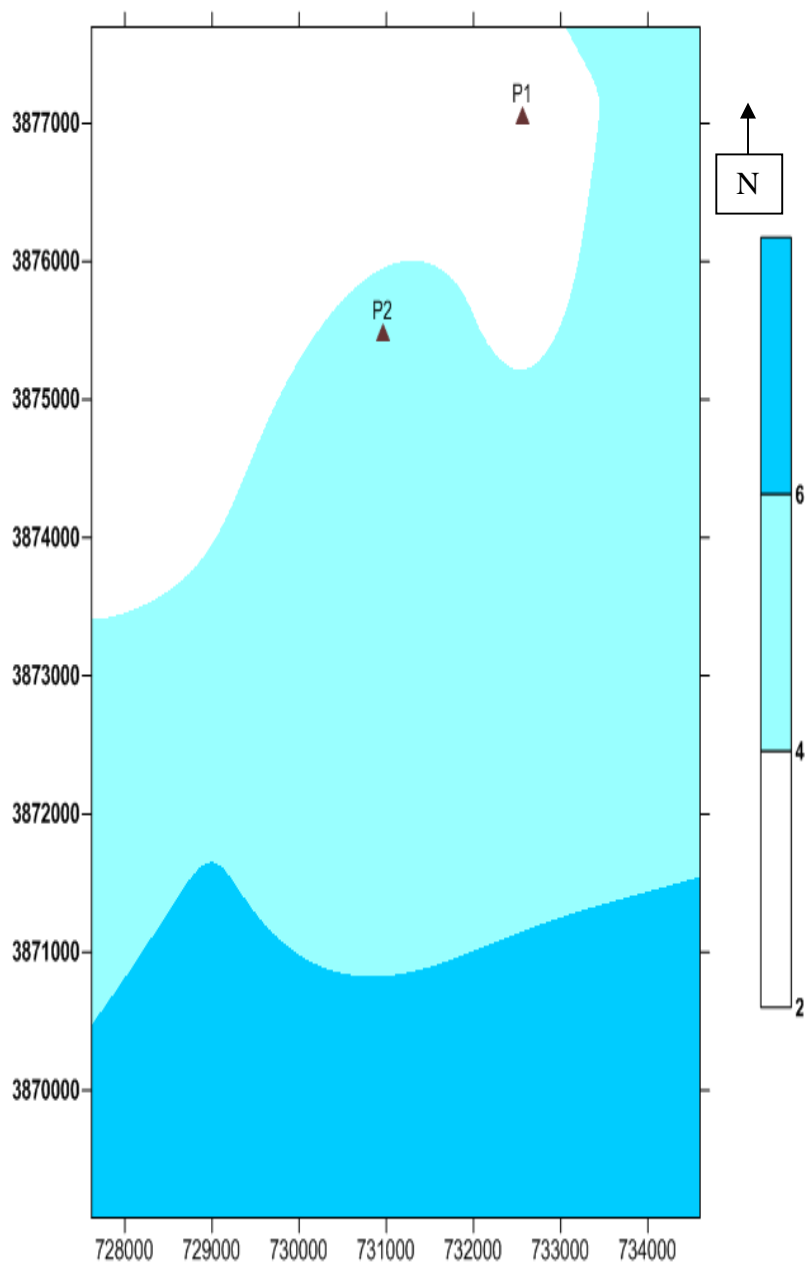


Fig.134 : Carte de positionnement des sondages du sol des deux exploitations (01 et 02) irriguées par les eaux de forage (F5(01) et F8(02)) mentionnées sur la carte de salinité des eaux d'irrigation de la nappe de Miopliocène.

VIII-3- 2-Discussion des résultats/ synthèse

✚ Changement du sol sous irrigation / Evolution géochimique des sols :

Tableau 162 : Analyses statistiques des différents paramètres mesurés pour les sols non irrigués par les eaux souterraines :

Paramètres mesurés	minimum	maximum	moyenne	écartype
CE (1/5)(dS/m)	0.69	4.47	1.76	1.49
pH 1/2.5	7.92	8.31	8.08	0.15
Calcaire total %	38.33	41.66	40.76	1.27
Calcaire actif %	8.50	17	14.29	3.21
Ca ⁺⁺ (meq/l)	6.41	26.05	14.06	8.91
Mg ⁺⁺ (meq/l)	1.01	9.31	4.05	3.33
Na ⁺ (meq/l)	4.78	19.91	11.38	6.85
K ⁺ (meq/l)	0.21	0.48	0.33	0.09
Cl ⁻ (meq/l)	6	19	11.67	4.84
SO ₄ ⁻ (meq/l)	3.74	36.72	21.45	11.52
HCO ₃ ⁻ (meq/l)	0.80	4	2.43	1.23
Cl/SO ₄	0.36	5.08	1.19	1.91
SAR	2.27	8.48	3.92	2.40
ESP %	2.04	10.07	4.22	3.11

L'examen des résultats d'analyse des paramètres physicochimiques du sol (tableau163), montre la présence d'une salinité surtout en profondeur (CE de l'extrait diluée (1/5) supérieure à 3 dS/m pour le maxima) mais non fortement salée pour l'ensemble des échantillons. Le profil salin moyen trouvé est, selon Servant 1978, est alterné entre celui de type A indique une salinisation et de type D présente une augmentation régulière de la salinité avec la profondeur. Elle correspond à un processus permanent de désalinisation si la salinité reste faible. Donc, le sol non irrigué de la plaine d'El-Outaya est déjà salé. Le calcaire total est présent dans tous les échantillons des sols étudiés avec des teneurs très élevées représentée par une moyenne qui dépasse les 40 % qu'il s'agit, en générale, d'un sol fortement calcaires selon l'échelle établie par Baize(1988). Le pH est généralement basique (7.5<pH<8.3) dû principalement à une augmentation du taux de calcaire dans le sol. On constate une proportion importante de calcaire actif qui peut dépasses les 15 % selon les horizons ; seuil limite du pouvoir chlorosant. Le sol de la plaine d'El-Outaya est de texture fine, surtout limoneuse et argileuse. Selon l'échelle de l'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol saturé 1/5 à 25°C (Aubert, 1986), elle est non à légèrement salé (2 mS/cm <CE<4 mS/cm). Les profils salins sont réparties entre A et D selon Servant (1978) donc, une distribution saline présentant un maximum dans les horizons

superficiels(A) et profond (D) traduisant un processus ascendant et/ ou descendant de salinisation sous l'effet de l'évaporation conjugués avec l'irrigation ou pluies.

Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique dominant des sols non irrigués est sulfato-chloruré où la solution du sol de tous les horizons est de type sulfato-chloruré ($0.2 < Cl^-/SO_4^{2-} < 1$) selon la profondeur du sol à l'exception d'un seul horizon de surface qui est chloruré représenté par le maxima de l'analyse statistique indiqué dans le tableau ci-dessus, et le positionnement des sondage de la direction nord-est (où se trouve le dôme du Trias) vers la direction nord ouest loin du diapir du dôme du sel et près de la zone de Tolga.

ESP est une fonction mathématique en fonction du SAR, et suit leur allure générale, si le SAR augmente, l'ESP augmente aussi et vis versa. Les deux paramètres représentent un sol légèrement sodique.

Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès sulfato-chloruré le long du sondage.

Tableau 163 : Moyenne de l'indice de saturation des minéraux présents dans le sol non irrigué.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-6.17	-5.34	-5.72	0.29
IS gypsum	-1.29	-0.12	-0.57	0.40
IS anhydrite	-1.51	-0.33	-0.79	0.41
IS aragonite	0.07	1.13	0.64	0.42
IS calcite	0.21	1.27	0.78	0.43
IS dolomite	0.32	2.13	1.08	0.72

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol non irrigué de la zone de la plaine d'El-Outaya montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas surtout pour les minéraux carbonatés : Dolomite ($CaMg(CO_3)_2$), Calcite ($CaCO_3$), Aragonite ($CaCO_3$). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positif et proche de l'équilibre pour son minimum et dépasse largement l'état de saturation (positive) et se cristallise (précipitation) pour son maximum, il est varié de 0.07 à 2.13. Par contre, l'indice de saturation des minéraux évaporitiques est négatif reflète une sous saturation ou dissolution comme pour le gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) que l'anhydrite. Par ailleurs, l'indice de saturation d'halite($NaCl$), se présente largement sous saturé ($-6.17 < IS < -5.34$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols.

Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des sols analysés et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se

trouvent dans la solution du sol à l'état d'équilibre (saturés) à sursaturation et précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

✚ Sols irrigués

Tableau 164 : Analyses statistiques des différents paramètres mesurés pour les sols irrigués :

Paramètres mesurés	minimum	maximum	moyenne	écartype
CE (1/5) (dS/m)	1.48	5	3.36	1.28
pH 1/2.5	7.92	8.21	8.04	0.12
Calcaire total %	38.75	41.25	40	1.06
Calcaire actif %	17	22	18.71	2.14
Ca ⁺⁺ (meq/l)	8.02	30.06	22.38	7.54
Mg ⁺⁺ (meq/l)	4.05	12.15	7.25	3.16
Na ⁺ (meq/l)	8.16	19.91	15.26	4.49
K ⁺ (meq/l)	0.20	0.57	0.37	0.14
Cl ⁻ (meq/l)	9	14	12	1.90
SO ₄ ⁻ (meq/l)	3.21	42.78	29.14	14.08
HCO ₃ ⁻ (meq/l)	1.40	4.20	2.97	1.24
Cl/SO ₄	0.28	3.43	0.88	1.25
SAR	3.18	4.73	3.96	0.65
ESP %	3.31	5.39	4.35	0.88

L'examen des résultats d'analyse des paramètres physicochimiques du sol après la mise en irrigation des cultures cultivées selon chaque exploitation, (tableau164), montre un changement bien considérable dans tous les paramètres ; la présence d'une salinité élevée (CE de l'extrait diluée (1/5) supérieure à 3 dS/m) pour l'ensemble des échantillons. Cette forte salinité est attribuée aux effets conjugués de la qualité de l'eau d'irrigation préalablement salée, aux conditions climatiques très arides produisant une forte évapotranspiration qui concentre la solution du sol (Cheverry et Robert, 1998), et surtout à l'absence d'un réseau de drainage. Le profil salin moyen trouvé est, selon Servant 1978, alterné entre celui de type B indique une désalinisation temporaire de la surface du sol et le profil salin de type D présente une augmentation régulière de la salinité avec la profondeur. Elle correspond à un processus permanent de désalinisation si la salinité reste faible. Donc, on constate un déplacement de la salinité en profondeur du sol irrigué de la plaine d'El-Outaya qui est déjà salé. Le sol reste bien sûr calcaire avec une augmentation assez légère où, en générale, il s'agit d'un sol fortement calcaire selon l'échelle établie par Baize(1988). Le pH est généralement basique (7.5<pH<8.3). Dans l'ensemble on constate une augmentation du taux de calcaire avec une légère augmentation du calcaire actif qui dépasse largement le seuil conseillé 15%, en même temps on observe une certaine modification vers l'augmentation dans tous les sels solubles apportés principalement par l'eau d'irrigation surtout pour le

Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺ et SO₄⁻, conduisant à une légère diminution du SAR et ESP dû principalement à un lessivage des sels au delà de profondeur analysée (> 60 cm).

Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique dominant des sols irrigués est alterné entre chloruré-sulfaté en surface(0-20cm) à sulfato-chloruré au-delà de 20 cm selon la profondeur du sol dû à l'apport de ces deux éléments par les eaux d'irrigation surtout souterraines surtout pour l'exploitation 02(faciès sulfaté), sachant que un faciès de salinité du sol chloruro-sulfaté, largement représenté dans les régions arides, est constitué de sels à réaction proche de la neutralité, très solubles, donc très mobiles et susceptibles de se concentrer fortement sous ces climats ; ils sont constitués de chlorures dominants, sodiques, calciques ou magnésiens, associés à des sulfate. (Bouteyre et Loyer, 1992).

Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès chloruré sulfaté à sulfato-chloruré en profondeur.

Tableau 165 : Moyenne de l'indice de saturation des minéraux présents dans le sol irrigué.

Indice de saturation	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecartype
IS halite	-5.76	-5.34	-5.53	0.16
IS gypsum	-1.29	-0.01	-0.33	0.48
IS anhydrite	-1.51	-0.23	-0.55	0.48
IS aragonite	0.57	1.22	0.88	0.26
IS calcite	0.71	1.36	1.03	0.26
IS dolomite	1.26	2.13	1.68	0.36

Le suivi de la simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol irrigué de la plaine d'El-Outaya montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas surtout pour les minéraux carbonatés : Dolomite (CaMg(CO₃)₂), Calcite (CaCO₃), Aragonite (CaCO₃). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positif et dépasse largement l'état de saturation (équilibre) et se cristallise (précipitation), il est varié de 0.57 à 2.13, on peut constater une précipitation plus concentrée de ces minéraux sous irrigation par rapport à sol non irrigué. Par contre, l'indice de saturation des minéraux évaporitiques est négatif reflétant une sous saturation ou dissolution comme pour le gypse (CaSO₄, 2H₂O) que l'anhydrite, ils sont négatifs mais proches de l'état de l'équilibre surtout pour le gypse dû essentiellement à l'apport des sulfates par les eaux d'irrigation a conduit à un début de précipitation du gypse dans le sol.

Par ailleurs, l'indice de saturation d'halite(NaCl), se présente largement sous saturé (-5.76<IS<-5.34), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols, mais il est plus concentré dans le sol irrigué par rapport à l'état initial non irrigué ce qui augmente la conductivité électrique(CE). Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques

sur la salinité des sols analysés et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se trouvent dans la solution du sol à l'état d'équilibre (saturés) à sursaturation et précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

VIII-3- 3-Conclusion

De cette étude préliminaire, il ressort que les sols des trois périmètres étudiés dans la plaine d'El Outaya sont de textures variables et sont, surtout, limono-sableuses à limono-argileuse. Ils sont d'apports alluviaux plus ou moins salés ou sodiques (sols peu évolués et halomorphes). Ces sols sont, selon Baise (1988) neutres à très basiques et selon Aubert (1978) non salés à excessivement salés et non sodiques à légèrement sodiques.

Une analyse des données de l'étude agropédologique de l'ANRH (Lezzar, 1980) a été effectuée. Cette analyse a fait ressortir que les sols de la plaine d'El-Outaya sont des sols salés, avec une proportion de sols sodiques, couvrent la plus grande partie de cette plaine de 33.300 ha Dont de 13953 ha des sols irrigables considérés aptes à la mise en valeur hydro-agricole sur la base de leurs propriétés physico-chimiques, ainsi que différents facteurs naturels (géomorphologie, topographie, climat,...). (Rechachi, 2010).

Selon les sols de la région sont de texture variable mais avec beaucoup d'horizons de texture fine. Ils sont basiques (pH entre 7,4 et 8,6) avec un taux de matière organique entre 0,3 et 3,1%, mais généralement faible, fortement calcaire (moyenne de 40 % selon notre résultats en 2016 et gypseux à très gypseux (entre 6,3 et 28,6% Benaouda et al, (2008)). Donc, ils sont généralement caractérisés par la présence combinée des sels solubles du gypse et du calcaire. Leur texture reste toujours fine à très fine. La formation de ces sols est sujette à trois facteurs qui sont l'aridité du climat (faible précipitation et forte évaporation) qui exclue tout lessivage, des fortes crues et des récurrences d'inondation maintiennent les sols à un état de faible développement et font des sols au faciès peu évolué. La présence du trias et des autres formations géologiques (helvétique et tortoniennes) sont à l'origine de la richesse des matériaux originels (alluvions et colluvion) en sels solubles, gypse et calcaire. La position topographique a joué un rôle dans la dynamique de ces éléments et les dépôts des sédiments provenant des crues successives.

Dans la plaine d'El-Outaya, l'irrigation est assurée par le pompage des eaux des forages de la nappe du Miopliocène qui sont salées à très salées et moyennement sodiques pour la plupart des terres cultivées de la plaine, ainsi que l'exploitation des eaux de surface dont la source principale est le barrage « Fontaine des Gazelles » sont salées et faiblement sodique qui irrigue le périmètre de M'kinet où se situent notre station expérimentale de Bioressource d'El-

Outaya (SEO du CRSTRA). Les sols irrigués, quelque soit la nature et type d'eau (forage ou barrage), ont augmenté sa salinité à cause de l'utilisation des eaux d'irrigation initialement salée ajoutée à la prédisposition des sols à la salure avec l'absence de drainage naturel (texture lourds et non sableux) que anthropique dû à l'aménagement hydro-agricole normalement doit être réalisé par les services concernées comme l'ONID (office national d'irrigation et de drainage).

Les sols analysés dans notre étude, montre que pour les sols non irrigués, on note la présence d'une salinité surtout en profondeur (CE de l'extrait diluée (1/5) supérieure à 3 dS/m pour le maxima) mais non fortement salée pour l'ensemble des échantillons. Le profil salin moyen trouvé, selon Servant 1978, est alterné entre celui de type A indique une salinisation et le profil salin de type D représente une augmentation régulière de la salinité avec la profondeur. Elle correspond à un processus permanent de désalinisation si la salinité reste faible. Donc, le sol non irrigué de la plaine d'El-Outaya est déjà salé. Par contre après la mise en irrigation des cultures cultivées selon chaque exploitations montre un changement bien considérable dans tous les paramètres ; la présence d'une salinité élevée (CE de l'extrait diluée (1/5) supérieure à 3 dS/m) pour l'ensemble des échantillons. Cette forte salinité est attribuée aux effets conjugués de la qualité de l'eau d'irrigation préalablement salée, aux conditions climatiques très arides produisant une forte évapotranspiration qui concentre la solution du sol (Cheverry et Robert, 1998), et surtout à l'absence d'un réseau de drainage. Le profil salin moyen trouvé est, selon Servant 1978, est alterné entre celui de type B indique une désalinisation temporaire de la surface du sol et le profil salin est de type D représentant une augmentation régulière de la salinité avec la profondeur. Elle correspond à un processus permanent de désalinisation si la salinité, encore, reste faible. Donc, on constate un déplacement de la salinité en profondeur du sol irrigué de la plaine d'El-Outaya qui est déjà salé et, en même temps, on observe une certaine augmentation de la concentration dans tous les sels solubles apportés principalement par l'eau d'irrigation surtout pour le Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ et SO_4^{--} conduisant à une légère diminution du SAR et ESP dû principalement à un lessivage des sels au delà de profondeur analysée (> 60 cm). Donc, ESP est une fonction mathématique en fonction du SAR, et suit leur allure générale, si le SAR augmente, l'ESP augmente aussi et vis versa. L'ESP est inférieur à 15 %. Les deux paramètres représentent un sol légèrement sodique. La salinité de sol augmente par contre la sodicité diminue aussi que pour l'ESP c'est-à-dire il ya un lessivage de sodium en profondeur (IS d'halite est en maximum -5.34). Irrigués avec des eaux salées et sodiques, ces sols évolueront vers une salinisation et une

sodisation. La réhabilitation des sols salés de la plaine d'El-Outaya exigera selon les cas un lessivage et /ou un drainage et/ou des apports d'amendement gypseux.

Les sols de la plaine sont très riches en calcaire total représentée par une moyenne qui dépasse les 40 % et bien pourvus en calcaire actif qui peut dépasser les 15 % selon les horizons ; seuil limite du pouvoir chlorosant. Le pH est généralement basique ($7.5 < \text{pH} < 8.3$). Le sol de la plaine d'El-Outaya est de texture fine, surtout limoneuse et argileuse. Enfin ils sont salins et faiblement sodiques.

Selon Servant et Servat (1966), le faciès chimique dominant des sols non irrigués que ceux irrigués par les eaux souterraines est sulfato-chloruré où la solution du sol de tous les horizons est de type sulfato-chloruré ($0.2 < \text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} < 1$) selon la profondeur du sol, à l'exception d'un seul horizon de surface qui est chloruré –sulfaté, et le positionnement des sondages de la direction nord-est (où se trouve le dôme du Trias) vers la direction nord ouest près de la zone de Tolga. Cela est dû à l'apport de ces deux éléments par les eaux d'irrigation surtout souterraines, sachant que un faciès de salinité du sol chloruro-sulfaté, largement représenté dans les régions arides, est constitué de sels à réaction proche de la neutralité, très solubles, donc très mobiles et susceptibles de se concentrer fortement sous ces climats ; ils sont constitués de chlorures dominants, sodiques, calciques ou magnésiens, associés à des sulfates. (Bouteyre et Loyer, 1992). On note, aussi, le changement du faciès de la solution du sol non irrigué de chloruré et sulfaté calcique change vers un faciès sulfaté calcique d'où l'influence des eaux d'irrigation qui ont un faciès sulfaté. Sous l'irrigation ou l'apport d'eau fait dissoudre les minéraux évaporitiques (gypse-halite et anhydrite)

Les sols irrigués de la plaine d'El-Outaya ont tendance à précipiter les minéraux carbonatés et à dissoudre les minéraux évaporitiques, on peut aussi conclure que l'IS du gypse des sols irrigués est proche de l'équilibre qui permet de se précipiter d'avantage.

La simulation thermodynamique confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des sols analysés et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se trouvent dans la solution du sol à l'état d'équilibre (saturés) à sursaturation et précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

A travers cette étude, nous avons pu donner un aperçu sur les sols de la plaine d'El Outaya qui restent tributaire aux facteurs du milieu dans lequel se sont formés.

Dans tous les cas, une agriculture irriguée requiert un contrôle périodique du niveau et de la distribution des sels dans le sol, cela permettra de déterminer le seuil de risque, pour lequel un lessivage doit être pratiqué. En plus, que les agriculteurs peuvent adapter des cultures aux différents niveaux de salinité : agrumes, oliviers, grenadiers et autres cultures dites sensibles en

amont, dans les parcelles peu salées, et artichauts, orge et cucurbitacées en aval, dans les zones plus salées, selon le choix stratégique du pays surtout à l'heure actuel, d'où la nécessité d'une véritable stratégie nationale impliquant tous les secteurs(Formation-Recherche-Agriculture-Eau-Energie-Industrie-Commerce,...)et toutes les disciplines (Agronomie-Hydraulique Génétique-Biotechnologie-Economie,...). Enfin, on peut conclure que les résultats des analyses physico-chimiques des sols suggèrent que la qualité des eaux utilisées en irrigation a un impact non négligeable sur la qualité des sols surtout ceux irrigués par les eaux de forages.

Synthèse globale

Biskra était la capitale des Ziban et de l'Aurès. Elle se localise à 420 km d'environ de la capitale Alger. Elle s'étend sur une superficie totale de 21 509.8 km² soit 1 % de la superficie globale de notre nation Algérie. La surface agricole totale (SAT) est de **1 652 751 ha** traduit un pourcentage assez élevé (**77 %**) de ST, dont **185 473 ha** représentent la surface agricole utile SAU (**11 %**) de la (SAT). On enregistre **103990.80 ha (56.07% de la SAU)** des terres irriguées principalement par les eaux souterraines. (Statistique de 2013).

La région des Ziban se caractérise par une forte potentialité phoenicicole avec près de 5 millions de palmiers dattiers et plus de 9908 points d'eau (forage, puits et sources) inventoriés ainsi que deux barrages irrigant une surface de 103990.80 ha (DSA, 2013) sous forme d'Oasis avec une polyculture en étage (palmier dattier, arboriculture et cultures herbacées ou maraîchères) ou sous forme de périmètres irrigués et d'abri-serres plus spécialisés (palmiers dattiers, céréales ou cultures maraîchères).

Les Ziban sont situés au pied des montagnes et représentent un bassin fermé (équivalent de Hodna), constituant des niveaux de base pour des réseaux hydrographiques qui naissent au Nord. Ce bassin fermé est donc enrichi par des eaux provenant des zones pluvieuses offrant le contraste de leurs cultures irriguées.

Selon les **données climatiques** de la station météorologique de Biskra, la région des Ziban, à climat sec et chaud, les pluies sont faibles et de répartition mensuelle et/ou annuelle irrégulière. La moyenne annuelle est de 157.07mm (période 1967- 2012). Les fortes variations saisonnières de températures sont enregistrées entre le mois le plus chaud (Juillet avec une moyenne de 33.23°C) et le mois le plus froid (Janvier 10.93°C) où la moyenne annuelle est de 21.88 °C. Toutefois, L'évapotranspiration est très importante, elle est de 1038.89mm entraînant une reprise totale de toutes les précipitations par l'évaporation et engendrant une période sèche couvrant toute l'année ce qui conduit à un déficit couvrant toute l'année. Ce déséquilibre induit la nécessité d'une irrigation importante pour l'agriculture dans ces régions en mobilisant les eaux souterraines et de surface. Cependant, avec des sels en excès, des doses proportionnelles de lessivage, à moyen ou à long terme, un gaspillage d'eau est enregistré avec une augmentation des coûts et une baisse de productivité. Donc, nous retiendrons que la région d'étude Ziban est soumise à un climat aride avec des tendances franchement

sahariennes. Ce déséquilibre entre les précipitations et l'évaporation montre **la nécessité d'une irrigation importante pour l'agriculture utilisant les eaux souterraines.**

Du fait de l'aridité du climat, le **réseau hydrographique** est très développé dans la région. Comme étant l'exutoire de l'ensemble des eaux de surfaces dans le bassin de Melghir. Le chott reçoit les eaux des principaux oueds suivants : A l'Est, oued El Arab, principal oued de la zone, avec ses 5 affluents, et Oued El Haguef, au Nord, Oueds El Abiod et Biskra qui se jettent dans l'Oued Djedi au lieu dit Saadâ, à l'Ouest, Oued Djedi est le plus important du bassin, il prend naissance à la confluence de deux oueds; oued M'zi et oued Messaad, avec ses 6 affluents. Les écoulements, superficiels (oueds) ou hypodermiques, y sont le plus souvent temporaires. Ils atteignent des zones de concentration qui sont les lieux privilégiés de manifestations salines dans les eaux et dans les sols.

Le Bas-Sahara a désormais atteint sa structure actuelle en cuvette synclinale dissymétrique bordée à l'ouest, au sud et à l'Est par des bancs à pendages faibles tandis qu'au Nord une fosse profonde se creuse au pied de l'Aurès et redresse presque à la verticale des sédiments déposés dont la région de Biskra se caractérise par des terrains sédimentaires allant du Quaternaire au sommet jusqu'au Barrémien à la base. La disposition des **formations sédimentaires dans la cuvette du Bas-Sahara** favorise ainsi une circulation souterraine des eaux précipitées sur les affleurements aux auréoles concentriques du pourtour. L'alternance des terrains perméables et imperméables assure en outre leur mise en charge à mesure qu'elles s'écoulent vers les parties déprimées. Ces conditions géologiques particulièrement favorables sont à l'origine de la formation des nappes souterraines qui alimentent les oasis. Les études géologiques et hydrogéologiques ont permis de mettre en évidence l'existence de plusieurs réservoirs aquifères d'importance bien distincte de part leur constitution lithologique, leur structure géologique et les facilités d'exploitation qu'ils présentent. Ces aquifères appartiennent au Quaternaire, au Mio-Pliocène, à l'Eocène inférieur et le Sénonien supérieur (Maestrichtien) et à l'Albien. (Bouziane, 2009). Donc, l'hydrogéologie se distingue par la superposition de quatre nappes principales d'étendues importantes avec leurs eaux, souvent chargées et dont leurs continuités spatiales restent à prouver. (Chebbah, 2007). Donc, la connaissance de la nature lithologique des terrains étudiés ainsi que leur structuration permet d'expliquer certains paramètres chimiques des eaux et des sols qui s'y trouvent dans un bassin donné.

De ce fait, on a conclu que la rationalisation des écosystèmes existants aussi bien que la mise en valeur ne peuvent être conçus que par la maîtrise du continuum eau- sol-plante-climat. Or, les eaux d'irrigation indispensables pour le développement agricole dans ces régions entraînent une évolution des sols et un changement de leur qualité. Parmi les facteurs de cette évolution il y a lieu de citer le contexte topographique des zones irriguées, les techniques d'irrigation et surtout les caractéristiques des sols et des eaux. Dans un tel environnement (milieu très évaporant, endoréisme, sols peu fertiles), les eaux d'irrigation, quoique de caractéristiques variables selon leur origine (types d'aquifères et eaux de surface), sont de qualité médiocre et influencent fortement la qualité des sols avec des conséquences sur la productivité de l'agriculture et sa durabilité.

L'analyse des relations sol-eau et leurs conséquences sur les changements de la qualité des sols dans les Ziban (Biskra), région à grande potentialité agricole permettra de mettre en évidence les modifications ayant eu lieu selon différents scénarios : topographie, qualité des eaux d'irrigation, types de sols, techniques d'irrigation, systèmes de cultures, durée de la mise en culture). L'objectif de ce travail est une contribution à la caractérisation des sols et des eaux au niveau de la région de Ziban en conditions salines et/ou sodiques.

Le choix des localités d'études est basé sur la différenciation de notre immense région-Ziban-, à la fin, trois localités/régions sont prises en considération ; une à l'est des Ziban représentée par Sidi Okba, l'autre à l'ouest représentée par Bordj ben Azouz. En ajoutant la plaine d'El-Outaya.

Le travail commence durant l'année 2014, notre méthode d'échantillonnage est basée sur le prélèvement du sol sur un profil pédologique type de chaque station avant et après l'irrigation afin de consulter le changement du sol sous irrigation, la collecte des eaux d'irrigation est effectuée à partir des ressources (barrage, forage et puits) destinées à alimenter ces stations par cette matière vitale. Donc, deux cas représentatifs et comparatifs : présence et absence du drainage ainsi que avant et après irrigation sont mentionnées dans notre étude.

La mesure de la salinité totale d'un sol est indispensable afin de reconnaître le type de sol auquel on a à faire. Toutefois, comme les propriétés des sols diffèrent fortement suivant la composition chimique et la concentration des sels présents, l'identification des sels solubles, sur extrait de pâte saturée ou diluée, permet de fournir des renseignements sur les principaux sels présents dans ces sols et d'envisager l'étude de l'évolution de leur salinité surtout lorsqu'ils sont soumis à une irrigation avec une eau salée. Le bilan ionique est déterminé pour

établir le faciès de salinisation de l'eau en se basant sur le diagramme de Piper. Les éléments majeurs ont été analysés au laboratoire central du CRSTRA selon les méthodes classiques.

La région des Ziban est un laboratoire ouvert dans la nature avec un capital d'expérience certain, or la sécurité alimentaire passe obligatoirement par la connaissance de nos ressources en eau, en sol et en ressource biologique.

De ces résultats, il est projeté d'élaborer des propositions permettant d'orienter l'évolution de la qualité des sols, d'améliorer et de pérenniser la productivité agricole. Cela à travers le choix des sites de mise en valeur, le choix des sols, le pilotage des irrigations, les techniques de réhabilitation, les techniques de suivi des périmètres cultivés, le choix des systèmes de culture.

Selon Dutil 1971, des sols salins sont-ils très nombreux et spectaculaire, tout particulièrement dans les régions sédimentaires, grandes fournisseurs des anions et cations caractérisant la salure. L'eau d'irrigation par sa composition peut avoir une influence sur le sol, car dans les régions arides la qualité des sols est étroitement liée à la qualité de l'eau d'irrigation (Halilat, 1998 in Omouri, 2009).

I- La région de Sidi Okba

La région du Zab Est de Biskra présente des ressources en eau souterraines très importantes, représentées par les nappes des deux systèmes aquifères du Sahara septentrional, le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire. Les forages qui ont été recensés au niveau de la plaine alluviale du Zab Est, n'exploitent que les eaux de la nappe de Miopliocène. La profondeur des forages dépasse 70 m à 900 m. (Boutouga, 2012). L'exploitation des eaux souterraines est la principale ressource pour l'alimentation en eau potable qu'agricole pour les habitants de la région de Biskra.

Sidi Okba est une région agricole pionnière du Zab Chergui au SE de Biskra, se caractérise par un haut potentiel agricole. Elle possède une superficie agricole utilisée (SAU) de 10025 ha dont 7513 ha irriguées avec plus de 700 forages recensés (ANRH, 2008; DSA de Biskra, 2013). En effet, une double source d'eau (barrage et forages) se manifeste, mais le recours aux eaux souterraines fait la provenance dominante de l'irrigation.

Afin de caractériser les eaux d'irrigation, une enquête sur le terrain de la région de Sidi Okba suivi par une évaluation de la qualité physico-chimique des eaux d'une trentaine d'échantillons provenant de forages réalisés dans la nappe du Miopliocène, destinés à irriguer

des terres agricoles dans les localités de Tajdid, Safel Tajdid, Mangae Bougtaf, Feïdh el-ghareg et Garta ont été sélectionnés durant la campagne agricole 2014, suivi par une caractérisation du changement de la qualité des sols sous irrigation.

De ce travail reposé sur des résultats modestes, l'irrigation est assurée principalement par le pompage des eaux des forages de la nappe du Miopliocène. La qualité de l'eau d'irrigation est appréciée par la salinité, représentée par la conductivité électrique CE, est forte à très forte (C4 et C5) et la sodicité, illustrée par le SAR (Sodium Adsorption Ratio), appartient à la classe 1 où ce risque est nul (S1 : entre 0 et 4) pour 1/6 des échantillons (soit 16.66 %) et à la classe faible S2(entre 4 et 8) à moyenne S3(entre 8 et 12) pour la plupart des échantillons prélevés; ceci indique un apport très important de Na^+ à la solution du sol traduisant un risque de sodicité pour ces eaux d'irrigation. Tous les points d'eau ont une classification comprise entre C4S1 et C5S3 traduisant une mauvaise qualité chimique de ces eaux. Par conséquent, les eaux principalement de la classe C5 ne peuvent être utilisées en irrigation que dans le cas des sols très drainants (sables et graviers) riches en calcium soluble (Dubost, 1994). Pour remédier à ce problème, en absence d'une autre ressource en eau, le remplacement du sodium par le calcium sous forme d'un amendement gypseux est conseillé avec drainage (Qadir et al, 2006). Une autre solution, complémentaire de l'amendement chimique, consiste en l'utilisation des plantes afin de diminuer la quantité du sodium par phytoremédiation ; du fait de l'augmentation de la dissolution du carbonate de calcium du sol, ceci peut fournir du calcium, qui peut être échangé avec le sodium (Qadir et al, 2007 in Rimmer et al, 2013).

Tenant compte de la spécificité de la région de Sidi-Okba comme étant une oasis ; le palmier dattier est la culture pilote pratiquée avec un rendement moyen de 80 kg/pieds âgés de plus de 40 ans et de 120 à 140 kg/pieds âgés de moins de 40 ans selon notre estimation. La tolérance des plantes cultivées vis-à-vis de la salinité varie largement en fonction de l'espèce, de la variété, du stade végétatif et des facteurs liés au milieu (Daoud et Halitim, 1994). Néanmoins l'historique de la région et le choix stratégique du pays doivent nous orienter vers des cultures du type céréalières, maraichères et fourragères. En fonction de la salinité des eaux d'irrigation utilisées, les fellahs peuvent pratiquer quelques cultures tolérantes aux sels comme : orge, avoine, oignons, betteraves, navets, artichauts, carthames, coriandre, laitue, tomate, abricotier, olivier et figuier (ANAT, 2003), afin de diversifier et d'améliorer leurs revenus. Aussi, le drainage des terres irriguées est-il très important pour contrôler et réduire la salinisation des sols car l'irrigation avec des eaux salées nécessite l'apport d'une fraction d'eau supplémentaire pour lessiver les sels (Vallès et al, 1983) afin de maintenir la composition

saline de la solution de sol proche de celle de l'eau d'irrigation (Dubost, 2002). L'irrigation gravitaire utilise beaucoup d'eau, ce qui influence les propriétés du sol ainsi que le végétal avec un risque d'accumulation importante de sels dans la zone racinaire, alors qu'en irrigation localisée, le taux d'humidité dans la zone racinaire reste élevé, ce qui limite les risques d'accroissement de la concentration en sels et de la pression osmotique. (Soutter et al, 2007). Donc, la réduction du risque de salinisation et d'alcalinisation secondaire dans la région d'étude peut se faire en conjuguant des périodes d'irrigation localisée (goutte à goutte), avec des périodes d'irrigation gravitaire permettant le lessivage des sels ou encore le changement des sources d'irrigation ou en mélangeant l'eau utilisée avec une eau à faible teneur en sodium (Lenntech, 2008).

Dans la région de Sidi-Okba, la nappe du Miopliocène est très sollicitée. La composition chimique de ses eaux destinées à l'irrigation des sols agricoles traduit une salinité très forte à excessive avec un SAR de faible à fort risque de sodicité (de S1 à S3). Deux grandes familles d'eaux se manifestent, l'une à faciès chloruré sodique et magnésien en aval et l'autre à faciès sulfaté sodique et calcique en amont de la zone d'étude. La sous-saturation en gypse, anhydrite et halite traduit la possibilité de dissolution de ces minéraux dans l'eau d'irrigation, tandis que les minéraux carbonatés se trouvent parfois proches de l'équilibre, souvent en sursaturation et tendent vers la précipitation sous forme de calcite et dolomite. Il en résulte que l'irrigation avec ces eaux reste utilisable mais avec des précautions à prendre telles que : la maîtrise des techniques liés à l'irrigation surtout le lessivage et le drainage, des techniques liées à la culture : le choix de cultures tolérantes aux sels, phytoremédiation, l'assolement, la rotation, l'amélioration des sols par l'apport de la matière organique.

La qualité des sols a d'abord été définie comme étant son aptitude à fournir à l'ensemble de la biomasse, et en particulier aux plantes, un milieu propice à leur développement. (Tessier et al, 1996).

L'appréciation de la qualité du sol avant la mise en irrigation montre la présence d'une salinité élevée (CE de l'extrait diluée (1/5) supérieure à 3 dS/m) pour l'ensemble des échantillons. Cette forte salinité est attribuée aux effets des conditions climatiques très arides produisant une forte évapotranspiration qui concentre la solution du sol (Cheverry et Robert, 1998), et surtout à l'absence d'un réseau de drainage. Le profil salin trouvé est de tous les types des profils salins mentionnés par Servant 1978 soit avant ou après l'irrigation dont le plus répandu est celui de type A indique une salinisation. Ces profils sont alternés entre salinisation(A) et résalinisation(C) passées par une désalinisation temporaire (B) ou

permanente (D) donc, une distribution saline présentant un maximum dans les horizons superficiels(A) et moyennement profond (B) traduisant un processus ascendant et/ ou descendant de salinisation sous l'effet de l'évaporation conjugués avec l'irrigation ou pluies. Les sols de la région de Sidi Okba sont riches en calcaire total et bien pourvus en calcaire actif qui peut dépasser les 15 %, ajouté à la présence de gypse surtout pour les profils situés en aval de la zone d'étude mais il est faible donc, favorable (inférieur à 10 %). Le pH est généralement basique 7.92 à très basique 8.95. Dans l'ensemble on constate une augmentation du taux de calcaire avec une diminution du taux de gypse dans le sol. Le faciès chimique dominant des sols non irrigués est alterné entre chloruré-sulfaté et sulfato-chloruré selon la profondeur du sol et le positionnement des profils d'amont vers l'aval. L'ESP et le SAR peuvent dépasser largement la limite conseillée (ESP >15 %). **Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès chloruré sulfaté à sulfato-chloruré en profondeur.**

Le suivi du changement du sol après la mise en irrigation des cultures cultivées selon chaque exploitation, montre un changement bien considérable dans tous les paramètres ; la présence d'une salinité élevée (CE de l'extrait diluée (1/5) supérieure à 3 dS/m) pour l'ensemble des échantillons. Cette forte salinité est attribuée aux effets conjugués de la qualité de l'eau d'irrigation préalablement salée, aux conditions climatiques très arides produisant une forte évapotranspiration qui concentre la solution du sol (Cheverry et Robert, 1998), et surtout à l'absence d'un réseau de drainage. Le profil salin trouvé est de tous les types des profils salin mentionnés par Servant 1978 après l'irrigation dont le plus répandu est celui de type A indique une salinisation comme résultat final des sols mis en irrigation. Le sol reste bien sûr pourvu du calcaire total dans tous les sols étudiés avec présence du calcaire actif. Le pH reste, généralement, basique 7.80 à très basique 8.60. Quelques échantillons analysés sont pourvus du gypse surtout en aval de la région d'étude. Dans l'ensemble on constate toujours une augmentation du taux de calcaire avec une diminution du taux de gypse dans le sol. Le faciès chimique dominant des sols irrigués est alterné entre chloruré-sulfaté et sulfato-chloruré selon la profondeur du sol et le positionnement des profils d'amont vers l'aval, sachant que un faciès de salinité du sol chloruro-sulfaté, largement représenté dans les régions arides, est constitué de sels à réaction proche de la neutralité, très solubles, donc très mobiles et susceptibles de se concentrer fortement sous ces climats ; ils sont constitués de chlorures dominants, sodiques, calciques ou magnésiens, associés à des sulfates. (Bouteyre et Loyer, 1992). Le SAR et l'ESP dépassent, toujours, largement la limite conseillée (ESP >15

%) à partir du cinquième profil (P5 et P6), dû à l'apport de Na^+ par les eaux d'irrigation, la qualité chimique du sol est changée où on note SAR et ESP très élevés. Sachant que, en Algérie, les travaux de recherches menées au Nord par Djili et al. (2000) et Touaf (2001) ont confirmé que la salinisation dans les régions arides induit la sodisation où la vitesse de sodicité dépend de la composition de l'eau utilisée, de la quantité d'eau apportée par an et de la CEC du sol.

Les facteurs climatiques sont très favorables à l'ascension des sels, à la concentration de la solution du sol et à la précipitation des sels dans la zone racinaire et l'horizon superficiel entraînant la salinisation. Cette salinisation peut être naturelle ou anthropogénique. (Hachicha, 2007).

Le calcul des indices de saturation montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturée pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre et parfois se précipitent surtout en aval de la région d'étude pour le gypse. Même cas est observé en Tunisie lors de la précipitation de certains sels dans un ordre déterminé (calcite, gypse, etc.) avec celle de NaCl en dernier lieu. (Hachicha, 2007).

En fonction de sa composition granulométrique et de structure, le sol peut influencer le mouvement des sels. Dans le cas de la texture sableuse, les sels sont facilement lessivés en profondeur et remontent en surface par capillarité, contrairement aux sols à texture argileuse. Depuis toujours, la texture du sol joue un rôle important dans la migration des sels due à la remontée capillaire (Omouri, 2009). Pour Cherbuy (1991), les sols limoneux sableux, à texture la plus répandue quelle montre notre région d'étude, sont les plus vulnérables car les vitesses de remontée sont plus importantes.

Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès chloruré sulfaté à sulfato-chloruré en profondeur.

On conclut que dans la région d'étude existe 2 type du sol **Sols salés à structure non dégradée :**

- En amont, Garta-faidh elghareg-Tajdid-Mangae bougtaf : Sols salins ou « solontchaks » : dont la salinité globale déterminée sur pâte saturée est supérieure à 4 mmhos/cm à 25°C (classification américaine) ou à 7 mmhos

(CPCS, 1967) et l'ESP inférieur à 15% (classification américaine) et à 10 % (CPCS, 1967). **On note que un fellah nous dise qu'il ya un proverbe reflète la qualité appréciable du sol de la région : un bon sol est dans nfidha, faidh ekghareg et kaf kfouf.**

- En aval, limite Safel Tajdid-Haouche dans les profils 5 et 6 : a partir du P5, la qualité chimique du sol est changée où on note SAR et ESP très élevés ; Sols salins à alcali ou sols salins- sodiques ou solontchaks- solonetz : dont la salinité globale est supérieure à 4 ou 7 mmhos/cm et l'ESP est supérieure à 10 ou 15%.

Quelque soit la spéculacion cultivée, la salinité dépend principalement de la qualité des eaux d'irrigation et de type du sol ; l'aménagement hydro-agricole réalisé par le fellah de l'oasis de la région de Sidi-okba est efficace basé sur un mode d'irrigation par submersion (remplissage de la tranchée) vont lessiver les sels en surfaces surtout si la couche en profondeur est sableuse, c'est – à- dire présence du drainage naturel. Mais il faut quantifier cette fraction de lessivage et valoriser le mètre cube d'eau.

Il existe un risque de salinisation des sols avec les eaux d'irrigation utilisées. A partir du P5 la qualité chimique du sol est changée sous effet simultané du SAR et ESP très élevés.

Cette étude à permis de caractériser deux sous zones : zone en amont à faciès sulfaté et zones en aval à faciès chloruré caractérisée par une accumulation des sels.

Quelque soit la région d'étude analysée, la salinité est la contrainte majeur trouvée due principalement à l'irrigation par des eaux salées.

II- La région de Bordj Ben Azouz

La région de Bordj Ben Azouz, qui nous intéresse dans notre recherche, a une superficie totale de 23.20 Km² (2320 ha) de la wilaya de Biskra soit 0.11 % avec une superficie agricole utile SAU de 1666 ha (71.81 % de la ST de Bordj ben Azouz et 0.9% de SAU totale de Biskra). Zone à vocation phoeniciculture, (statistique de 2013 montre qu'il existe 4800.000 palmiers dattiers à Biskra/17000000 en Algérie).

A peine masquées par un peu de sables ou couronnées par le « debdeb », ces alluvions s'étalent dans la partie occidentale des Ziban (Zab Gherbi), et constituent la vaste plaine d'El-

Amri, entre Tolga et Doucen. Elles sont parfois argilo-calcaires ; ces sols sont particulièrement fertiles assurent une bonne production des cultures de maraichage et des dattes. Les sols gypseux ou « debdeb » sont les témoins de l'extension des sols salés après dissolution et entraînent des sels solubles vers le bas-fond ; la présence du gypse dans le Bas-Sahara serait la preuve de l'existence ancienne d'une grande zone salée, qui s'étendait vers le Sud jusqu'à Touggourt. (Durand, 1988). Les sols gypseux peuvent être cultivés après que la croûte dure soit brisée, permettant de produire de bonnes récoltes. Le système gravitaire par séguia est le plus mode d'irrigation pratiqué par rapport aux autres (goutte-goutte ou aspersion).

La région, jadis à vocation principalement dattière, a vu ces dernières années un développement rapide de l'agriculture maraîchère exigeant de ce fait de grandes quantités d'eau. Ceci s'est traduit par la multiplication des points de captage, avec comme résultat : une diminution de la ressource et la dégradation de la qualité des eaux. Il est impératif, de ce fait, de bien gérer cette ressource.

Dans la région de Bordj ben Azouz, l'irrigation est assurée par le pompage des eaux des forages de la nappe du calcaire ainsi que l'exploitation des eaux de la nappe phréatique du quaternaire à travers des puits de profondeur varie de 4 à 8 mètre. La qualité de l'eau d'irrigation, appréciée par la salinité, est forte à très forte (C4 et C5) et la sodicité, illustrée par le SAR (Sodium Adsorption Ratio), appartient à la classe S1 pour les eaux des forages, de S1 à S4 pour les eaux des puits et drainage, ceci indique un apport très important de Na^+ à la solution du sol traduisant un risque de sodicité pour ces eaux d'irrigation. Tous les points d'eau ont une mauvaise qualité chimique. Par conséquent, les eaux principalement de la classe C5 peuvent être utilisées en irrigation dans notre région d'étude car on est dans le cas des sols très drainants riches en calcium soluble (Dubost, 1994), ajouté à un réseau du drainage à ciel ouvert très efficace.

Tenant compte de la spécificité de la région de Bordj ben Azouz comme étant une oasis ; le palmier dattier est la culture pilote pratiquée avec un rendement moyen de bonne qualité dépasse 100 kg/pieds. La tolérance des plantes cultivées vis-à-vis de la salinité varie largement en fonction de l'espèce, de la variété, du stade végétatif et des facteurs liés au milieu (Daoud et Halitim, 1994). Néanmoins l'historique de la région et le choix stratégique actuel du pays doivent nous orienter vers des pratiques agricoles très rentables surtout pour le drainage des terres irriguées est-il très important pour contrôler et réduire la salinisation des

sols car l'irrigation avec des eaux salées nécessite l'apport d'une fraction d'eau supplémentaire pour lessiver les sels (Vallès et al, 1983) afin de maintenir la composition saline de la solution de sol proche de celle de l'eau d'irrigation (Dubost, 2002). L'irrigation gravitaire, utilise beaucoup d'eau, est très sollicitée dans cette région, ce qui influence les propriétés du sol ainsi que le végétal avec un risque d'accumulation importante de sels dans la zone racinaire, alors qu'en irrigation localisée, le taux d'humidité dans la zone racinaire reste élevé, ce qui limite les risques d'accroissement de la concentration en sels et de la pression osmotique. (Soutter et al, 2007). Donc, la réduction du risque de salinisation et d'alcalinisation secondaire dans la région d'étude peut se faire en conjuguant des périodes d'irrigation localisée (goutte à goutte), avec des périodes d'irrigation gravitaire permettant le lessivage des sels dans les drains qui doivent être toujours entretenus et encore le changement des sources d'irrigation ou en mélangeant l'eau utilisée de puits le plus répandu avec celle de forage à faible teneur en sodium (presque le moitié à S1 traduisant un risque nul de sodicité). L'étude révèle une eau d'irrigation de qualité acceptable, mais qui doivent être suivies continuellement. Par contre les rejets des eaux des drainages agricoles sont très chargés en sels d'origine diverses s'explique, notamment, par une efficacité du lessivage suite à l'irrigation.

La mise en place d'un système de drainage dans les aménagements hydro-agricole dès le début est nécessaire comme partout dans l'agriculture irriguée, en particulier, comme ceux observés dans la zone de delta du fleuve de Sénégal et les oasis de Tunisie.

Dans les périmètres irrigués que dans les oasis, la salinisation secondaire a une double origine : l'eau d'irrigation et les remontées des plans d'eau souterrains. Hachicha indique que l'effet salinisant des eaux d'irrigation est négligeable par rapport à celui de la nappe; les sols à drainage déficient sont, en effet, ceux qui sont les plus chargés en sels. (Ben Hassine, 2005). Sous irrigation, la précipitation concomitante de gypse pourrait aussi avoir des conséquences importantes sur les propriétés physiques par une cimentation des particules du sol sous forme d'accumulation calcaro-gypseux, tout particulièrement dans les zones où la nappe est la plus superficielle et la plus concentrée. (Marlet et al, 2007). Sachant que le palmier dattier avec d'autres plantes du désert absorbe l'eau du sol par les racines, mais celles-ci ont une particularité : elles sont capables d'absorber l'eau mais de « refuser » le sulfate de calcium ou le chlorure de sodium dissouts : la racine joue le rôle d'un filtre en absorbant sélectivement les molécules de la nappe.

Les oasis sont généralement disposées en bordure de « chotts », dépressions topographiques salées qui constituent l'exutoire naturel des eaux de drainage (Job, 1992). De plus, la zone de transition entre la partie cultivée et le chott est de plus en plus exploitée pour augmenter la surface des exploitations et bénéficier du droit à l'eau d'irrigation (cas oasis de BBA). Dans de nombreux cas, les faibles dénivelées entre les oasis et les chotts limitent la bonne évacuation des eaux et des sels. En conséquence, une majorité de ces oasis est sujette à des manifestations d'engorgement et de salinité, souvent accentuées par une gestion de l'irrigation peu efficace et des systèmes de drainage peu performants. Le drainage est souvent associé à des apports réguliers en sable dunaire et en fumier pour contrôler l'engorgement et la salinité des horizons superficiels (Omrani, 2002). Cette dernière observation est plus remarquable dans la zone située entre Bir Attia et Ezarga où les agriculteurs font appel à l'apport du sable à une dose d'un camion (12 tonnes) pour 4 pieds des palmiers dattiers pour faire face à l'engorgement et la remontée de la nappe. Sachant que, dans les périmètres irrigués que dans les oasis, la salinisation secondaire a une double origine : l'eau d'irrigation et les remontées des plans d'eau souterrains. qui indiquent que l'effet salinisant des eaux d'irrigation est négligeable par rapport à celui de la nappe; les sols à drainage déficient sont, en effet, ceux qui sont les plus chargés en sels. (Ben Hassine, 2005).

Un sol est gypseux lorsqu'il présente une teneur en gypse supérieure à 5 % (FAO, 1990), ces sols occupent 1.8 % de la surface de la terre mais 12.2 % de la surface de l'Algérie. (Razi et Halitim, 2008). Or, le bas-Sahara est caractérisé par une forte empreinte gypseuse. (Dutil, 1971). Il apparaît ainsi qu'au cours des dernières périodes humides quaternaires, le gypse a été un élément très mobile dans le paysages du Bas-Sahara, à tel point qu'il est venu tapisser tous les Bas-fonds de cette région. (Dutil, 1971 et Aidaoui, 1994). On les trouve dans les oasis sous formes de fins cristaux dans la plupart des sols et principalement dans les encroûtements gypseux asséchés ou fonctionnelle. L'amendement gypseux dans ce sol est déconseillé car il n'est pas en besoin de cet élément.

En raison de la sous-saturation à légèrement sursaturation par rapport au gypse et malgré des teneurs élevées en sulfate et calcium dans les eaux d'irrigation, d'importantes quantités de gypse sont susceptibles d'être dissoutes puis précipitées au rythme des périodes d'irrigation et d'évaporation. Dans les conditions naturelles (profil de référence P1), cette dynamique est à l'origine des encroûtements couramment observé dans les sols et au sommet de la nappe (surtout les puits), comme celle mentionnée dans des nombreux études du fonctionnement de la salinité pour les sols tunisiens surtout des oasis. Sous irrigation, la précipitation

concomitante de gypse et de calcite (minéraux carbonatés) pourrait aussi avoir des conséquences importantes sur les propriétés physiques par une cimentation des particules du sol sous forme d'accumulations calcaro-gypseuses, tout particulièrement dans les zones où la nappe est la plus superficielle et la plus concentrée. Un tel phénomène pourrait expliquer le renouvellement périodique du sol par le recours à des amendements sableux et au travail du sol par les agriculteurs surtout pour le site Bir attia (apport du sol d'ElAmiri-ex Elghrous). Ces pratiques peuvent, ainsi, réduire les contraintes d'engorgement par une surélévation du niveau du sol ou à entretenir la fertilité par des apports de matière organique. Ces phénomènes de dissolution-précipitation du gypse sont très fréquents dans les sols étudiés surtout irrigués de Bordj ben Azouz.

Les sels potentiellement précipitables en aval, dans la dépression chotteuse Ezarga, préexistent à l'état d'ions appariés en tout point dans la nappe phréatique (véhicules des sels) de l'oasis de Bordj ben Azouz.

Les sols des oasis et de leur environnement sont soumis à un certain équilibre de salure qui est en fonction de la quantité, de la nature et de la fréquence des apports d'eau d'irrigation d'une part, et des conditions de drainage d'autre part ; dans la plupart des cas, ils sont caractérisés par un encroustement gypseux ou gypso calcaire. (Dutil, 1971). Le sol est gypseux pour tous les horizons avec forte présence du calcaire total ce qui conduit à un sol gypso-calcaire, car sous irrigation, la précipitation concomitante de gypse pourrait aussi avoir des conséquences importantes sur les propriétés physiques par une cimentation des particules du sol sous forme d'accumulation calcaro-gypseux, tout particulièrement dans les zones où la nappe est la plus superficielle et la plus concentrée. (Marlet et al, 2007). Si on suit la séquence topographique, la formation du gypse est claire et nette dans le sol de la région de BBA. Surtout quand l'eau d'irrigation soit sulfatée.

Pour cela, il est nécessaire de disposer d'un instrument permettant de prévoir l'évolution future de ces nappes en fonction des prélèvements actuels et futures. A ce titre plusieurs approches par modélisation numériques ont été effectuées pour évaluer les volumes exploitables en fonction de la demande. Les réactions et comportements de ces aquifères sont schématisées par des simulations prévisionnelles. Ces modèles ayant pour finalité l'optimisation de l'exploitation de ces réserves, permettront de placer une limite d'exploitation et de choisir les meilleurs sites potentiels d'exploitation. (Chabour, 2006).

Les sols des oasis y sont quelquefois très salés et cependant ils sont cultivés depuis des siècles. Où une bonne structure du sol est un élément essentiel de la préservation saine d'un agro-écosystème. La solution clef est l'irrigation qui remplace différents stress touchée la structure du sol. (Murray et Grant, 2007). Par ailleurs, l'irrigation traditionnelle seule permet de maintenir le système oasien en équilibre avec son environnement. (Job, 1992), cette observation est bien marquée dans les oasis de Bordj ben Azouz.

L'examen des résultats d'analyse des paramètres physicochimiques du sol non irrigué montre la présence d'une salinité élevée (CE de l'extrait diluée (1/5) supérieure à 3 dS/m) pour l'ensemble des échantillons surtout en moyenne profondeur du sol, exprime des profils salins de type A et B reflétant un état alterné entre salinisation (A) à désalinisation temporaire (B), donc, une distribution saline présentant un maximum dans les horizons superficiels(A) et moyennement profond (B) traduisant un processus ascendant et/ ou descendant de salinisation. Cette forte salinité est attribuée aux effets conjugués de la qualité de l'eau d'irrigation préalablement salée, aux conditions climatiques très arides produisant une forte évapotranspiration qui concentre la solution du sol (Cheverry et Robert, 1998), et surtout qu'ils sont loins d'un réseau de drainage à ciel ouvert (traditionnel inventorié par les fellahs de la région). Ce sol est généralement modérément calcaire et gypseux. Le sol est profond (plus de 210 cm) et de texture fine surtout sableuse. Il est de réaction pH neutre à basique.

Le faciès géochimique dominant du sol non irrigué est alterné entre sulfaté calcique ou sodique à chloruré sodique. Selon la profondeur du sol et le positionnement des profils près ou loin du réseau de drainage.

L'ESP et le SAR, suivent même allure générale, le SAR est très élevé traduit une alcalinisation forte à intense. L'ESP est très important et dépasse la limite conseillée de 15 %. Ce jumelage SAR-ESP fort, met en jeu la qualité de ce sol, selon le degré d'alcalinisation d'après Servant et Servat (1966), il est apprécié à forte risque de sodisation.

Le génie de fellah de la région de BBA, le conduit à briser la croûte gypseuse afin d'installer la culture du palmier dattier car la présence de cette croute empêche le drainage en profondeur et constitue un obstacle mécanique à la pénétration des racines (Hatira et al. 2005 in Askri et Bouhlila, 2010).

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol non irrigué de la zone de la plaine de Bordj Ben Azouz montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon

les cas surtout les minéraux carbonatés : Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3) L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés dépasse largement l'état de saturation (positive) et se cristallise (précipitation). Par contre, les minéraux évaporitiques sont saturés comme le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) et l'anhydrite proche de l'équilibre même le dépasse largement pour la plupart des échantillons du sol traduisant une précipitation dans le sol même elle dépasse l'état de saturation dans l'horizon médian (20-40 cm où IS est positive) ($-0.09 < \text{IS}_{\text{gypse}} < 0.02$), où se trouve la croute gypso-calcaire donc, la dissolution du gypse en surface et en profondeur, en revanche sa précipitation se fait en moyenne profondeur. Cette observation est confirmée par Aubert(1976) où dans certains sols il peut y avoir un véritable stockage du gypse à moyenne profondeur. Par ailleurs, l'indice de saturation d'halite(NaCl) est négative, se présente largement sous saturé ($-5.09 < \text{IS} < -4.39$), ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols.

Il s'agit donc d'un Sols salins à alcali ou sols salins- sodiques ou Solontchaks- solonetz à structure non dégradée avec un faciès sulfaté en surface et chloruré sulfaté à sulfato-chloruré en profondeur.

Le suivi du changement du sol sous irrigation montre que le sol est légèrement salin pour l'ensemble des échantillons surtout en moyenne profondeur du sol, selon l'échelle de l'interprétation des valeurs de la conductivité électrique de la solution extraite du sol saturé 1/5 à 25°C (Aubert, 1986), exprime des profils salins moyens de type B et D reflétant un état alterné entre désalinisation temporaire (B) à désalinisation permanente (D), donc, une distribution saline présentant un maximum dans les horizons moyennement profond (B) traduisant un processus descendant de salinisation, selon servant 1978 grâce à la présence d'un réseau de drainage efficace ajouté à une texture légère surtout sableuse (un filtre naturel). Ce sol est généralement modérément calcaire presque même pourcentage que le sol non irrigué mais pourvu du gypse (jusqu' à 24.17 %) dû principalement à leur précipitation plus que sa dissolution. Il est de réaction pH basique (Baize, 1988).

Le faciès chimique dominant du sol irrigué est alterné entre sulfaté calcique ou sodique à chloruré- sulfaté selon la profondeur du sol et le positionnement des profils près ou loin du réseau de drainage.

L'ESP et le SAR, suivent même allure générale, ils sont très réduits grâce au lessivage des sels en présence d'un réseau du drainage conjugué avec une texture légère.

Les sols irrigués et bien entretenus (drains) présentent une salinité relativement faible. Par conséquent, une des raisons de la minéralisation des eaux de la nappe est liée au phénomène dissolution/précipitation du gypse (Hatiha et al., 2007 ; Marlet et al., 2007 in Askri et Bouhlila, 2010).

Il s'agit donc d'un Sols salins ou Solontchaks à structure non dégradée avec un faciès sulfaté en surface et chloruré sulfaté à sulfato-chloruré en profondeur.

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol irrigué dans l'oasis de Bordj Ben Azouz montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas surtout Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positive (précipitation). Par contre, les minéraux évaporitiques sont sous saturés mais comme le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) est proche de l'équilibre traduisant un début de précipitation du gypse dans le sol et elle est confirmée par le taux élevé du gypse présent dans le sol irrigué par des eaux de puits sulfatées, ainsi que pour l'anhydrite qui a un IS négative pour tous les échantillons conduit à leur tour à se dissoudre. Par ailleurs, l'indice de saturation d'halite (NaCl) est négative, se présente largement sous saturé, ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols. On estime que les minéraux évaporitiques sont ceux qui contrôlent la salinité.

Une bonne compréhension des régimes hydriques et salins de sol et de la nappe phréatique et de leurs évolutions spatiales et temporelles permet de pouvoir élaborer des règles nécessaires à une meilleure gestion des eaux et des sols (Hachicha et al, 2007 in Askri B et Bouhlila R., 2010).tenant compte des paramètres abiotique de l'oasis.

L'amélioration des sols salés reste réalisable mais avec présence d'un aménagement minimum qui garanti une profondeur satisfaisante de la nappe phréatique en intensifiant le réseau du drainage à l'intérieur des palmeraies et à l'extérieur au périphérie en les reliant avec ses axes naturelles comme les oueds vers l'exutoire naturel oued Djedi, passant par une valorisation des eaux de drainage pour la lutte contre la désertification et l'ensablement des oasis et l'amélioration du couvert végétal par la plantation d'arbustes fourragers autour de l'oasis, comme celles des pratiques appliquées aux niveaux des oasis de notre voisin la Tunisie, sans oublier des opérations d'entretien du réseau du drainage existant et une meilleure gestion des

eaux d'irrigation quelque soit leurs provenance (puits, forage) en tenant compte des facteurs climatiques, pédologiques, hydrogéologiques et topographiques du sol étudié.

III- la plaine d'El-Outaya

La plaine d'El Outaya se trouve au nord des territoires de la wilaya de Biskra (Zone des Ziban). Elle constitue par position géographique très spécifique et par sa grande immensité, une grande potentialité hydro-agricole dans la région. Ces ressources naturelles offrent de grandes perspectives pour le développement agricole dans la wilaya de Biskra. Elle est située à la limite des étages bioclimatiques aride et hyper aride nécessitant une irrigation pour toute culture. C'est une plaine qui a fonctionné comme un bassin de sédimentation pendant tout le Néogène. Et si, aujourd'hui, il ne remplit pas ce rôle dans sa partie NE, au contraire à la partie SW de nombreux oueds apportent leur alluvions et elle forme ainsi un sous-bassin fermé au niveau de Bled Selga. Elle est remplie de formations mio-plio-quaternaires silico-clastiques souvent à sulfates et carbonates surmontant un substratum principalement éocène-crétacé.

La structuration actuelle de la plaine résulte de la superposition de deux phases tectoniques majeures reconnues dans toute la région : la phase atlasique et la phase du Quaternaire basal. Et selon, Chebbah et al. (2008), au Néogène, elle est comblée, par des dépôts silicoclastiques confinés, d'épaisseurs variables et contrôlés par les rejeux d'anciens accidents hérités de l'orogénèse atlasique. Son évolution, liée au découpage préexistant de la couverture post-triasique par des accidents NW/ SE, accompagnait un processus d'effondrement du domaine atlasique lors d'une tectonique en extension post-tecto-orogénique qui s'intègre dans un modèle de plate forme restreinte associé à un bassin d'avant pays ; ceci permet d'expliquer la répartition des faciès des eaux ainsi que des sols dans la plaine.

Dans la région de la plaine d'El-Outaya, l'irrigation agricole est privilégiée par un barrage « fontaine des gazelles » alimenté par les eaux de surface ainsi que les eaux souterraines de la nappe de Miopliocene.

La qualité de l'eau d'irrigation est appréciée en utilisant le diagramme de classification des eaux de l'U.S.S.L (1954) modifié (Durand, 1983). Le report des échantillons sur ce diagramme de Riverside montre que pour l'eau du barrage, quelque soit la période de

prélèvement, a une seule classe C4, eaux très fortement salées, mais on remarque une évolution très marquante de la sodicité de S1 en 2008 à S3 en 2015 traduisant un risque très alcalinisant due principalement à l'augmentation de concentration en ions alcalinisant Na^+ .

Par contre, pour l'eau souterraine de la nappe exploitée de Miopliocène a une classe de C4S2 pour la plupart des forages analysés avec quelques points de C5S2. Donc, toutes les eaux des forages exploitants la nappe Miopliocène sont salées et de mauvaise qualité, ceci indique un apport très important de Na^+ à la solution du sol traduisant un risque de sodicité pour ces eaux d'irrigation.

Le faciès géochimique des eaux de barrage a connu une variation de type de salinisation de chloruré sodique en 2008 et 2010 à sulfaté chloruré en 2015. Les eaux de surface mobilisées par ce barrage semblent moins chargées en sels que les eaux de l'aquifère Néogène et atteints les valeurs minimales des eaux souterraines surtout pour les deux périodes 2008 et 2010. L'évolution de faciès de chloruré-sodique vers sulfaté sodique est due principalement à la dominance d'un anion de l'autre. L'origine des sulfates est due, sans doute, à la dissolution des formations évaporitiques du Néogène, mais, grossièrement, ces eaux appartiennent à la classe des oligochlorurées avec un $r \text{Cl}^-$ compris entre 15 et 40 meq/l (Brinis, 2003).

Le faciès chimique des eaux d'irrigation de la nappe de Miopliocène est chloruré sodique magnésique et calcique avec une salinisation de type chlorurée-sulfatée. Ce faciès, selon Brinis (2011) dénote l'influence des terrains triasiques salifères (djebel El Mellah).

Il s'agit d'une eau très salée vis à vis des sols, et peu salée vis à vis des plantes, et faiblement sodique. Cependant cette eau chlorurée sulfatée est très riche en magnésium, ce qui mérite une étude particulière sur les conséquences de l'utilisation d'une telle eau sur les sols et les plantes. Les effets de ce cation étant très controversés (Daoud et al. 1993).

La prédominance des chlorures sur les sulfates dépend essentiellement de l'état des minéraux qui génèrent ces éléments dans l'eau (équilibre, sursaturé, sousaturé). D'ailleurs, l'absence du faciès carbonaté est due en partie à sa présence dans l'eau en phase de précipitation (indice de saturation positif). Alors que les minéraux évaporitiques sont sousaturés.

Elle est normalement inutilisable pour l'irrigation. Par conséquent, les eaux principalement de la classe C5 ne peuvent être utilisées en irrigation que dans le cas des sols très drainants (sables et graviers) riches en calcium soluble (Dubost, 1994) d'où la nécessité d'installer un réseau du drainage là où il faut selon la nature du sol, la topographie, la géologie, hydrogéologie, géomorphologie ainsi que la qualité des eaux en suggestion. En plus, une eau

appliquée en excès pour le lessivage (Vallès et al, 1983) afin de maintenir la composition saline de la solution de sol proche de celle de l'eau d'irrigation surtout qui vienne de barrage (Dubost, 2002) en coordonnant avec le type des plantes cultivées qui devront être tolérantes aux sels comme celles indiquées dans le tableau des cultures tolérantes aux conditions extrêmes du milieu notamment la salinité (Ayers et Westcot, 1976). Tenant compte de la spécificité de la région de la plaine d'El-Outaya qui a une vocation céréalière en premier lieu, la tolérance des plantes cultivées vis-à-vis de la salinité varie largement en fonction de l'espèce, de la variété, du stade végétatif et des facteurs liés au milieu (Daoud et Halitim, 1994). Néanmoins l'historique de la région et le choix stratégique actuel et futur du pays doivent nous orienter vers des cultures du type céréalières, maraichères et fourragères. En fonction de la salinité des eaux d'irrigation utilisées, en plus des céréales, on note aussi que les agriculteurs peuvent adapter les cultures au différents niveau de salinité : agrumes, oliviers, grenadiers et autres cultures dites sensibles en amont, dans les parcelles peu salées, et artichauts et cucurbitacées en aval, dans les zones plus salées, selon l'étude réalisé par (Hartani et al, 2009), d'où la nécessité d'une véritable stratégie nationale impliquant tous les secteurs (Formation-Recherche-Agriculture-Eau-Energie-Industrie-Commerce,...) et toutes les disciplines (Agronomie-Hydraulique Génétique-Biotechnologie-Economie,...).

Afin de surmonter le problème binaire de salinité et perte d'eau d'un coté et diversifier, d'améliorer leurs revenus d'un autre coté, surtout que le sigle de l'organisme arabe de l'agriculture en 2016, afin de cérémonie de la journée arabe en agriculture chaque 27 septembre, est « la lutte contre les pertes de productions et la réduction des gaspillages alimentaires » qui passe obligatoirement par l'optimisation et la valorisation de mètre cube d'eau.

Il ressort de cette étude faite sur l'eau d'irrigation de la plaine d'El-Outaya, que soit l'eau d'irrigation de barrage de la « Fontaine de Gazelle » ou l'eau de forages exploitant la nappe de Miopliocene, a une forte salinité avec un risque d'alcalinisation moyen à fort.

L'examen des résultats d'analyse des paramètres physicochimiques du sol non irrigué montre la présence d'une salinité surtout en profondeur (CE de l'extrait diluée (1/5) supérieure à 3 dS/m pour le maxima) mais non fortement salée pour l'ensemble des échantillons. Le profil salin moyen trouvé est, selon Servant 1978, est alterné entre celui de type A indique une salinisation et le profil salin de type D présente une augmentation régulière de la salinité avec la profondeur traduisant un processus ascendant et/ ou descendant de salinisation sous l'effet

de l'évaporation conjugués avec l'irrigation ou pluies. Elle correspond à un processus permanent de désalinisation si la salinité reste faible. Donc, le sol non irrigué de la plaine d'El-Outaya est déjà salé. Le sol est très riche en calcaire total et pourvu d'une proportion importante de calcaire actif qui peut dépasser les 15 %; seuil limite du pouvoir chlorosant. Le pH est généralement basique ($7.5 < \text{pH} < 8.3$) dû principalement à une augmentation du taux de calcaire dans le sol. On constate que le sol de la plaine d'El-Outaya est de texture fine, surtout limoneuse et argileuse. Le faciès chimique dominant des sols non irrigués est sulfato-chloruré selon la profondeur du sol et le positionnement des sondages de la direction nord-est (où se trouve le dôme du trias) vers la direction nord-sud-ouest près de la zone de Tolga. L'ESP est une fonction mathématique en fonction du SAR, et suit leur allure générale, si le SAR augmente, l'ESP augmente aussi et vis versa. Les deux paramètres représentent un sol légèrement sodique. Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès sulfato-chloruré le long du sondage.

La simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol non irrigué de la plaine d'El-Outaya montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas surtout pour les minéraux carbonatés : Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3) où l'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positif. Par contre, l'indice de saturation des minéraux évaporitiques est négative reflète une sous saturation ou dissolution, pour comme le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) que l'anhydrite. Par ailleurs, l'indice de saturation d'halite (NaCl), se présente largement sous saturé ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols. Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des sols analysés et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se trouvent dans la solution du sol à l'état d'équilibre (saturés) à sursaturation et précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite.

Le suivi du changement chimiques du sol après la mise en irrigation des cultures cultivées selon chaque exploitation montre un changement bien considérable dans tous les paramètres ; la présence d'une salinité élevée (CE de l'extrait diluée (1/5) supérieure à 3 dS/m) pour l'ensemble des échantillons. Cette forte salinité est attribuée aux effets conjugués de la qualité de l'eau d'irrigation préalablement salée, aux conditions climatiques très arides produisant une forte évapotranspiration qui concentre la solution du sol et surtout à l'absence d'un réseau de drainage. Le profil salin moyen trouvé est, selon Servant 1978, est alterné entre celui de type B indique une désalinisation temporaire de la surface du sol et le profil salin de type D présente une augmentation régulière de la salinité avec la profondeur. Elle

correspond à un processus permanent de désalinisation si la salinité reste faible. Donc, on constate un déplacement de la salinité en profondeur du sol irrigué de la plaine d'El-Outaya qui est déjà salé. Le sol reste bien sûr calcaire avec une augmentation assez légère. Le pH est généralement basique ($7.5 < \text{pH} < 8.3$). Dans l'ensemble on constate une augmentation du taux de calcaire avec une légère augmentation du calcaire actif qui dépasse largement le seuil conseillé 15%, en même temps on observe une certaine modification vers l'augmentation dans tous les sels solubles apportés principalement par l'eau d'irrigation surtout pour le Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ et SO_4^{--} , conduisant à une légère diminution du SAR et ESP dû principalement à un lessivage des sels au delà de profondeur analysée (> 60 cm). Le faciès chimique dominant des sols irrigués est alterné entre chloruré-sulfaté en surface (0-20cm) à sulfato-chloruré au-delà de 20 cm selon la profondeur du sol dû à l'apport de ces deux éléments par les eaux d'irrigation surtout souterraines, sachant que un faciès de salinité du sol chloruro-sulfaté, largement représenté dans les régions arides, est constitué de sels à réaction proche de la neutralité, très solubles, donc très mobiles et susceptibles de se concentrer fortement sous ces climats ; ils sont constitués de chlorures dominants, sodiques, calciques ou magnésiens, associés à des sulfate. (Bouteyre et Loyer, 1992). On note, aussi, le changement du faciès de la solution du sol irrigué de chloruré et sulfaté calcique change vers un faciès sulfaté calcique d'où l'influence des eaux d'irrigation qui ont un faciès sulfaté.

Il s'agit donc d'un sol salin à structure non dégradée avec un faciès chloruré sulfaté à sulfato-chloruré en profondeur.

Le suivi de la simulation à l'évaporation naturelle de la solution du sol irrigué de la plaine d'El-Outaya montre que les solutions sont déjà sursaturées (précipitation) selon les cas surtout pour les minéraux carbonatés : Dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Calcite (CaCO_3), Aragonite (CaCO_3). L'indice de saturation de ces minéraux carbonatés est positif et dépasse largement l'état de saturation (équilibre) et se cristallise (précipitation), on peut constater une précipitation plus concentrée de ces minéraux sous irrigation par rapport à sol non irrigué. Par contre, l'indice de saturation des minéraux évaporitiques est négative reflétant une sous saturation ou dissolution pour comme le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) que l'anhydrite, ils sont négatifs mais proches de l'état de l'équilibre surtout pour le gypse dû essentiellement à l'apport des sulfates par les eaux d'irrigation qui conduit à un début de précipitation du gypse dans le sol. Par ailleurs, l'indice de saturation d'halite (NaCl), se présente largement sous saturé ce qui lui permet de se dissoudre davantage dans les sols, mais il est plus concentré dans le sol par rapport à l'état initial non irrigué ce qui augmente la conductivité

électrique(CE). Cette simulation confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des sols analysés et l'importance de l'halite dans le chimisme. Les minéraux carbonatés se trouvent dans la solution du sol à l'état d'équilibre (saturés) à sursaturation et précipitent notamment sous forme de calcite, d'aragonite et de dolomite. Sous l'irrigation ou l'apport d'eau, elle fait dissoudre les minéraux évaporitiques (gypse-halite et anhydrite).

Les sols irrigués de la plaine d'el-Outaya ont tendance à précipiter les minéraux carbonatés et à dissoudre les minéraux évaporitiques, on peut aussi conclure que l'IS du gypse des sols irrigués est proche de l'équilibre qui permet de se précipiter d'avantage. La simulation thermodynamique confirme l'influence des roches évaporitiques sur la salinité des sols analysés et l'importance de l'halite dans le chimisme.

La salinité du sol augmente par contre la sodicité diminue aussi que pour l'ESP c'est-à-dire il ya un lessivage de sodium en profondeur (IS d'halite est en maximum -5.34). Irrigués avec des eaux salées et sodiques, les sols évolueront vers une salinisation et une sodisation. La réhabilitation des sols salés de la plaine d'El-Outaya exigera selon les cas un lessivage et /ou un drainage et/ou des apports d'amendement gypseux.

De cette étude préliminaire, il ressort que les sols des trois périmètres étudiés dans la plaine d'El Outaya, sont de textures variables et sont, surtout, limono-sableuses à limono-argileuse. Ils sont d'apports alluviaux plus ou moins salés ou sodiques (sols peu évolués et halomorphes). Ces sols sont, selon Baise (1988) neutres à très basiques et selon Aubert (1978) non salés à excessivement salés et non sodiques à légèrement sodiques. Dans tous les cas, une agriculture irriguée doit avoir un suivi du niveau et de la distribution des sels dans le sol, qui permettra de déterminer le seuil de risque, pour lequel un lessivage doit être pratiqué.

Enfin, on peut conclure que les résultats des analyses physico-chimiques des sols suggèrent que la qualité des eaux utilisées en irrigation a un impact non négligeable sur la qualité des sols surtout ceux irrigués par les eaux de forages.

De cette étude préliminaire qui mérite d'être poursuivie, on constate que selon les types de sols, la qualité des eaux d'irrigation ont un impact non négligeable sur la salinisation des sols irrigués ; ceci en fonction de leur contexte naturel et fort probablement du type de cultures utilisées.

En comparaison des trois régions d'étude, la qualité du produit agricole surtout les dattes, n'est pas liée principalement aux facteurs édaphiques et pédoclimatiques, l'itinéraire

technique pratiqué par chaque agriculteur joue un rôle décisive dans la production. Le drainage fait l'équilibre du bilan ionique des sels et par conséquent le profil salin ; don il faut améliorer cette solution. La meilleure production de la qualité des dattes est celle de Tolga (BBA) est l'origine de cette maîtrise du bilan salin. Cet exutoire naturel (drain) ressemble ou fonctionne comme les reins de l'être vivant, il faut les garder sains et en bon état.

La valeur et la productivité des sols à haute teneur en sels diminuent considérablement chaque année à travers le monde, causant d'importants dommages socio-économiques et environnementaux à long terme. L'accumulation de sels par la mauvaise gestion des terres et des eaux est un problème grave à l'échelle mondiale. Pour enrayer la perte de terres cultivables due à l'accumulation de sels, l'utilisation de méthodes appropriées de gestion des terres est indispensable. Savoir discerner les symptômes des sols salins à l'avance peut éviter à la fois de coûteux efforts de remise en valeur et des pertes de terres supplémentaires.

Il s'avère que l'amélioration de la productivité des plantes en conditions salines et arides, peut être redise en intégrant deux aspects essentiels : d'une part, la recherche de la variété tolérante à la salinité et précoce pour échapper au stress hydrique qui accentue l'effet salin et d'autre part dans le cadre continuum sol-plantes-climat, piloter le couple irrigation – drainage pour maîtriser le profil salin.

En conclusion, l'agriculture irriguée est possible et durable en zones arides, même avec des eaux de qualité médiocre, sous réserve que les projets soient correctement étudiés et mis en œuvre avec des moyens techniques suffisants. Un contrôle permanent doit être exercé sur les moyens de production et une formation complète doit être assurée aux agriculteurs. (Bouteyre et Loyer, 1992). Dans tous les cas, une agriculture irriguée requiert un contrôle périodique du niveau et de la distribution des sels dans le sol, cela permettra de déterminer le seuil de risque, pour lequel un lessivage doit être pratiqué.

Conclusion générale et Perspectives

L'objectif de ce travail est une contribution à la caractérisation des sols et des eaux au niveau de la région des Ziban en conditions salines et/ou sodiques.

La sécurité alimentaire passe obligatoirement par la connaissance de nos ressources en eau, en sol et en ressources biologiques. Elle touche les trois composantes : l'environnement /biodiversité de l'écosystème, la société (homme) et l'économie.

La région des Ziban est un laboratoire ouvert dans la nature, avec un capital d'expérience certain, car au Sahara ni trop faire ni rien faire : Ziban région à forte dynamique agricole, il faut maîtriser le profil salin et hydrique afin d'obtenir une agriculture durable pour une sécurité alimentaire fiable surtout où le changement climatique va accélérer les contraintes extrêmes du milieu (salinité, sodicité, manque d'eau,...).

La région, jadis à vocation principalement dattière, a vu ces dernières années un développement rapide de l'agriculture maraîchère et céréalière exigeant de ce fait de grandes quantités d'eau. Ce ci s'est traduit par la multiplication des points de captage, avec comme résultat : une diminution de la ressource et la dégradation de la qualité des eaux. Il est impératif, de ce fait, de bien gérer cette ressource. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'un instrument permettant de prévoir l'évolution future de ces nappes en fonction des prélèvements actuels et futures. A ce titre plusieurs approches par modélisation numériques ont été effectuées pour évaluer les volumes exploitables en fonction de la demande. Ces modèles ayant pour finalité l'optimisation de l'exploitation de ces réserves ainsi que leurs qualités, permettront de placer une limite d'exploitation et de choisir les meilleurs sites potentiels d'exploitation agricole.

La compétition pour la ressource en eau a pris récemment un tour plus aigu. Malgré la construction, dans de nombreux pays, de grands barrages constituant des réserves d'eau importantes, l'eau d'irrigation manque. Les agriculteurs sont alors dans l'obligation d'avoir recours à des eaux d'irrigation de moins bonne qualité (eaux d'irrigation recyclées, eaux usées des villes, ...etc.). Le risque de salinisation secondaire des sols est alors accru. (Cheverry et Bourrié, 1998). L'eau est un facteur limitant de la production agricole et à terme, près de la moitié des surfaces irriguées dans le monde seraient menacées par la salinisation secondaire (Lahlou et al, 2000). D'autre part, le degré de salinisation d'une surface irriguée dépend de plusieurs facteurs, principalement la qualité de l'eau d'irrigation, la nature du sol irrigué, les

conditions climatiques et le niveau de la nappe en question. Cette forte salinité est attribuée aux effets conjugués de la qualité de l'eau d'irrigation préalablement salée, aux conditions climatiques très arides produisant une forte évapotranspiration qui concentre la solution du sol (Cheverry et Robert, 1998). Or, Les facteurs climatiques sont très favorables à l'ascension des sels, à la concentration de la solution du sol et à la précipitation des sels dans la zone racinaire et l'horizon superficiel entraînant la salinisation. Cette salinisation peut être naturelle ou anthropogénique. (Hachicha, 2007).

A titre d'exemple, les eaux de la nappe du Mio-plio-quadernaire de la zone Est de la plaine d'El Outaya présente une salinité assez élevée variant entre 1 et 5 g/l (Brinis et al, 2009), leur influence de salinisation ne peut être que négative pour les sols et par conséquent sur la plus part des cultures. Du fait une analyse rigoureuse de leur composition physico-chimique s'avère nécessaire pour la détermination de la part de leur influence sur la salinisation des sols en question. Donc, les eaux d'irrigation par leur composition peuvent avoir une influence sur le sol (Coutinet, 1965), car dans les régions arides la qualité des sols est étroitement liée à la qualité de l'eau d'irrigation (Halilat, 1998 in Omouri, 2009).

Selon Dutil 1971, des sols salins sont-ils très nombreux et spectaculaire, tout particulièrement dans les régions sédimentaires, grandes fournisseurs des anions et cations caractérisant la salure. Où dans les vieilles palmeraies, bien irriguées et bien drainées, il apparait que la concentration de la solution du sol est de l'ordre de 1.5 à 2 par rapport à la concentration de l'eau d'irrigation utilisée (Durand, 1958) ; mais, dans les palmeraies moins bien drainées, la solution du sol peut être 2 à 3 fois plus concentrée que l'eau d'irrigation. En valeur moyenne, et avec une concentration double au niveau du drain, on peut dire que l'exportation du sel est de l'ordre de 2/3 des apports, 1/3 reste dans le sol irrigué. (Dutil, 1971).

Deux cas représentatifs et comparatifs : (présence et absence du drainage) ainsi que avant et après irrigation sont mentionnées dans notre étude. Cette étude a permis de caractériser deux sous zones, zone en amont à faciès sulfaté et zone en aval à faciès chloruré. Aussi nous pouvons dire que les eaux de la région étudiée présentent deux faciès suivant le sens de l'écoulement, chloruré et sulfaté calcique et magnésienne en amont avec une tendance à devenir chloruré sodique et potassique à l'aval. Compte tenu de l'évaporation intense, les nappes phréatiques sont souvent hyper chlorurées sodiques.

La qualité des sols a d'abord été définie comme étant son aptitude à fournir à l'ensemble de la biomasse, et en particulier aux plantes, un milieu propice à leur

développement. (Tessier et al, 1996). Donc, Le socle de tout développement est l'eau en relation étroite avec le sol, et comme idée générale, au Sahara là où il ya de l'eau, le sol de bonne qualité, au terme stricte du mot, est absent, le quart du Sahara (Nord Est) est la meilleur partie de la mise en valeur car l'eau est existe d'une façon abondante.

Dans tous les profils du sol étudiés des trois régions, le calcul des indices de saturation montre que la solution du sol étudiée est saturée par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite et sous-saturées pour la halite, le gypse et l'anhydrite. Donc, les minéraux carbonatés sont susceptibles de se précipiter par contre les minéraux sulfatés sont toujours à l'état de sous-saturation donc susceptibles de se dissoudre, avec quelques exceptions surtout pour la région de Bordj Ben Azouz à vocation phoenicicole. Cela est en dépend de l'eau d'irrigation et en relation avec le fond pédo-géochimique initial.

Le drainage a un impact marquant sur l'équilibre du bilan ionique des sels et par contre le bilan salin ; donc il faut améliorer cette solution. La meilleure production de la qualité des dattes est celle de Tolga (BBA) est l'origine de cette maitrise du bilan salin. Cet exutoire naturel (drain) ressemble ou fonctionne comme les reins de l'être vivant, il faut les garder sains et en bon état. Il faut le multiplier dans toute la région des Ziban. Aussi, le drainage des terres irriguées est-il très important pour contrôler et réduire la salinisation des sols car l'irrigation avec des eaux salées nécessite l'apport d'une fraction d'eau supplémentaire pour lessiver les sels (Vallès et al, 1983) afin de maintenir la composition saline de la solution de sol proche de celle de l'eau d'irrigation (Dubost, 2002). Donc, L'érosion, les apports d'éléments divers, le drainage, le lessivage ... seront à prendre en considération dans l'optique de la conservation des sols.

Irrigués avec des eaux salées et sodiques, les sols évolueront vers une salinisation et une sodisation, entraînant un comportement physique défavorable (dispersion et baisse de la perméabilité)et des difficultés nutritionnelles pour les plantes. Leur réhabilitation exigera selon les cas un lessivage et /ou un drainage et/ou des apports d'amendement gypseux.

Quelque soit la spéculation cultivée, la salinité dépend principalement de la qualité des eaux d'irrigation et de type du sol. On peut conclure qu'il existe différents systèmes : Système exoréique cas des oasis de BBA, Sidi Okba a un drainage naturel basé sur le sens d'écoulement ainsi que une texture sableuse en profondeur (1à 1.5 m). Par contre la plaine d'El-Outaya est une entité spécifique par sa grande immensité, offre toute seule une grande

potentialité hydro-agricole dans la région. Quelque soit la région d'étude analysée, la salinité est la contrainte majeure trouvée due principalement à l'irrigation par des eaux salées.

La région d'étude-Ziban- a ses caractéristiques spécifiques, on peut les investir afin de développer l'agriculture dans une stratégie du développement durable.

En effet, dans ces régions l'eau d'irrigation, à cause de sa forte concentration en sels, a un impact négatif sur le développement et la productivité des cultures, mais il diffère selon plusieurs paramètres (caractéristiques des sols, types de sels, nature des plantes et stade physiologique). Parmi les voies et les moyens permettant de lutter contre la salinité des eaux et des sols, il est fait souvent appel à l'amélioration génétique par le biais de la biotechnologie et la sélection des espèces et/ou variétés adaptées à ces conditions extrêmes du milieu d'une part et, à la maîtrise du couple irrigation-drainage et à l'amélioration du potentiel nutritif du sol et notamment azoté d'autre part, d'où la nécessité d'une véritable stratégie nationale impliquant tous les secteurs (Formation-Recherche-Agriculture-Eau-Energie-Industrie Commerce,...) et toutes les disciplines (Agronomie-Hydraulique-Génétique-Biotechnologie Economie,...).

En comparaison les trois régions, la qualité du produit agricole surtout les dattes, n'est pas liée principalement aux facteurs édaphiques et pédoclimatiques, l'itinéraire technique pratiqué par chaque agriculteur joue un rôle décisive dans la production.

De ces résultats, il est projeté d'élaborer des propositions permettant d'orienter l'évolution de la qualité des sols, d'améliorer et de pérenniser la productivité agricole. Cela à travers le choix des sites de mise en valeur, le choix des sols, le pilotage des irrigations, les techniques de réhabilitation, les techniques de suivi des périmètres cultivés, le choix des systèmes de culture.

Dans tous les cas, une agriculture irriguée requiert un contrôle périodique du niveau et de la distribution des sels dans le sol, cela permettra de déterminer le seuil de risque, pour lequel un lessivage doit être pratiqué.

En conclusion, l'agriculture irriguée est possible et durable en zones arides, même avec des eaux de qualité médiocre, sous réserve que les projets soient correctement étudiés et mis en œuvre avec des moyens et des techniques suffisants. Un contrôle permanent doit être exercé sur les moyens de production et une formation complète doit être assurée aux agriculteurs.

Recommandations et perspectives

Enfin et afin d'atteindre les objectifs assignés à la région Ziban en matière de relation du continuum eau-sol- plante, un certain nombre d'études et de travaux doivent être menés. Les points suivants se sont les réflexions de nos idées après cette immense étude ajoutées à des reconnaissances et des informations recueillies à travers une longue durée de formation-travail au sein du centre CRSTRA surtout sous les orientations de M. Halitim :

- Mise au point des méthodes d'irrigation, et pilotage et prévoir un calendrier prévisionnel d'irrigation en fonction de la demande climatique, de la qualité des eaux, des types de sols, des cultures et des stades de développement. Tenant compte les potentialités hydriques et la valorisation du mètre cube d'eau ;
- Mise au point des techniques de drainage, des fractions lessivantes et des techniques visant à lutter contre la salinité (apports d'amendements) en valorisant un aménagement hydro-agricole et le suivi d'évaluation : Le drainage des terres irriguées est très important pour contrôler et réduire la salinisation des sols, les eaux de drainage doivent être évacuées de manière sûre, ainsi elles peuvent être recyclées en installent des stations d'épuration. Certes les coûts d'installation d'un drainage sont énormes, mais le drainage naturel ou artificiel est obligatoire et en doit apporter régulièrement des doses de lessivage pour maintenir la composition saline de la solution de sol proche de celle de l'eau d'irrigation. (Dubost, 2002).
- Maitriser la dose de lessivage ; L'irrigation des sols salés nécessite en plus de l'eau apportée aux cultures, un volume excédentaire permettant de lessiver les sels en profondeur. La détermination de la dose de lessivage est fonction de plusieurs paramètres, dont la nécessité d'une étude pour la définir.
- Utilisation de modèles de simulation mathématiques pour une gestion efficace de l'irrigation par les eaux salées, avec contrôle de la salinité des sols et des rendements des cultures.
- En Cultures intercalaires des palmiers dattiers, la plantation des cultures de légumineuses, famille fixatrice de l'azote de l'air, comme la fève, la luzerne. ... d'une part, et valorise le mètre cube d'eau et d'autre part, favorise l'absorption minérale et par conséquent améliore la production sur le plan qualitatif que quantitatif. Avec de telles eaux on ne peut pratiquer que des cultures tolérantes. Heureusement toute la gamme des légumes sahariens, carottes, navets, oignons, betteraves, artichauts, melons, tomates, aubergines, pastèques...etc., ou des céréales orge, blé, maïs et des arbres fruitiers,

abricotiers, grenadiers, figuiers, résistent ou tolèrent plus ou moins la salinité. (Dubost, 2002). La tolérance des plantes cultivées vis-à-vis de la salinité varie largement en fonction de l'espèce, de la variété, du stade végétatif et des facteurs liés au milieu. Néanmoins l'historique de la région et le choix stratégique du pays doivent nous orienter vers des cultures du type céréalières, fourragères et maraichères ;

- Introduction d'élevage à l'intérieur de l'exploitation (oasis, palmeraie moderne ou traditionnelle, périmètre irrigué, sericulture) afin de fournir le fumier avec les moindres coûts en minimalisant les intrants chimiques afin de protéger la santé humaine qu'animale, végétale et le sol. Il faut promouvoir des systèmes agro-écologiques qui permettent la conservation du carbone à long terme dans les sols : diversification des paysages, usage diversifié des ressources génétiques, élevage sur des prairies permanentes, systèmes de polyculture-élevage, maintien de couverts végétaux permanents sur le sol-mulching, agroforesterie, utilisation de légumineuses.... (INRA, 2015) ;
- Organisation des filières et aller vers la vocation agricole-spécialisation, c'est-à-dire l'identification des régions productives-pilotes en respectant les coûts de production surtout en ressources naturelles : capital eau-sol ;
- Savoir les besoins commerciaux réels des denrées alimentaires et faire des stratégies productives d'excellences ; et pour changer nos modes de consommations, nous devons développer des modes de consommation de proximité (agriculture paysanne, agriculture urbaine et périurbaine), des aides pour la reprise d'entreprises appliquant d'un projet écologique intégré ;
- Faire de la recherche appliquée au défi du développement durable est un réel partenaire en continu.
- Elaboration d'un réseau de veille des risques liée à la salinité et sodicité des sols et des eaux d'irrigation (dépérissement, dégradation des terres cultivées, chutes de rendements,...) ;
- L'étude pédologique récente de l'ensemble des oasis anciennes apparaît primordiale et plus que nécessaire, permette de dégager un certain nombre de caractéristiques spécifiques liées à la mise en culture. (El Fekih et Pouget, 1966) comme dans cas d'étude Sidi Okba, Bordj Ben Azouz ou d'autre comme l'ancienne oasis d'Oumache. Le but est de cartographier des sols afin de classer les sols favorables à la mise en valeur ;

- Pour mieux valoriser nos travaux de recherches, et tant que les Ziban est une région pionnière à vocation agricole, la multiplication du nombre des stations météorologiques apparait plus que nécessaire afin de maîtriser et contrôler le bilan hydrique (l'ETP, et pluie/irrigation) et par conséquent le bilan salin.

Tenant compte de nos résultats, on peut suggérer ou proposer d'ajouter d'autres classe de classification C6 et C7 ou plus, car lors du report des échantillons du sol ou de l'eau sur le diagramme de Riverside ne ressort pas la qualité des ces derniers sur ce diagramme.

Pour la région de l'oasis de Bordj ben Azouz (BBA), on peut exploiter cette région dans la production d'un fertilisant ou amendement à base du gypse pour les sols des autres régions à complexe adsorbant désaturé surtout dans le Nord du pays. Parce que les sols sont trop chargés en sulfate, en magnésium, donc on peut installer une unité de recyclage et de transformation afin de fabriquer le gypse comme source de fertilisant ; pour l'objectif principal est de l'exportation du gypse des zones sursaturées(BBA) à des zones sous saturées ou à pH acides (comme l'Afrique centrale) afin d'améliorer le revenu du pays.

Autres aspects de ce modeste travail à suivre dans les futures travaux de recherches comme la géostatistique, développer aspect communication –marketing- et partenariat socio économique surtout dans la solution et conception des modèles type de chaque région /problématique. Une cartographie des sols existants et en les valoriser sous forme d'un Atlas est un grand objectif afin de réaliser une banque de données et outil aide à la décision avec une actualisation dynamique et permanente des données dans le but d'une bonne mise en valeur.

De ces résultats, il est projeté d'élaborer des propositions permettant d'orienter l'évolution de la qualité des sols, d'améliorer et de pérenniser la productivité agricole. Cela à travers le choix des sites de mise en valeur, le choix des sols, le pilotage des irrigations, les techniques de réhabilitation, les techniques de suivi des périmètres cultivés, le choix des systèmes de culture car la valeur et la productivité des sols à haute teneur en sels diminuent considérablement chaque année à travers le monde, causant d'importants dommages socio-économiques et environnementaux à long terme (migration et exode rural-pauvreté-désertification). L'accumulation de sels par la mauvaise gestion des terres et des eaux est un problème grave à l'échelle mondiale. Pour enrayer la perte de terres cultivables due à l'accumulation de sels, l'utilisation des méthodes appropriées de gestion des terres est indispensable. Savoir discerner les symptômes des sols salins à l'avance peut éviter à la fois de coûteux efforts de remise en valeur et des pertes de terres supplémentaires. Il s'avère que l'amélioration de la productivité

des plantes en conditions salines et arides, peut être redise en intégrant deux aspects essentiels : d'une part, la recherche de la variété tolérante à la salinité et précoce pour échapper au stress hydrique qui accentue l'effet salin et d'autre part dans le cadre continuum sol-plantes-climat, piloter le couple irrigation – drainage pour maîtriser le profil salin.

Références Bibliographiques

- Abdelhafid Y, 2011-** Genèse et caractéristiques des sols de la plaine d'El-Outaya. Rapport du projet sur les phases salines(2012). CRSTRA-Biskra.74p.
- Abdelhafid Y, Rechachi MZ, Otmane T, Rouahna H et Halitim A., 2017-**Réponse nutritionnelle de trois variétés d'orge à la qualité de l'eau d'irrigation et à la fertilisation azotée. Ed Journal Algérien des Régions arides (JARA)-CRSTRA N°14, pp167-177. (Accepté December2016, published en ligne 15 january2017).
- Abeche H., 2001-** Caractérisation physico- chimique et Minéralogique des sols de la plaine d'El-Outaya (W. Biskra). Mém.Ing. Univ de Batna. 73p.
- Achour S., 1990-** La qualité des eaux du Sahara septentrional en Algérie- Etude de l'excès en fluor, Tribune de l'eau, Cebdeau, n°6, 42 (542), 53-57.
- Aidaoui S., 1994-** Ressource en eau et aménagement hydro-Agricole dans la région de Biskra 'Ziban'(Algérie) ; thèse Doctorat. University de Nancy II. 327p.
- ANAT,2003 -** Etude Schéma directeur des ressources en eau W. de Biskra dossier Agropédologique.53p
- Anonyme, 1908-**compte rendu du service GÉOLOGIQUE DES TERRITOIRES DU SUD DE L'ALGERIE. Compte-Rendu de la Campagne 1907-1908.145p.
- Anonyme., 1980-** Carte Hydrogéologique du Biskra –notice explicative 1/200000. Ed Direction des études de milieu et de la recherche hydraulique, service hydrogéologique.49p.
- ANRH., 2008-** inventaire des points d'eau et enquête sur les débits extraits de la wilaya de Biskra. Rapport réalisé en Septembre 2008.23p
- ANRH., 2011-**Etude sur modèle mathématique du système aquifère de la région du Biskra.
- Askri B et Bouhlila R., 2010-** évolution de la salinité dans une oasis moderne de la Tunisie. Ed étude et gestion des sols, Vol 17,3-4, 2010pp 197-212.

Aubert G., 1986- Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols dits (salés) ou salsodiques. Cahier d. ORSTOM, série. Pédologie, XX, 1, pp. 73 -78.

Aubert G., 1978. Méthodes d'analyses des sols. Ed .C.R.D.P Marseille. 188p.

Aubert G., 1978- Sols salés en Afrique tropicale. UNEP URSS Ac. of Sci. seminar on salinity problems.

Aubert G., 1976 – Les sols sodiques en Afrique du Nord. Ann.Agro. ELHarrach, pp186-196.

Aubert G., 1970- Transformations des sols de la zone aride sous l'influence des irrigations. O.RSTOM. collection de référence n° 14266.pp75-82.

Aubert G., 1960- Les sols de la zone aride, étude de leur formation, de leurs caractères, de leur utilisation et de leur conservation. Colloque général sur les problèmes de la zone aride Paris, 11-18 mai 1960.

Anonyme, 2012- SDAT-Schéma directeur d'aménagement touristique de la wilaya de Biskra. Mission II Diagnostique et prospectif URBACO. p171.

Ayers, R S et Westcot D W., 1976- la qualité de l'eau en agriculture. Bull . FAO. Irrig. Drain., Rome, 107p.

Ayers R S et Wetscot D W., 1988- La qualité des eaux en agriculture. Bulletin Fao Irrigation et drainage. N°29. Rome, 180p.

Baize D., 1988. Guide des analyses courantes en pédologie. Choix - expression présentation - interprétation. INRA, Paris, 172 p.

Bala S., 2005. Evolution de la salinité des sols sous serre en milieu aride. Cas de la station de l'ITIDAS de Biskra. Thèse. Magister. INA. El-Harrach. 129p.

Bala S et Bensaid R., 2008- impact des eaux d'irrigation sur la salinité des sols dans la région de Biskra (Sud-Est –Algérie). Actes; colloque International sur l'Aridoculture. Optimisation des productions agricoles et développement durable. Tome 1: communications orales. pp 119-128.

- Bakalowicz M., 1976** - Géochimie des eaux karstiques : une méthode d'étude de l'organisation des écoulements souterrains. Actes coll. Hydol. Pays Calcaires, Besançon-Neuchâtel.
- Barbiero L., Valles V-1992** : Aspects géochimiques de l'alcalinisation des sols dans la vallée du Dallol, Bosso (République du Niger. Cah.OSTROM, Série. Pédol, Vol XXVII, 2, 143-152. N.
- Belguedj M, Salhi A et Matallah S., 2008**-diagnostic rapide d'une région agricole dans le Sahara Algérien, Axes de Recherche/ développement prioritaires : cas de la région des Ziban (Biskra).Ed Institut National de la Recherche Agronomique d'Algérie.
- Benaouda L., Assami T., Meridja W., Halitim S. et Halitim A., 2008.** Changement de la qualité des sols irrigués de la plaine d'El-Outaya (Biskra) : Données de base et hypothèses. Colloque international sur l'aridoculture- optimisation des productions agricoles et développement durable. Biskra, C.R.S.T.R.A, 13-14 Décembre 2008.
- Ben Hassine, 2005**- effet de la nappe phréatique sur la salinisation des sols de cinq périmètres irrigués en Tunisie. Ed Étude et Gestion des Sols, Volume 12, 4, pp 281 à 300
- Benziouche S et Chehat F., 2010**- La Conduite du Palmier Dattier Dans les Palmeraies des Zibans (Algérie) Quelques éléments d'analyse. Ed European Journal of Scientific Research Vol.42. No.4. Pp.644-660.
- Bertrand R, N'Diaye KM et Keita B., 1994**- l'alcalinisation/sodisation, un danger pour les périmètres irrigués sahéliens. Sécheresse n°3, vol. 5, pp 161 – 171.
- Bernstein, L. and Frangois, L.E., 1975**- Effects of frequency of sprinkling with saline waters compared with daily drip irrigation. Agron.]. 67(2): 185-191.
- Bouchama A-1984** : l'oasis géante. Ed. Enal-Entreprise Nationale du Livre. Alger.p
- Bougherara A et Lacaze B, 2009**- Etude préliminaire des images Landsat et Alsat pour le suivi des mutations agraires des Ziban (extrême nord-est du Sahara algérien) du 1973 à 2007.journée d'animation scientifique (JAS 09) de l'AUF Alger Novembre 2009.
- Boulaine J., 1978** - Cours d'hydro pédologie. Ed institut national agronomique .E.N.G.R.E.F. 193p.
- Boulaine S., 1957** Les sols des plaines du Cheliff. Thèse Doc d'Etat Université d'Alger, 357 p.

Bourrié G-2008 : journées de la société Suisse de Pédologie et de l'AFES (Association Française pour l'étude du Sol).

Bourrié G-1976 -Acquisition de la composition chimique des eaux en climat tempéré application aux granites des Vosges et de la Margeride. Thèse Doctorat université Louis Pasteur de Strasbourg institut de géologie. France 180p.

Bouteyre G et Loyer JY., 1992.- Sols salés, eaux saumâtres, des régions arides tropicales et méditerranéennes: principaux faciès, conséquences pour l'agriculture. ED ORESTOM ; pp 69-80.

Boutouga F., 2012- Ressources et Essai de Gestion des eaux dans le Zab Est de Biskra. Mém. Magister. Université d'Annaba. 132p.

Bouziane MT et Labadi A., 2009- Les eaux profondes de la Région de Biskra (Algérie). Ed. European journal of Scientific Research. Vol25 N°04. Pp526-537.

Brinis N., 2011- Caractérisation de la salinité d'un complexe aquifère en zone aride cas de l'aquifère d'El-Outaya région nord-ouest de Biskra. Algérie. Thèse doctorat. Université de Biskra.230p.

Brinis N, 2003.Essai d'explication de la salinité des eaux de la nappe du Mio-Pliocène : cas de la zone Est de la plaine d'El-Outaya. (w) Biskra. Mém. Mag. 102 p.

Brinis N., Boudoukha A., Djabri L. et Mania J., 2009. La salinité des eaux souterraines de la zone Est de la plaine d'El-Outaya. (Région de Biskra, Algérie).Ed.Bulletin du service géologique national. Vol 20, N°1, pp.49-61.

Brinis N, Boudoukha A et Djabri L., 2010- Evolution des Facies Chimiques des Eaux Souterraines dans da Plaine d'El-Outaya, Biskra, Algérie. Ed Journal International Environmental Conflict Management, Santa Catarina – Brazil, 1(1), pp. 98-105.

Callot G, Chamayou H, Maertens C et Salsac L, 1982- mieux comprendre les interactions sol-racine incidence sur la nutrition minérale.Ed INRA, Paris, 325 p.

Calvet R., 2003-Le sol propriétés et fonctions tome 2 phénomènes physiques et chimiques application agronomiques et environnementales. Ed. France Agricole-dunod. 511p

Chabour N- 2006 : Hydrogéologie des domaines de transition entre l'Atlas saharien et la plateforme saharienne à l'Est de l'Algérie .thèse doctorat en géologie. Université de Constantine.176p.

Capot –Rey K. contribution à l'hydrologie du Mzab, IV congrès des sociétés savante de l'Afrique du Nord, rabat 18-20 avril 1938, K,II, Alger, 1939 pp 467-478. Anonyme, 1975 ; Recherche sur l'Algérie mémoire et document. Nouvelle série volume 17 centre national de la recherche scientifique.

Cataldo H., 1988- Biskra et les Ziban. Ed collection Français d'Afrique.176p.

Chebbah M., 2007- Lithostratigraphie, Sédimentologie et modèles les de Bassins des dépôts néogènes de la région de Biskra, de part et d'autre de l'accident Sud Atlasique (Ziban, Algérie).thèse doctorat d'état.417 p.

Chebbah M. et Lamouroux C. (2012) -La Fosse Sud Aurèsienne au Néogène (Domaine pré-saharien, Algérie) : séquences de dépôt, propositions de corrélations et évolution sédimentaires. Bull. Serv. Géol. Nat, Alger. Volume 23 n°3. pp 1-21.

Chebbah M., Marmi R. et Lamouroux C., 2008. Sédimentologie des faciès et paléogéographie du Bassin d'El-Outaya au néogène (Atlas Saharien, Algérie).Ed. Bulletin du service géologique national. Vol 19, N°3, pp.235-244.

Cherbuy B, 1991-les sols salés et leurs réhabilitation-étude bibliographique-Cemagref ,

Cheverry Cl et Robert M, 1998-La dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau : une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la Méditerranée ? Ed. Etude et Gestion des Sols, 5, 4,1998. pp 217-226.

Cheverry Cl et Bourrié G-1998 : la salinisation des sols. Pp Chapitre n 08 pp 109-127.paru dans mieux comprendre sol interface fragile : Stegel P et S. Gelin, coord-1998. Ed INRA, Paris,147, rue de l'université- 75338 Paris Cedex 07. P213.

Côte M., 1987-l'Espace Algérien (les prémices d'un aménagement). Ed.OPU.Alger.

Coutinet S., 1965- Méthodes d'analyses utilisables pour les sols salés, calcaires et gypseux. Analyse d'eau, l'agronomie tropical p 1262-1269. Institut de Recherche Agronomiques tropicales et Rivières service de coopération technique. OUTRE-MER.

C.P.C.S., 1967- Commission de pédologie et de cartographie des sols. Classification des sols. Institut national de la recherche agronomique (INRA). Paris : Laboratoire de géologie-pédologie de l'ENSA, 87p

Daddi Bouhoun M et Brinis I., 2004 étude de la dynamique des sels soluble dans un sol irrigué Gypso-salin : cas d'une palmeraie de la cuvette de Ouargla. Colloque International « TERRE et EAU » Annaba 21,22et 23 Novembre 2004.pp5-8.

Daoud Y., 1993 : Contribution à l'étude des sols des plaines du Chélif-le phénomène de salinisation, conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux. Thèse doctorat. Page 233.

Daoud Y, Cheverry Cl et Robert M., 1993- Rôle physicochimique du magnésium dans les sols salés des plaines du Cheliff (Algérie). Science du sol- Vol. 31.4, 281-293.

Daoud Y et Halitim A., 1994- Irrigation et salinisation au Sahara algérien. Sécheresse n°3, vol. 5, pp 151 – 160.

Dellal A et Halitim A., 1992-Activités microbiennes en conditions salines : cas de quelques sols salés de la région de Relizane (Algérie). Ed cahiers de l'agricultures 1 ; 335-340.

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 d'Ouargla, (81p).

Dosso M., 1980. Géochimie des sols salées et des eaux d'irrigation. Aménagement de la Basse vallée de l'Euphrate en Syrie. Soil study. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 186p.

Droubi A., 1976-Géochimie des sols et des solutions concentrées par évaporation. Modèle Thermodynamique de simulation application aux sols salés du Tchad. Thèse Doctorat-

Drouiche A et Harrat N, 2010- rapport de la mission portant le suivi quantitatif et qualitatif es ressources en eau souterraine sus dans la wilaya de Biskra réalisé par (Drouiche et Harrat, 2010) de la division eau du CRSTRA dans le cadre d'une convention tripartite signée entre l'ABHS, L'ANRH et le CRSTRA.23p.

Dubost D., 2002.Ecologie, Aménagement et Développement Agricole des Oasis Algérienne. Ed C.R.S.T.R.A. 423 p.

Dubost D-1994 -Pratique de l'irrigation au Sahara : diagnostic rapide en milieu oasien et stratégie de développement. Ciheam-Iam Montpllier. Commissariat régional de développement Agricole TOZEUR, Novembre 1994.pp54-60.

Duchaufour P., 1997 –Abrégé de pédologie. Sol, végétation, environnement. 5° Ed. Masson, Paris, 291 p.

Durand J H., 1988- Arrêter le désert. Ed Bodin Paris in Technique vivante. 418p.

Durand J.H., 1958. Les sols irrigables. Etude pédologique. S.E.S. 193 p.

Durand J.H., 1983- Les sols irrigables. Etude pédologique. Ed Presses Universitaire de France. 339 p.

Dutil P., 1971- Contribution à l'étude des sols et des paléosols du Sahara. Thèse Doctorat. Université de Strasbourg. 345p

DSA-2013- Statistiques de la Direction des services agricoles de la wilaya de Biskra.

DSA-2015- Statistiques de la Direction des services agricoles de la wilaya de Biskra.

DPSB (direction de programmation et suivi du budget de la wilaya de Biskra) ,2011- Monographie de la W. de Biskra-2011.Ed DPSB. P 205.

El Fekih M et Pouget M., 1966- Les sols des oasis anciennes du sud tunisien. Conférence sur les sols méditerranéen, Madrid 12-17 septembre 1966. Collection de Référence. Ed O.R.S.T.O.M. 10p.

El hammoumi N, Sinan M, Lekhlif B et El mahjoub L., 2012-Evaluation de la qualité des eaux souterraines pour utilisation dans l'eau potable et l'agriculture : plaine de Tadla, Maroc. Ed Afrique Science N) 08 volume01 pp 54-66.

Fabre J., 2005- Géologie du Sahara occidental et central. Edition Musée royal de l'Afrique Centrale, Tervuren, Belgique.610p.

FAO., 1988- La qualité de l'eau en agriculture. Bulletin FAO d'irrigation et drainage n°29, 180 p.

FAO., 1990- Management of gypsiferous soils. *Soils Bulletin* 62, 81 p.

Fritz B., 1976- Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. Thèse Doctorat université Louis Pasteur de Strasbourg institut de géologie. France 152p.

INRA., 2015 : Changer les modes de production, d'échange et de consommation des produits alimentaires. Site internet INRA ;

Guinochet M., 1973-phytosociologie. Ed. Masson et Cie éditeurs.227p

Guiraud R., 1990. Evolution post-triasique de l'avant pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Pub. ONG, Alger ; 259

Guiraud R., 1973- Evolution post- Triasique de l'Avant pays de la chaîne alpine en Algérie d'après l'étude du bassin du Hodna et des régions voisines. Thèse Sci. Univ. Nice, 270 p, 114 fig., 12 pl. h.t.

Guiraud R., 1975-Notice explicative de la carte géologique u 1/50 000 El Kantara (259), service géologique de l'Algérie, Alger. Ed. Société nationale d'édition et de diffusion. Zirout Youcef – Alger. 19p.

Guiraud R. et Bellion Y., 1995. Late Carboniferous to recent geodynamic evolution of the West Gondwaniancratonic Thethyan margins. In : NAIRN, A., DEECOUR, J. & VRIELYNCK, B. (eds) the Ocean Basins and Margins, Vol. 8, The Tethys Ocean, Plenum, New York, 101-124.

Hachicha, 2007- Les sols salés et leur mise en valeur en Tunisie. Ed Sécheresse N°18 V1.pp45-50.

Halitim A., 1984- Contribution à l'étude des sols des zones arides (Hautes plaines steppiques de l'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. *Thèse doctorat.* univ Renne, 384 p.

Halitim A, 1988-Sols des Régions arides d'Algérie. Ed. OPU. 384 p.

Halitim A., 2008. L'Aridoculture : contraintes, impacts et perspectives. Colloque international sur l'aridoculture- optimisation des productions agricoles et développement durable. Biskra, C.R.S.T.R.A, 13-14 Décembre 2008. Communication N° 2.

Halitim A.,2015- communication orale sur le sol.

Hadj-youcef H T, 2009-Contribution à l'étude de la tolérance à la sécheresse de quelques variétés d'orge(*Hordeum vulgare L.*) et de Blé dur (*Triticum durum Desf.*) en évaluant leur capacité mycorhizogène sur des sols de la région humide du nord et de la région semi-aride de la plaine intérieure de l'Algérie. 3^{ème} meeting international sur l'aridoculture et les cultures Oasiennes (Djerba 15-17 décembre 2009).

Hamel A. 2009- hydrogéologie des systèmes aquifères en pays montagneux à climat semi - aride. Cas de la vallée d'oued el Abiod (Aurès). Mém. Magister. Université de Constantine. 179p.

Hartani T., Douaoui A et Kuper M- 2009. Economie d'eau en systèmes irrigués au Maghreb. Actes du Quatrième atelier régional du projet Sirma, Mostaganem, Algérie, 26-28 Mai 2008. Cirad, Montpellier, France, Colloque-cédérom.

Haouchine A, Boudoukha A, Haouchine F Z et Nedjaï R., 2010-Cartographie de la recharge potentielle des aquifères en zone aride. cas de la plaine d'El Outaya, Biskra – Algérie. Ed Eurojournals N° 45, V° 4 pp 1-13.

Haouchine A-non daté-Hydrogéologie en zone semi-aride et aride :région de Biskra. Thèse doctorat. Université de Houari Boumedién. Alger. 155p.

Job J O, 1992- les sols salés de l'Oasis d'El-Guettar (Sud Tunisien). Thèse Doctorat. Université Montpellier II. 151P.

Kadik B-2010 : La sécheresse et ses conséquences sur les écosystèmes steppiques et forestières en Algérie. Atelier international sur le risque sécheresse, Biskra 21-22 novembre 2010. rev la sécheresse : analyse et stratégie d'adaptation.

Kaouritchev I-1980- Manuel pratique de Pédologie .Ed MIR-Moscou. 278p.

Khadraoui A., 2007. Eau et impact environnemental dans le Sahara Algérien : Définition-Evaluation et perspectives de développement. 299. P

Khemgani M A, 2010- Caractérisation des sols alluviaux et de la nappe alluviale de l'oasis de Guerrara. Mémoire magister. Université d'Ouargla.107p.

Krimil F, 2009- Essai de modélisation de la gestion du barrage de Foug el Gherza (w. de Biskra).Mémoire Magister. Université de Batna. 118p.

Laffitte R. , 1939- Etude géologique de l'Aurès. Bull. Serv. Carte géol. Algérie, 2ème sér., Stratigr. Descript. Région. N°15, 451p.

Lahlou M, Badraoui M et Souidi B, 2000- Modélisation de l'évolution de la salinité et de l'alcalinité dans les sols irrigués. Ed. Séminaire « Intensification agricole et qualité des sols et des eaux », Rabat, 2-3 Novembre 2000.

Lahlou M, Badraoui M, Souidi B, Goumari A et Tessier D 2000- Modélisation de l'impact de l'irrigation sur le devenir salin et sodique des sols. Ed. Actes de l'atelier du PCSI, Montpellier, France, 28-29 mai 2002. Serge Marlet et Pierre Ruelle (éditeurs scientifiques), 2002. Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation. CEMAGREF, CIRAD, IRD, Cédérom du CIRAD.

LENNTECH (2008) - Le SAR et l'irrigation.
<http://www.lenntech.com/fran%E7ais/irrigation/SAR-risque-pour-eau-irrigation.htm>

Lezzar., 1980. Etude agropédologique de la plaine d'El-Outaya. Echelle 1/100.000

Mamou A., 1995 - Incidence de l'exploitation des nappes du sud tunisien, dans les oasis, sur la qualité chimique de leurs eaux. Sols de Tunisie. Bulletin de la Direction des Sols 16 : 30-43.

Marlet S-2004 : évolution des systèmes d'irrigation et gestion de la salinité des terres irriguées. rev H.T.E N° 130 Septembre/Décembre 2004

Marlet S, Bouksila F, Mekki I, et benaissa I., 2007-Fonctionnement et salinité de la nappe de l'oasis de Fatnassa : arguments géochimiques. Economie d'eau en systèmes irrigués au Maghreb. Actes du troisième atelier régional du projet sirma, Nabeul, Tunisie. Cirad, Montpellier, France, colloques-cédérom. M Kupper et Zaïri A(éditeurs scientifiques).

Masmoudi F ., 2013- zab mostalah wa dallalat. Edition direction de la culture de biskra et union des écrivains algériens –biskra. 80p.

Mathieu C. et Pieltain F., 2003. Analyses chimiques des sols, méthodes choisies. Ed Tec et Doc, Paris. 387p.

Messak M R, 2016- la compétitivité et cout de production des dattes variété Deglet-Nour. Communication Orale. SIDAB (salon International des dattes de Biskra-2016).

Messameh A H, Laborde J.P et Benmebarek S-2009 - Modélisation géostatistique de la salinité des eaux souterraine : Cas de la nappe des Sables de Biskra. éd Courrier de savoir N°09, mars 2009, pp 49-56.

Mimeche L., 1998- Evaluation et cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la région de Biskra. Mém. Magister. Université de Batna.

Monographie de la W. de Biskra-2011

Mostephaoui T., 2015- Les sols gypseux : localisation et relation avec le milieu physique. Université de Batna.240p.

Murray RS et Grant CD., 2007- The impact of irrigation on soil structure. Ed the National Program for Sustainable Irrigation (Land & Water Australia). 33 p.

Noix, 1890.Géographie militaire - livre vi - Algérie et Tunisie par le colonel niox - 2eme edition.htm.

Omouri O., 2009-Contribution à l'étude de la réhabilitation au laboratoire des sols salsodiques des palmeraies de la région d'In Salah par l'utilisation du phosphogypse.Mém.Mag.ENSA.Alger.61p.

Omrani., 2002- Gestion de la salinité : Oasis Fatnassa, rapport projet de fin d'étude INAT.

O.R.G.M., 1998-Livret des substances utiles non métalliques de l'Algérie wilaya de Biskra 07. Edition du service géologique de l'Algérie. Boumerdès.34p

Parkhurst D L et Appelo C A J, 2013-Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3- A Computer Program for Speciation, Batch- Reaction, one Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497 p.

Phocaides A., 2008- Manuel des techniques d'irrigation sous pression.2^{eme} Ed. FAO, Rome, 308p.

Pouget M., 1980- Les relations sol- végétation dans les steppes sud Algéroises. Travaux et documents de l'ORSTOM. N° 116. Paris, 555p.

POUGET M., 1968 -Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le Sud Tunisien. Cah. ORSTOM. Sér. Pédol. 6 : 309-365.

Proust, k. (2003). Ignoring the signals : irrigation salinity in new south wales, australia. Irrigation and drainage, 49(october 2002), 39–49.

Qadir M., Noble A. D., Schubert S., Thomas R. J. and Arslan A -2006-. Sodicity-induced land degradation and its sustainable management: problems and prospects .Ed Land Degrad. Develop. 17: 661–676.

Quirk J.P et Schofield R.K.1955- the effect of electrolyte concentration of soil permeability. Ed-journal of Soil Science, Vol; 6, N°.2.pp163-178.

Razi S et Halitim A., 2008-Influence du gypse sur la dynamique du phosphore et cinétique de l'absorption par le ray-Grass.). Actes; colloque Internationa sur l'Aridoculture. Optimisation des productions agricoles et développement durable. Tome 1: communications orales. pp 145-161.

Rechachi M.Z., 2010 -Impact des eaux d'irrigation sur la salinisation des sols ; cas de la plaine d'El-Outaya. Mémoire Magister. Université de Biskra. 81p.

Rechachi M Z, Chebbah M et Abdelhafid Y., 2016- évaluation et modélisation géochimiques de la qualité des eaux souterraines utilisées pour l'irrigation des terres agricoles dans une zone aride : cas de la région de sidi okba. Ed-Courrier du savoir N°21pp23-32.

Remini B., 2001- Les fuites d'eau dans le barrage de Foum-el-Gherza (Algérie), l'Eau, l'Industrie les Nuisances, n°6.

Richard A -2010 -Modélisation simplifiée de la redistribution de l'eau sur un versant au Bénin Sensibilité aux caractéristiques du sol et à la végétation. Master 2-Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement - 2009 - 2010 .

Rieu M et Cheverry Cl, 1976- Mise en point bibliographique sur quelques recherches récentes en matière des sols salés. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XIV, no 1,1976 : 39-61.

Rimmer D.L., Kirk G.J.D et Bourrié G-2013-land mark Papers: N°2. Quirk J.P et G.Y Schofield R.K.1955- the effect of electrolyte concentration of soil permeability. Ed-journal of

Soil Science, Vol; 6, N°.2.pp163-178. Commentary on the impact of Quirk et Schofield (1955).

Roederer, 1964-note sur les sols halomorphes. Ed. ORSTOM. 21p

Samouëlian A ; Cornu S ; Bruand A et Richard G, 2007-Modélisation de l'évolution des sols liée à des processus hydrologiques et géochimiques. Ed- Etude et Gestion des Sols ; volume14, 3,2007.pp 195-204.

SARI A., 2002- Initiation à l'hydrologie de surface. Cours, Alger, Ed. Houma, 224 p.

Sedrati N., 2011-Origines et caractéristiques physico-chimiques des eaux de la wilaya de biskra-sud est algerien. Thèse Doctorat. Université de Annaba.252p.

Seltzer P. ,1946. - Le climat de l'Algérie. 1 vol., 219 p. Carbonel Alger

Servant J. et Servat M., 1966-Introduction à l'étude des sols salés littoraux du Languedoc-Roussillon. Ann. Argon. N° 17(1) pp. 53-73.

Servant J., 1978- La salinité dans le sol et les eaux. Caractérisation et problèmes d'irrigation-drainage. Bull. BRGM(2),III,2.

Servant J., 1975- Contribution à l'étude pédologique des terrains halomorphes. L'exemple des sols salés du sud et du sud-ouest de la France. Thèse doctorat d'Etat, Montpellier. 194 p.

SDAT., 2012- Schéma directeur d'aménagement touristique de la wilaya de Biskra. Diagnostic prospectif, URBACO. 153p.

Schoeller H, 1962-Les eaux souterraines: Géochimie, eaux du gypse et des terrains salifères Masson et Cie édition Paris IV, 362 pages.

Simler R, 2013- Manuel pour DIAGRAMMES- Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. 40p.

Shabbir AS, Mahmoud AF, Faisal KT., 2013- Developments in soil salinity assessment and reclamation. Innovative thinking and use of marginal soil and water resources in irrigated agriculture. Ed Springer and environment agency-abuDhabi.827 p

Soutter M, Mermoud A Et Musy A., 2007- Ingénierie des eaux et du sol, processus et aménagement. 1^{ère} édit, science et technologie de l'environnement. 294p.

Soltner D., 1982- les bases de la production végétale ; Tome 1 Le sol. 11^e Ed. Collection Sciences et Techniques Agricoles.456p.

Snoussi S. A et Halitim. A., 1998 - Valorisation des eaux salines pour la nutrition minérale des plantes cultivées. Etude et gestion des sols, 4, p: 289-298.

Stroganova MN, Myagkova AD, Prokofeva TV., 1997. The role of soils in urban ecosystems. Eurasian Soil Sci;30:82–6.

Szabolcs I., 1994- Prospects of soil salinity for the 21st Century. Acapulco Mexique: Trans 15th World Congress of Soil Science, 1994; vol.1: 123-41.

Tellah S., 2005- étude du comportement de 19 géotypes d'orge (*Hordeum vulgare* L) dans les conditions de la Mitidja. Rev. Céréaliculture N°45.p12.

Tessier D, Bruand A, Le Bissonnais Y et Dambrine E- qualité chimique et physique des sols : variabilité spatiale et évolution. Ed étude et gestion des sols, 3,4 pp229-244. Numéro spéciale.

Toumi A et Remini B, 2004- barrage de foug el gherza face au problème de fuites d'eau. Larhyss journal n° 03, juin 2004, pp.25-38.

Toutain G., 1977.Eléments d'Agronomie Saharienne .De la Recherche au Développement. Cellule des Zones Arides. p : 120-121.271p.

Toutain G., 1977.conservation des sols en palmeraies sahariennes et bordurières au Sahara. Ed CIHEAM-options Mediterraneennes N° 25. pp65-69.

Valles V, valles A M et Dosso M., 1983 -Irrigation des sols salés et dose de lessivage. Cah O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., vol. XX, n°2. Pp119-127. Groupement d'Intérêt Scientifique Sol.

VanBeek C.G.E.M and Van Breemen N., 1973- The alkalinity of alkali soils. J Soil.Sci., 24, 1,129-136.

U.S. Salinity Laboratory Staff-1954- Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S.D.A. L. A. Richards, Editor Handbook n°60, 160p.

Zekiri A., 2016-Biskra Histoire et sites archéologiques. Edition Benzid Ali-Biskra –Algérie. 88 p.

Zerdoum A., 2003- Biskra reine des Ziban/ Histoire de Biskra ancienne, collection. Ed ElManar. Biskra (Algérie).

Zogari-elwedi B, Issami w et Sanaa M., 2016- Approche méthodologique de l'étude de la fertilité des sols des oasis tunisiennes de la région du Djérid. Ed étude et gestion des sols, Volume 23, pages 163 à 171.

Annexe N°1 : Degré d'alcalinisation selon Servant et Servat (1966).

S.A.R et degré d'alcalinisation d'après Servant et Servat (1966).

S.A.R	Degré d'alcalinisation
< 4	Pas d'alcalinisation
4 - 8	Faible alcalinisation
8 - 12	Alcalinisation moyenne
12 - 18	Alcalinisation forte
> 18	Alcalinisation intense

Annexe 02


Tableau 02 : classement des sols irrigables adapté aux sols sahariens (selon Dubost, 2002)

classe	profondeur	drainage	salinité	texture
classe I	+ de 1 m	naturel	nulle à faible	sable limoneux
classe II	0.8 à 1 m	nécessaire et facile	faible	sable limoneux
classe III	0.5 à 0.8 m	nécessaire et facile	faible à forte	sable
classe IV	- de 0.5 m	nécessaire et facile	moyenne à forte	sable limoneux
classe V	+ de 1 m	nécessaire et difficile	faible à moyenne	sable limoneux
classe VI	+ de 1 m	impossible	forte	limon sableux

Ce tableau est inspiré de la classification proposée par Durant (1983), où (selon Dubost, 2002) les classes IV, V et VI sont à rejeter quand l'alternative est possible.

Annexes 033

Quelques définitions :

 **Définition C.P.C.S. (1970) des sols MINERAUX BRUTS**

Sols à dégradation physique superficielle, à très faible altération chimique et presque entièrement dépourvu de matière organique

✚ Définition C.P.C.S. (1970) des sols PEU EVOLUES

Sols à profil AC formé sur roche silicatée et dépourvu d'horizon (B) d'altération. Ce sont des sols à faible différenciation verticale en horizons. Ils contiennent plus que de traces de matière organiques dans les 20 cm premiers centimètres et /ou plus de 1 à 1,5% de matière organique sur plus de 2 à 3 cm. Le matériau est fragmenté. La matière minérale n'a pas subi d'altération sensible. Les sels minéraux peuvent avoir subi des redistributions et des migrations.

✚ Définition C.P.C.S. (1970) des sols HALOMORPHES

- **à structure non dégradée**

- **Sols salins modaux**

Ce sont des sols riches en sels solubles ou la conductivité électrique de l'extrait de la pate saturée(Ceps) varie entre 8 et 20 mmhos/cm, mais leur complexe adsorbant n'est encore que faiblement enrichi en sodium (ESP est inférieur à 15%).

- **à structure dégradée**

- **Sols salins à alcalins à structure massive et diffuse en surface**

Ces sols sont caractérisés par l'enrichissement de leur complexe adsorbant en sodium échangeable.

- **Sols halomorphes à structure dégradée hydromorphe**

La présence d'un caractère d'hydromorphie bien visible sous forme de taches gris bleu (Gley) lié à un engorgement relativement prolongé des eaux des crues.

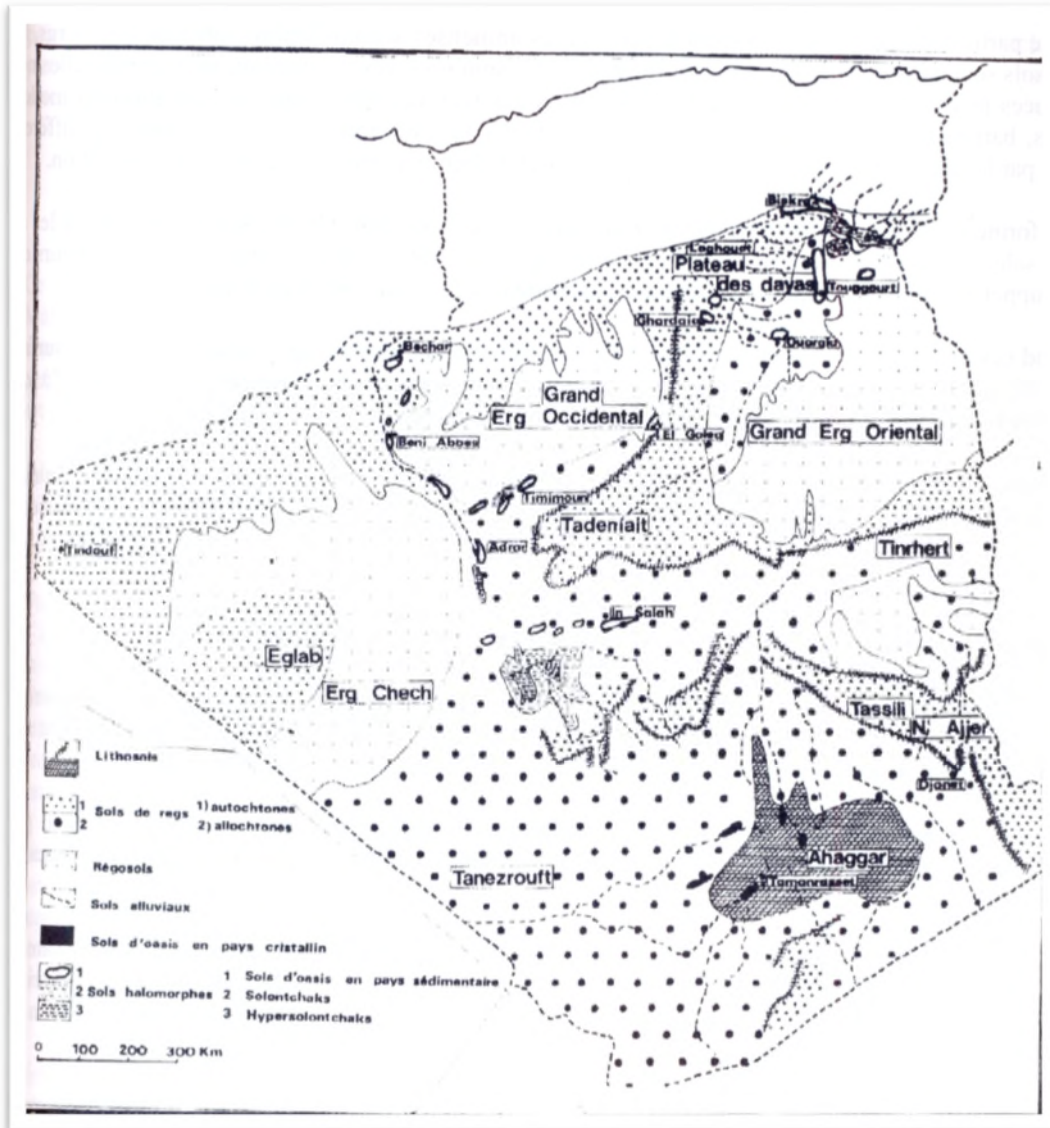


Fig.01 : Carte pédologique simplifiée.(Dubost, 2002).

**Planches photographiques avec différents
pédopaysages**

I-Planche photographique de Sidi Okba (Zab Chergui).



<p>Photo 1.</p> <p>Réseau principale de l'irrigation (vanne)(Tajdid ou Maleh).</p>	<p>Photo 2.</p> <p>bassin d'accumulation de eaux d'irrigation de capacité 60m³.(Tajdid ou Maleh).</p>	<p>Photo 3.</p> <p>Forage utilisé en irrigation. (Tajdid ou Maleh).</p>
<p>Photo 4.</p> <p>Culture intercalaire en céréale (orge principalement) dans les palmeraies de SO. (Tajdid ou Maleh)</p>	<p>Photo 5.</p> <p>Différent profil du sol entre feidg elghareg (à droite) safel tajdid (à gauche).</p>	<p>Photo 6.</p> <p>forage délaissé. (Tajdid ou Maleh)</p>
<p>Photo 7.</p> <p><i>Aizoon hispanicum</i> une plante halophyte indicatrice des sols salés (Safel tajdid)</p>	<p>Photo 8.</p> <p>en plus du palmier dattier, d'autres vocation sont cultivées (serriculture et céréales). Safel-Tajdid</p>	<p>Photo 9.</p> <p>Alimentation des moutons sur l' Atriplex, une halophyte (Tajdid ou Maleh)</p>
<p>Photo 10.</p> <p>préparation de la raie (seguaia) d'irrigation et buttage du palmier par le sol</p>	<p>Photo 11.</p> <p>contact direct sur terrain avec les fellahs de SO à travers des enquêtes et impact socioéconomique.</p>	<p>Photo 12.</p> <p>investigation sur terrain. Safel-Tajdid</p>

II-Planche photographique de la région de Bordj Ben Azouz(Zab Gharbi)



<p>Photo 1. ferme Paul ozval avec ses pieds du palmiers dattiers datés de 1923.</p>	<p>Photo 2. regeneration des anciens palmiers par des jeunes djebbars</p>	<p>Photo 3. incéniration des trons (stippes) des palmiers mortes</p>
<p>Photo 4. couche blanche saline à l'intérieur de palmeraie</p>	<p>Photo 5. alignement des palmiers dattier de 10 m de distance avec un espace intercalaire exploité comme piste utilisé surtout lors de la récolte.</p>	<p>Photo 6. profil du sol à texture sablo-limoneuse avec des mottes de debdeb après être briser.</p>
<p>Photo 7. canal du réseau du drainage « naz », la terre est bakhbakha conduit vers Ezarga comme terminus</p>	<p>Photo 8. puits d'irrigation envahis par les plantes halophytes et hydromorphe.</p>	<p>Photo 9. puits d'irrigation bien entretenu</p>
<p>Photo 10. sol tapissé par le sel et une halophyte <i>Salicornia fruticosa</i> (chénopodiacées) près de lac Ezarga.</p>	<p>Photo 11. pédopaysage d'un sol salé riche en plante halophytes</p>	<p>Photo 12. valorisation des déchets du palmier sous un produit fini chaise traditionnelle par le reste des palmes</p>

III- Planche photographique de la plaine d'El-Outaya.



<p>Photo 1. sol cultivé en céréale en irrigué (orge principalement) dans la plaine d'El-Outaya.</p> <p>stade semis-germination 1ere feuille.</p>	<p>Photo 2. sol cultivé en céréale en irrigué(orge principalement) dans la plaine d'El-Outaya.</p> <p>stade tallage montaison.</p>	<p>Photo 3. bassin traditionnel sans bache d'accumulation des eaux d'irrigation.</p>
<p>Photo 4. Profil caractéristique de la plaine d'El-Outaya. situé dans EL Mazouchia</p>	<p>Photo 5. Sol d'une exploitation 1 dans la plaine d'el-outaya délaissé non cultivé avec élevages des bovins.</p>	<p>Photo 6. Chateau d'eau d'un forage de la nappe Miopliocène destinés à l'irrigation agricole.</p>
<p>Photo 7. sol destiné à cultivé de l'arboriculture avec fente de retraits</p>	<p>Photo 8. sol avec vegetation naturelle avec fentes de retrait.</p>	<p>Photo 9. sol avec vegetation naturelle formant nebkha; pièges où le sable est piégé par des touffes de végétation clairsemée sont bien représentées surtout dans la partie ouest de la plaine.</p>