وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY UNIVRSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA

جامعة باجي مختار- عنا

Année : 2014

Faculté des Sciences de la Terre Département de Géologie



Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat es-sciences

Option: Hydrogéologie

CONTRIBUTION A L'ETUDE HYDROCHIMIQUE DU SOUS BASSIN VERSANT DU LAC FETZARA (NORD-EST ALGERIEN). APPROCHE GEOCHIMIQUE ET FONCTIONNEMENT DES SOLS ET DES EAUX.

Par ZAHI Faouzi

(Ingénieur d'Etat en Hydrogéologie. Magister en Hydrogéologie)

Devant le jury:

Président :	DJABRI Larbi	Pr. Université de Annaba
Directeur de thèse :	DJAMAI Rachid	Pr. Université de Annaba
Co-Directeur de thès	e : CHAAB Salah	M.C. Université de Annaba
Examinateurs :	ALAYAT Hacene	M.C. Université d'El Tarf
	DEBIECHE Taha Houcine	M.C. Université de Jijel
	KACHI Slimane	M.C. Université de Guelma

A mes chers parents A ma femme et mon fils Firas A mon frère et mes sœurs A toute ma famille

REMERCIEMENTS

Au terme de ce modeste travail, je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance au Professeur DJAMAI Rachid de l'université de Annaba, d'avoir accepté d'encadrer et diriger cette étude, pour ses nombreux conseils, sa précieuse aide qu'il m'a apporté au laboratoire lors des analyses chimiques des eaux et de sols et son soutien tout au long de mon travail.

Je tiens particulièrement à remercier, Monsieur CHAAB Salah Maître de Conférences à l'université de Annaba d'avoir accepté de codiriger cette thèse et de m'avoir prêté aide, conseils et orientations durant la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont également à tous les membres du jury, pour avoir accepté d'en faire partie et pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette thèse ;

Monsieur le Professeur DJABRI Larbi de l'université de Annaba, d'avoir accepté de présider le Jury, je lui en suis très reconnaissant.

Monsieur ALAYAT Hacene Maître de Conférences à l'université d'El Tarf, Monsieur DEBIECHE Taha Houcine Maître de Conférences à l'université de Jijel et Monsieur KACHI Slimane Maître de Conférences à l'université de Guelma, qui ont bien voulu me faire l'honneur d'examiner et juger ce travail.

Mes vifs remerciements à tous les amis qui m'ont aidé et encouragé pour réaliser ce travail et à toutes les personnes qui m'ont soutenu tout au long du travail de terrain.

Je termine par un grand remerciement à mes chers parents, à ma femme, à mon fils « *Firas* » et à toute ma famille à qui je dédie ma thèse.

Zahi Faouzi

ملخص

المساهمة في الدراسة الكيميائية لمياه حوض بحيرة فدزارة (شمال شرق الجزائر) . النهج الجيوكيميائية وأداء التربة والمياه.

تعرضت منطقة بحيرة فدزارة مند زمن طويل إلى ظاهرة الملوحة ، وهذا ما أثر سلبا على المياه السطحية والجوفية للمنطقة ، وتعتبر هذه الملوحة العامل الأساسي المؤدي إلى تدهور نوعية التربة في المنطقة.

إن الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو التعرف على الآليات المسؤولة و المحددة للتركيبة الجيوكيميائية للمياه والتربة لمنطقة فدزارة ، وكذلك تشخيص العوامل الرئيسية المؤثرة على هذه الآليات وهي العوامل الهيدرولوجية والفيزيوكيميائية والبيوجيوكيميائية والبيئية.

لهذا الغرض إعتمدنا على النتائج المتحصل عليها في رسالتنا للماجستير (2008) ، وقد أضفنا لهذه الأخيرة عدة خرجات ميدانية لأخذ عينات من المياه والتربة ، حيث أجرينا التحاليل الكيميائية و الفيزيوكيميائية على التربة والمياه السطحية لكل الروافد المغذية للبحيرة وكذلك المياه الجوفية المحيطة بها.

إن دراسة نتائج التحاليل الكيميائية والفيزيوكيميائية التي أجريناها على التربة والمياه الجوفية ، بينت وجود درجة ملوحة عالية للمياه والتربة ، حيث بلغت الناقلية الكهربائية 24.3 و20.9 ملسيمنس/سم على التوالي، وقد تم تسجيل الملوحة المرتفعة خاصة في الجنوب الشرقي (بلدية الشرفة) والشمال الشرقي لبحيرة فدزارة (بلدية وادي زياد) ، أما بالنسبة للمياه السطحية فقد تراوحت قيم الناقلية الكهربائية بين 0.162 و8.99 ملسيمنس/سم، و قد سجلنا القيم العالية عند مخرج البحيرة على مستوى القناة الرئيسية امتدادا إلى وادي مبعوجة.

إن مختلف الدراسات الإحصائية التي قمنا بها بينت أن الفائض من التمعدن يسببه وبشكل رئيسي عدة عوامل، نذكر منها إرتشاح التكوينات الجوفية وتسلل المياه السطحية المتأثرة بقوة التبخر وكذلك ظاهرة التبادل الأيوني بين مركبات الإدمصاص ومحلول التربة. الكلمات المفتاحة : بحيرة فدزارة ، الملوحة ، التمعدن ، المياه ، التربة ، الجيوكيمياء ، القلوية المتبقية.

Abstract

Contribution to the study of hydrochemical of Fetzara lake subwatershed (North-east of Algeria). Geochemical approach and functioning of soil and water.

Fetzara lake is subject to salinity phenomenon affecting either surface water or groundwater. This salinity is usually considered responsible for the degradation of soil quality in the studied region.

The aim of this study is to identify process determining the geochemical composition of soil and water. It is also to characterize the main factors influencing on these processes namely, hydrological factors, physico-chemical, biogeochemical and environmental.

We have been based on obtained results during our magister theses (2008), to which we added some sampling campaigns of water and soil. The analyses are related to soils, surface water of all effluents feeding the lake and surrounding groundwater.

Results of soil and groundwater analyses show that salinity is excessively high. Electrical conductivity for soil and groundwater reached 24.3 mS/cm and 20.9 mS/cm respectively. This high salinity is recorded particularly in Cheurfa and Oued Zied regions. Surface water conductivity values range from 0.162 and 8.99 mS/cm, where most important are located at the outlet of the lake, the main channel and its extension Wadi Meboudja.

The statistical approach (CPA, features reports) shows that the strong mineralization of water and sols appears to be controlled mainly by leaching of subsurface formations, surface waters infiltration; those are strongly influenced by evaporation and ion exchange phenomena between the adsorption complex and soil solutions.

Keywords: Fetzara lake, salinity, mineralization, water, soil, geochemistry, residual alkalinity.

Résumé

Contribution à l'étude hydrochimique du sous bassin versant du lac Fetzara (Nord-Est Algérien). Approche géochimique et fonctionnement des sols et des eaux.

La région du lac Fetzara est soumise depuis longtemps à un phénomène de salinisation affectant les eaux de surface et souterraines. Cette salinisation est habituellement jugée responsable de la dégradation de la qualité des sols de la région.

L'objectif de cette étude est d'essayer d'identifier les processus responsables déterminant la composition géochimique des eaux et des sols. Il est également de question de caractériser les principaux facteurs influençant ces processus à savoir, les facteurs hydrologiques, physico-chimiques, biogéochimiques et environnementaux.

Nous nous sommes basés sur les résultats obtenus en notre mémoire de magister (2008), aux quels, nous avons rajouté des campagnes d'échantillonnage d'eaux et de sols. Les analyses effectuées se rapportent aux sols, eaux de surface de tous les affluents alimentant le lac et eaux souterraines des nappes qui l'entourent.

Les résultats d'analyses effectuées sur les sols et les eaux souterraines, montrent que la salinité des eaux et des sols est excessivement élevée. La conductivité électrique pour les sols et les eaux souterraines atteint respectivement des valeurs de 24.3 mS/cm et 20.9 mS/cm, cette salinité élevée est enregistrée notamment dans les régions de Cheurfa et Oued Zied. Quant aux eaux de surface, les valeurs de la conductivité oscillent entre 0.162 et 8.99 mS/cm, dont les plus importantes se situent au niveau de l'exutoire du lac, le canal principal et son prolongement l'oued Meboudja.

L'approche statistique (ACP, rapports caractéristiques) montre que la forte minéralisation des eaux et des sols semble être contrôlée essentiellement par le lessivage des terrains traversés, l'infiltration des eaux de surface qui sont fortement influencées par la forte évaporation en période estivale, ainsi que les phénomènes d'échange ioniques entre le complexe adsorbant et les solutions de sols.

Mots clés : lac Fetzara, salinité, minéralisation, eau, sol, géochimie, alcalinité résiduelle.

Table de matières

- Remerciement
- ملخص •
- Abstract
- Résume
- Table de matières
- Liste des Tableaux
- Liste des Figures

Page

Chapitre I : Cadre Géomorphologique

Chaptere 1 : Caure Geomorphologique
gie
a
gnes
J'Annaba
yétal
gie

Chapitre II : Aperçu Géologique

1. Introduction	11
2. Massif de l'Edough	12
3. Description lithologique	13
3.1. Les Gneiss.	14
3.2. Les micaschistes	14
3.3. Les roches métabasiques	15
3.4. La couverture sédimentaire	15
3.5. Le magmatisme tertiaire	16
4. Tectonique et structure du massif de l'Edough	16
4.1. Déformations synmétamorphiques	16
4.2. Déformations tardives	16
5. Minéralisation du massif de l'Edough	17
6. Plaines littorales	17
7. Conclusion	19

Chapitre III : Hydroclimatologie

A. Climatologie

1. Introduction	20
2. Stations de mesure	20
3. Facteurs climatiques	20
3.1. Précipitations.	20

	• •
3.1.1. Précipitations moyennes mensuelles	20
3.1.2. Coefficient pluviométrique (<i>H</i>)	21
3.1.3. Répartition saisonnière des précipitations	24
3.2. La température	26
3.3. L'humidité	26
3.4. Le vent	27
3.5. Type de climat	27
4. Bilan hydrique	27
4.1. Evapotranspiration	29
4.1.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)	29
4.1.1.1. Formule de Serra	29
4.1.1.2. Formule de C.W. Thornthwaite	30
4.1.2. Evapotranspiration réelle (ETR)	30
4.1.2.1. Formule de Coutagne	30
4.1.2.2. Formule de Turc.	31
4.2. Ruissellement	31
4.3. Infiltration	32
5. Bilan hydrique selon la formule de C.W Thornthwaite	32
5.1. Interprétation du bilan de Thornthwaite	34
6. Conclusion	36

B. Hydrologie

37
37
39
39
40
41
41
41
43
43

Chapitre IV : Hydrogéologie

1. Introduction	44
2. Description des différents aquifères	44
2.1. Les nappes superficielles	44
2.1.1. La nappe des gneiss altérés	44
2.1.2. La nappe des alluvions	44
2.2. Les nappes profondes	46
2.2.1. La nappe des cipolins	46
2.2.2. La nappe des graviers	46
3. Caractéristiques de la nappe superficielle entourant le lac	47
3.1. Inventaire des points d'eau	47
3.2. Interprétation des cartes piézométriques	48
3.3. Fluctuations du niveau piézométrique entre janvier 2007 et mai 2007	53

3.4. Gradient hydraulique	55
4. Relations piézométrie, précipitations et recharge	55
5. Conclusion	58

Chapitre V : Géochimie des sols et des eaux de la région du lac Fetzara

59
59
60
60
60
61
61
62

A. Pédologie

1. Introduction	64
2. Différentes classes de sols	64
2.1. Les sols peu évolués (SPE)	64
2.2. Les sols vertisols (SV)	65
2.3. Les sols hydromorphes (SH)	65
2.4. Les sols halomorphes (SHA)	65
3. Matériels et méthodes	66
3.1. Echantillonnage des sols	66
3.3. Méthodes d'analyses au laboratoire	66
3.3.1 Bilan de salure	67
3.3.2. Propriétés physico-chimiques des sols	67
4. Résultats et discussion	68
4.1. Les caractéristiques physiques des sols	68
4.1.1 La granulométrie	68
4.1.2. La densité et la porosité totale	69
4.1.2.1. La densité apparente (Da)	71
4.1.2.2. La densité réelle (Dr)	71
4.1.2. La porosité totale (P%)	72
4.1.3. La perméabilité	73
4.2. Les caractéristiques physico-chimiques des sols	73
4.2.1. Caractère acide ou alcalin du sol	73
4.2.2. Le carbone et la matière organique des sols	75
4.2.2.1. Le carbone organique (% C)	76
4.2.2.2. La matière organique (% MO)	76
4.2.3. Le calcaire total (CaCO ₃)	77
4.2.4. L'humidité (%).	78
4.2.5. Etude de la salinité des sols	79
4.2.5.1. La conductivité électrique (CE)	79
4.2.5.2. Les sels solubles	80
4.3. Faciès chimique des solutions de sols	84

5. Etude statistique des données chimiques des solutions de sols	86
5.1. Analyses en composantes principales (ACP)	86
5.2. Matrice des corrélations	87
5.3. Etude des variables et des individus	87
6. Salinité et sodicité des sols	90
6.1. Classification des sols salins	91
6.2. Les sols du lac Fetzara	92
6.3. Influence de la salinité sur les propriétés physiques des sols	92
6.4. Influence de l'eau salée sur les sols	93
6.4.1. Effet de l'eau salée sur les caractéristiques physiques de sols	93
6.4.2. Effet de l'eau salée sur les caractéristiques chimiques et physico-chimiques de	
sols	93
7. Conclusion	94

B. Hydrogéochimie

D. Hydrogeochinne	
1. Introduction	95
2. Echantillonnage et analyse hydrochimique	95
3. Caractérisation physico-chimique des eaux	97
3.1. Détermination des principaux faciès hydrochimiques	97
3.1.1. Formule ionique	97
3.1.2. Digramme de Piper	98
3.1.2.1. Eaux souterraines	99
3.1.2.2. Eaux de surface	100
4. Evolution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques	102
4.1. Eaux souterraines	102
4.1.1. Température (T °C)	103
4.1.2. Potentiel hydrogène (pH)	103
4.1.3. Potentiel d'oxydo-réduction (Eh)	104
4.1.4. Cartes des conductivités électriques (CE en μS/cm)	105
4.1.5. Cartes du calcium (Ca ²⁺ en mg/l)	107
4.1.6. Cartes du magnésium (Mg ²⁺ en mg/l)	108
4.1.7. Cartes du sodium (Na ⁺ en mg/l)	110
4.1.8. Cartes du potassium (K ⁺ en mg/l)	111
4.1.9. Cartes des chlorures (Cl ⁻ en mg/l)	112
4.1.10. Cartes des sulfates (SO ₄ ²⁻ en mg/l)	114
4.1.11. Cartes des bicarbonates (HCO ₃ ⁻ en mg/l)	115
4.2. Eaux de surface	116
4.2.1. Température (T°C)	117
4.2.2. Conductivité électrique (CE μS/cm)	118
4.2.3. Potentiel hydrogène (pH)	118
4.2.4. Potentiel d'oxydo-réduction (Eh)	119
4.2.5. Teneurs en calcium	120
4.2.6. Teneurs en magnésium	120
4.2.7. Teneurs en sodium	121
4.2.8. Teneurs en potassium	121
4.2.9. Teneurs en chlorures	122
4.2.10. Teneurs en bicarbonates	123

4.2.11. Teneurs en sulfates	124			
5. Analyse en composantes principales (ACP)	124			
5.1. Eaux souterraines	125			
5.1.1.1 ^{ère} Campagne (février 2009)	125			
5.1.2. 2 ^{ème} Campagne (novembre 2009)	127			
5.2. Eaux de surface	130			
5.2.1. 1 ^{ère} Campagne (février 2009)	130			
5.2.2. 2 ^{ème} Campagne (novembre 2009)	132			
6. Rapports caractéristiques	135			
6.1. Relations entre chlorures et éléments majeurs	135			
6.2. Origine du calcium.	138			
6.3. Echanges de bases	140			
6.4. Relation conductivité électrique-cations (Na ⁺ , Ca ²⁺ et Mg ²⁺)	142			
6.5. Relation conductivité électrique - anions (HCO_3^- , Cl^- et SO_4^{-2-})	143			
6.6. Relation $(HCO_3^{-7}/Cl^{-} + SO_4^{-2})$ - Conductivité électrique	143			
7. Qualité des eaux	145			
7.1. Dureté ou Titre Hydrotimétrique (TH)	145			
7.2. Aptitude des eaux à l'irrigation	146			
7.2.1. Risque de sodicité et de salinité	146			
7.2.2. Diagramme de Richards	147			
8. Conclusion	151			
Conclusion Générale	152			
Références Bibliographiques				
Annexes				

Liste des tableaux

Titre

N°

Page

Chapitre III : Hydroclimatologie

Tab.1 Tab.2	:	Coordonnées géographiques des stations météorologiques Précipitations movements monsuelles des stations Les Salines Pont	20
1 a.2	•	Bouchet, Ain Berda (1975-2010) et Berrahal (1981-2006)	21
Tab.3	:	Coefficient pluviométrique des stations : Les Salines, Pont Bouchet, Ain	
— • •		Berda et Berrahal.	23
Tab.4	:	Repartition saisonnieres des precipitations des stations Les Salines, Pont Bouchet Ain Berda (1975-2010) et Berrahal (1981-2006)	25
Tab.5	:	Températures movennes mensuelles à la station Les Salines (1975-2010)	26
Tab.6	:	Humidité relative moyenne mensuelle à la station Les Salines (1975 -	
		2006)	26
Tab.7	:	Vitesse moyenne mensuelle des vents à la station Les Salines $(1975 - 2006)$.	27
Tab.8	:	Résultats de l'ETP selon la formule de Serra	29
Tab.9	:	Résultats de l'ETP selon la formule de C.W Thornthwaite	30
Tab.10	:	Résultats de l'ETR d'après la formule de Coutagne	31
Tab.11	:	Résultats de l'évapotranspiration réelle (en mm) d'après la formule de Turc.	31
Tab.12	:	Résultats du ruissellement selon la formule de Tixeron-Berkaloff modifiée	
T-1 12	_	par Romantchouk	32
1 ad.15 Tab. 14	:	· Bilan hydrique d'après la formule de Thornthwaite (Les Salines 1975 -	32
1 110,17	•	2010)	33
Tab.15	:	Bilan hydrique d'après la formule de Thornthwaite (Pont Bouchet 1975 -	
		2010)	33
Tab.16	:	Bilan hydrique d'après la formule de Thornthwaite (Ain Berda 1975 - 2010)	34
Tab.17	:	Bilan hydrique d'après la formule de Thornthwaite (Berrahal 1981 -	54
	-	2006)	34
Tab.18	:	Valeurs de l'évapotranspiration réelle selon les différentes méthodes	36
Tab.19	:	Quelques caractéristiques des sous bassins versants du lac Fetzara	38

Chapitre IV : Hydrogéologie

<i>Tab.20</i> : Variation du niveau piézométrique entre janvier 2007 et mai 2007	54
<i>Tab.21</i> : Gradient hydraulique de la nappe superficielle entourant le lac Fetzara	55
Tab.22 : Fluctuations de la profondeur de la surface piézométrique (décembre 2006	
– mai 2007)	56

Chapitre V : Géochimie des sols et des eaux de la région du lac Fetzara

A. Pédologie

<i>Tab.23</i>	:	Méthodes d'analyses physico-chimiques des sols.	67
<i>Tab.24</i>	:	Résultats de l'analyse granulométrique des sols de la région du lac Fetzara.	69
Tab.25	:	La densité apparente, la densité réelle et la porosité des sols.	69
<i>Tab.26</i>	:	Variation des pH des sols de la région du lac Fetzara.	74
Tab.27	:	Le carbone et la matière organique des sols de la région du lac Fetzara	75

Tab.28	:	Normes d'interprétation du taux du calcaire du sol	77
Tab.29	:	Le calcaire total et l'humidité dans les sols de la région du lac Fetzara	77
Tab.30	:	Variation de la conductivité électrique des sols (mS/cm)	79
Tab.31	:	Classification des sols en fonction de la conductivité électrique	80
Tab.32	:	Résultats des analyses chimiques des solutions de sols de la région du lac	
		Fetzara	81
Tab.33	:	Classification des solutions de sols selon la formule ionique	84
Tab.34	:	Matrice des corrélations des paramètres physico-chimiques	87
Tab.35	:	Le rapport d'adsorption de sodium et le pourcentage de sodium	
		échangeable des solutions de sols de la région du lac Fetzara	91
Tab.36	:	Classification des sols salins selon USSL (1954)	91

B. Hydrogéchimie

Tab.37	:	Classification hydrochimique des eaux selon la formule ionique	98
Tab.38	:	Variation des différents paramètres physico-chimiques des eaux	
		souterraines.	103
Tab.39	:	Variation des différents paramètres physico-chimiques des eaux de surface	117
Tab.40	:	Variance des quatre premiers axes factoriels	125
Tab.41	:	Matrice des corrélations (février 2009)	126
Tab.42	:	Variance des quatre premiers axes factoriels	128
Tab.43	:	Matrice des corrélations (novembre 2009)	128
Tab.44	:	Variance des quatre premiers axes factoriels	130
<i>Tab.45</i>	:	Matrice des corrélations (février 2009).	131
Tab.46	:	Variance des quatre premiers axes factoriels.	133
Tab.47	:	Matrice des corrélations (novembre 2009)	133
<i>Tab.48</i>	:	Classification des eaux de la région du Fetzara selon la dureté (TH en °F)	145
Tab.49	:	Résultats d'après l'interprétation des diagrammes de Richards.	147

Listes des Figures

N^o:

Titre

Chapitre I : Cadre Géomorphologique

Fig. 1 :	Carte Géomorphologique de la région du lac Fetzara	03
Fig. 2 :	Coupe sur le piémont de la bordure Sud du lac Fetzara	04
Fig. 3 :	Coupe sur le piémont de la bordure Nord du lac Fetzara	05
Fig. 4 :	Coupe du canal de drainage du lac Fetzara	07
Fig. 5 :	Carte des formations forestières de la wilaya de Annaba	10

Chapitre II : Aperçu Géologique

Fig. 6 :	Carte géologique du bassin versant du lac Fetzara	11
Fig. 7 :	Carte géologique du massif de l'Edough	12

Chapitre III : Hydroclimatologie

Fig.9 :	Précipitations moyennes mensuelles des stations : Les Salines, Pont Bouchet,	
	Ain Berda (1975 - 2010) et Berrahal (1981- 2006)	22
Fig.10:	Variations des coefficients pluviométriques pour les stations : Les Salines,	
	Pont Bouchet, Ain Berda (1975 - 2010) et Berrahal (1981 - 2006)	24
Fig.11:	Répartition saisonnières des précipitations des stations : Les Salines, Pont	
	Bouchet, Ain Berda (1975 - 2010) et Berrahal (1981 - 2006)	25
Fig.12:	Températures moyennes mensuelles à la station des Salines (1975 - 2010)	26
Fig.13:	Courbes pluviothermiques des stations Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda	
	(1975 - 2010 et Berrahal (1981 - 2006)	28
Fig.14:	Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite aux stations; Les	
-	Salines, Pont Bouchet et Ain Berda (1975 - 2010) et Berrahal (1981 - 2006)	35
Fig.15:	Bassin versant du lac Fetzara	39
Fig.16:	Courbes d'évolutions des débits au niveau des oueds ; El Hout, El Mellah,	
	Zied et Meboudja (déc 2004 - mars 2005) et (jan 2007 - mai 2007)	42

Chapitre IV : Hydrogéologie

Fig.17 :	Situation géographique des nappes superficielles de la plaine de Annaba	45
Fig.18:	Coupe schématique du système aquifère de la région de Annaba	46
Fig.19:	Carte d'inventaire des puits dans la région du lac Fetzara.	47
Fig.20:	Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (décembre 2006)	48
Fig.21:	Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (janvier 2007)	49
Fig.22:	Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (février 2007)	50
Fig.23:	Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (mars 2007)	51
Fig.24:	Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (avril 2007)	52
Fig.25:	Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (mai 2007)	52
Fig.26:	Carte des fluctuations piézométriques entre janvier 2007 et mai 2007	54
Fig.27:	Variation de la profondeur de la surface piézométrique en fonction des	
-	précipitations	56
Fig.28:	Variation du niveau piézométrique en fonction de l'infiltration efficace	57

Chapitre IV : Géochimie des sols et des eaux de la région du lac Fetzara

A. Pédologie

Fig.29:	Répartition des classes des sols du lac Fetzara	65
Fig.30:	Carte d'inventaire des points de prélèvement	66
Fig.31:	Texture des sols de la région du lac Fetzara	70
Fig.32:	Densité réelle et apparente des sols du lac Fetzara	71
Fig.33:	Variation de la densité apparente des sols du lac Fetzara	72
Fig.34:	Variation de la densité réelle des sols du lac Fetzara	72
Fig.35:	Variation de la porosité totale des sols de la région du lac Fetzara	72
Fig.36:	Variation du pH des solutions de sols de la région du lac Fetzara	75
Fig.37:	Evolution du carbone organique dans les sols du lac Fetzara	76
Fig.38:	Evolution de la matière organique dans les sols de la région du lac Fetzara	76
Fig.39:	Variation du calcaire total dans les sols de la région du lac Fetzara	78
Fig.40:	Variation de l'humidité dans les sols de la région du lac Fetzara	78
Fig.41:	Variation de la conductivité électrique	80
Fig.42:	Evolution de la concentration des cations dans les solutions de sols du lac	
-	Fetzara	82
Fig.43:	Evolution de la concentration des anions dans les solutions de sols du lac	
-	Fetzara	83
Fig.44:	Faciès chimiques des solutions de sols de la région du lac Fetzara	85
Fig.45:	Variance des quatre premiers axes factoriels	86
Fig.46:	ACP des solutions de sols de la région du lac Fetzara selon le plan F1F2	88
Fig.47:	ACP des solutions de sols de la région du lac Fetzara selon le plan F1F3	89
Fig.48:	Classification des sols de la région du lac Fetzara selon USSL 1954	92

B. Hydrogéochimie

Fig.49:	Localisation des points de prélèvements des eaux souterraines	96
Fig.50:	Localisation des points de prélèvements des eaux de surface.	96
Fig.51:	Diagramme de Piper	98
Fig.52:	Faciès des eaux souterraines selon le diagramme de Piper (février 2009)	100
Fig.53:	Faciès des eaux souterraines selon le diagramme de Piper (novembre 2009)	100
Fig.54:	Faciès des eaux de surface selon le diagramme de Piper (février 2009)	101
Fig.55:	Faciès des eaux de surface selon le diagramme de Piper (novembre 2009)	101
Fig.56:	Variation de la température des eaux souterraines (février et novembre 2009)	103
Fig.57:	Variations du pH des eaux souterraines (février et novembre 2009)	104
Fig.58:	Carte du potentiel rédox (Eh) (février 2009)	105
Fig.59:	Carte du potentiel rédox (Eh) (novembre 2009)	105
Fig.60:	Carte des conductivités électriques (février 2009)	106
Fig.61:	Carte des conductivités électriques (novembre 2009)	107
Fig.62:	Carte du calcium (février 2009)	108
Fig.63:	Carte du calcium (novembre 2009)	108
Fig.64:	Carte du magnésium (février 2009)	109
Fig.65:	Carte du magnésium (novembre 2009)	109
Fig.66:	Carte du sodium (février 2009)	110
Fig.67:	Carte du sodium (novembre 2009)	111
Fig.68:	Carte du potassium (février 2009)	111
Fig.69:	Carte du potassium (novembre 2009)	112
Fig. 70:	Carte des chlorures (février 2009)	113
Fig.71:	Carte des chlorures (novembre 2009)	113

Fig. 72:	Carte des sulfates (février 2009)	114
Fig.73:	Carte des sulfates (novembre 2009)	114
Fig. 74:	Carte des bicarbonates (février 2009)	115
Fig. 75:	Carte des bicarbonates (novembre 2009)	116
Fig. 76:	Variations de la température des eaux de surface (février et novembre 2009)	117
Fig. 77:	Variations de la conductivité électrique dans les eaux de surface (février et	
	novembre 2009)	118
Fig. 78:	Variations du pH dans les eaux de surface (février et novembre 2009)	119
Fig. 79:	Variations du Eh dans les eaux de surface (février et novembre 2009)	119
Fig.80:	Variations des teneurs en calcium dans les eaux de surface (février et	
U	novembre 2009)	120
Fig.81:	Variations des teneurs en magnésium dans les eaux de surface (février et	
0	novembre 2009)	121
Fig.82:	Variations des teneurs en sodium dans les eaux de surface (février et	
U	novembre 2009)	122
Fig.83:	Variations des teneurs en potassium dans les eaux de surface (février et	
	novembre 2009)	122
Fig.84:	Variations des teneurs en chlorures dans les eaux de surface (février et	
-	novembre 2009)	123
Fig.85:	Variations des teneurs en bicarbonates dans les eaux de surface (février et	
	novembre 2009)	123
Fig.86:	Variations des teneurs en sulfates dans les eaux de surface (février et	
	novembre 2009)	124
Fig.87:	Variance des quatre premiers axes factoriels.	125
Fig.88:	ACP des eaux souterraines (février 2009)	127
Fig.89:	Variance des quatre premiers axes factoriels.	128
Fig.90:	ACP des eaux souterraines (novembre 2009)	129
Fig.91:	Variance des quatre premiers axes factoriels	130
Fig.92:	ACP des eaux de surface (février 2009)	132
Fig.93:	Variance des quatre premiers axes factoriels.	133
Fig.94:	ACP des eaux de surface (novembre 2009)	134
Fig.95:	Relations Ca_{2+}^{2+} , Mg_{2+}^{2+} , Na_{+}^{+} , SO_{4-}^{2-} , HCO_{3-} avec Cl ⁻ des eaux souterraines	136
Fig.96:	Relations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , SO_4^{2-} , HCO_3 avec Cl ⁻ des eaux de surface	137
Fig.97:	Origine du calcium dans les eaux souterraines et de surface de la région du lac	
	Fetzara	139
Fig.98:	Relation entre calcium et magnésium dans les eaux souterraines et de surface	140
Fig.99:	Echanges de bases dans les eaux souterraines et de surface de la région du lac	.
	Fetzara	141
Fig.100:	Evolution des cations en fonction de la conductivité électrique	142
Fig.101:	Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique	144
Fig.102:	Classification des eaux de la région du Fetzara selon la dureté	146
Fig.103:	Diagramme de Richards des eaux souterraines de la région du lac Fetzara	149
Fig.104:	Diagramme de Richards des eaux de surface de la région du lac Fetzara	150

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction Générale

Le lac Fetzara est l'un des plus importants lacs de l'extrême Nord-Est Algérien, il a été officiellement, en 2002, classé comme une zone « Ramsar », autrement dit une zone humide. La définition de cette dernière pose problème, provenant du fait qu'il s'agit d'espaces de transition entre la terre et l'eau. A l'interface entre ces deux domaines (terre et eau) existe un gradient d'humidité, dont les limites sont difficiles à préciser.

Selon *Turner (1992)*, l'appellation de zone humide peut désigner tout élément de continuum reliant l'environnement aquatique à l'environnement terrestre. Mais naturellement, ces zones sont soumises à des inondations variables dans l'espace et dans le temps, la phase «inondation» varie d'une année à l'autre selon les conditions climatiques. Comme le notent *Mitsch et Gosselink (1986)*, l'intervention humaine modifie aussi les limites en séparant dans certaines zones la terre de l'eau par drainage, endiguement et poldérisation. Pourtant le facteur dominant qui distingue les zones humides des autres écosystèmes est un excès d'eau. Les autres caractéristiques propres aux zones humides sont leurs sols qui se différencient nettement des sols essentiellement terrestres et elles présentent une végétation adaptée aux conditions d'humidité du sol d'inondation (*Mitsch et Gosselink., 2007*).

Les zones humides jouent un rôle important à différents niveaux, elles participent à la régulation des microclimats, elles sont déterminantes pour la gestion de l'eau, elles régulent les débits et les crues des fleuves, entre le cours d'eau et les zones adjacentes (recharge / décharge des nappes, dissipation des forces érosives), entre les eaux de surface et les eaux souterraines et elles épurent les eaux des bassins versants en dégradant les excès de nutriments de la matière organique et des pesticides (*Brenda-Xiomara, 2008*).

D'un point de vue géochimique, le lac Fetzara constitue un milieu complexe où se déroulent de nombreuses réactions biogéochimiques et physico-chimiques, c'est une zone de contact entre le sol, les eaux de surface et celles de nappe, elle est soumise à l'apport d'effluents divers (agricoles, industriels et domestiques). En effet, l'interaction entre ces différents facteurs est responsable de la modification du chimisme des eaux et des sols de la région.

Le présent travail est un complément de notre étude de magister, soutenue en 2008, qui s'articule sur l'étude de la qualité des eaux et des sols de la région du lac Fetzara. L'objectif principal de ce travail est d'essayer de comprendre, décrire et expliquer à partir d'une approche géochimique certains processus responsables de l'état chimique actuel des

sols et la dégradation de la qualité des eaux souterraines et de surface du lac Fetzara. On note particulièrement, l'alcalinité résiduelle et les processus de changement de phases (précipitation - dissolution de minéraux alcalins et échanges cationiques).

En vue d'atteindre ces objectifs, plusieurs chapitres ont été abordés, qui sont :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation du site et la description des caractéristiques géomorphologiques de la région du Fetzara. Dont l'objectif est d'essayer de mettre en évidence les liens qui semblent exister entre les différentes formes géomorphologiques (relief, oueds, plaine, etc...).
- Le deuxième chapitre présente un aperçu géologique par une synthèse des travaux antérieurs. Cet aperçu permet d'identifier les matériaux et les structures des formations géologiques susceptibles d'être aquifères, qui conditionnent l'écoulement des eaux souterraines et superficielles et éventuellement responsables à la minéralisation des eaux et des sols de la région d'étude.
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude hydroclimatologique, cette étude effectuée a pour objectif de mieux connaître l'évolution des caractéristiques climatiques dans le temps et dans l'espace, et d'estimer le régime hydrologique des principaux cours d'eau de la région du lac Fetzara.
- Le quatrième chapitre s'articule sur une étude hydrogéologique de la région, basée sur les relevés piézométriques, qui permettra d'envisager les processus d'alimentation des aquifères, la détermination du sens d'écoulement et les relations existantes entre les différents systèmes (nappes – lac - oueds).
- Le cinquième chapitre présente une étude géochimique des sols et des eaux de la région du lac Fetzara. Dans cette partie, nous avons essayé d'expliquer à partir d'une approche géochimique certains processus responsables, d'une part de l'état chimique actuel des sols qui sont très affectés par le phénomène de salinisation et d'autre part, à la minéralisation et la dégradation de la qualité des eaux de nappes et de surface du lac Fetzara.

Enfin, une dernière partie synthétise les discussions et conclusions découlant de ce travail et évoque les perspectives qui s'en dégagent.

Chapitre I

CADRE

GEOMORPHOLOGIQUE

1. Introduction

Le lac Fetzara est l'un des plus importants de l'extrême Nord-Est algérien. En 2002, Il a été officiellement classé sur la liste des zones humides d'importance internationale par la convention « Ramsar ». Le lac est situé à 18 km au Sud-Ouest de la ville d'Annaba, s'allonge sur 17 km d'Est en Ouest et sur 13 km du Nord au Sud, avec une superficie d'environ 18600 ha. C'est une cuvette localisée entre le massif de l'Edough et la plaine de Annaba (fig.1), sa mise en place est due aux différentes formes de reliefs (montagnes, oueds, plaine, etc...) caractérisant la région. Dans cette partie nous allons essayer de mettre en évidence les liens qui semblent exister entre ces différentes formes.

2. Géomorphologie

En parcourant la région du lac Fetzara, nous distinguons deux formes morphologiques distinctes (fig.1), il s'agit des reliefs montagneux qui correspondent à la retombée des deux djebels Edough et Belleleita au Nord et aux chaînes telliennes au Sud de la plaine de Annaba. Ces structures sont dues essentiellement à la tectonique ayant affectée la région au Cénozoïque et au Quaternaire. Ces unités appartiennent à deux sous bassins versants principaux qui sont celui du lac Fetzara à l'Ouest avec une superficie de 515 km², et celui d'oued Meboudja à l'Est avec 252 km² de superficie.



Figure 1 : Carte Géomorphologique de la région du lac Fetzara.

2.1. Lac Fetzara

La cuvette du lac Fetzara qui est la partie basse d'un grand sous bassin versant endoréique présente des bordures Nord et Sud nettement dissymétriques, elles sont dues à une tectonique active pendant le Quaternaire ayant causée une large dépression.

Le Sud est caractérisé par la présence d'un véritable piémont avec quatre niveaux de glacis quaternaires étagés sur les grès ou les marnes (fig.2), s'est construit en aval du Tell Nord Guelmien.





Figure 2 : Coupe sur le piémont de la bordure Sud du lac Fetzara (Marre, 1992).

La coupe ci-dessus montre la présence sur ce piémont, de quatre niveaux de glacis répartis comme suit :

• Les restes de hauts niveaux énigmatiques (niveau IV) : au dessus du ce niveau se trouvent des replats de petites tailles qui tronquent les grès pseudo-numidiens de ce massif. Il s'agit d'une région où l'érosion a beaucoup fonctionné durant le Quaternaire. Au Nord de Mechtat Sidi Goulaya, on peut voir de gros blocs de grès à patine ferrugineuse pris dans une matrice argilo-sableuse brun-rouge. En contrebas, à 250 m d'altitude, il existe également des blocs gréseux avec une formation sablo-argileuse rouge et une croûte calcaire. Plus à l'Ouest à 200 m d'altitude, on retrouve d'autres replats présentant les mêmes caractères (*Marre, 1992*).

• Les formes encroûtées au Pléistocène moyen (niveau III) : à plusieurs reprises, vers 150 -170 m, les grés pseudo-numidiens sont tronqués par un niveau d'érosion incliné vers le Nord, il s'agit de restes d'un glacis d'ablation. Cependant, grâce aux ravinements, on peut voir que cette forme est constituée par plusieurs mètres de sables argileux rouges emballant quelques blocs de forme cubique d'environ 50 m de longueur. Sur certains blocs calcaires, on peut observer des formes de karstification, souvent dans une position différente de celle de leur genèse, il y a donc un transport des blocs après leur karstification (*Marre, 1992*).

• Les lambeaux de glacis (niveau II) : plusieurs lambeaux de glacis peuvent être vus dans le paysage, avec une pente de 4° environ, ils descendent vers la cuvette du lac Fetzara depuis 110 - 120 m jusqu'à 70 - 80 m d'altitude. Un talus convexo-concave les raccorde alors au niveau inférieur. Ce sont en général des niveaux d'érosion qui tronquent les marnes mauritaniennes et qui portent, épars, des blocs de grès, on peut voir une accumulation de calcaire qui se manifeste par des poupées ou un encroûtement tufeux blanc (*Marre, 1992*).

• Les grands glacis-cônes du Pleïstocène supérieur et les dépôts Holocènes (niveau I) : plusieurs glacis-cônes dominant le fond de la cuvette du lac Fetzara. Un talus d'érosion net, concave et haut de 5 à 10 m termine ces formes. Au pied de ce talus, les formations holocènes sont spatialement peu développées, sauf au débouché de l'Ouest de l'oued El Hout où se construit un cône très aplati et qui progressent dans la cuvette du lac, il s'agit de formations sablo-argileuses grises à noires lorsque l'hydromorphie est importante (*Marre, 1992*).

Au Nord, le massif de l'Edough pénètre brutalement dans la cuvette du lac Fetzara, où peu de formes Quaternaires assurent le passage de la montagne au fond de la dépression. Sur la bordure Nord du lac, la tectonique semble avoir été plus active que sur la bordure Sud *(Marre, 1992).* Au pied du piémont de la bordure Nord du lac Fetzara, nous distinguons trois niveaux de glacis (fig.3).



Figure 3: Coupe sur le piémont de la bordure Nord du lac Fetzara (Marre, 1992).

• Les lambeaux de glacis (niveau III) : comme sur le piement Sud, le niveau est spatialement peu représenté, il correspond à un niveau d'érosion qui, vers l'aval, passe à un glacis d'épandage et qui se termine par un talus au château d'eau du village de Berrahal (*Marre, 1992*).

• *Les bas glacis (niveau II)* : ce niveau est plus étendu, il est constitué par les bas glacis, dont le plus important, celui du douar de l'Eucalyptus, correspond à une avancée dans le lac Fetzara au Sud de Berrahal. A l'Ouest de cette localité, ces glacis s'appuyant sur le massif du douar Tobéiga et ils sont plus étendus que ceux situés plus à l'Est au pied du massif de l'Edough.

A l'Ouest de Berrahal, ces glacis sont construits avec un matériel sableux rouge présentant à la base des traces d'hydromorphie. A l'Est de Berrahal, ces formes plus petites, présentent un matériel constitué par des débris centimétriques mal émoussés provenant du massif de l'Edough (*Marre, 1992*).

• Les formations Holocènes (niveau I) : ces formations se raccordent au fond de la dépression du lac Fetzara. Le long des ravinements, des petites terrasses présentent des sables micacés gris-beiges avec, par endroit, des lits décimétriques de graviers de 1 à 1.5 cm mal émoussés (*Marre, 1992*).

Le lac occupe le fond de la cuvette à l'Ouest, lui succédant à l'Est par la plaine d'El Hadjar qui se prolonge par celle de Annaba. Ces deux ensembles morphologiques sont séparés par un cordon dunaire d'El Kantra, celui-ci sert de ligne de partage des eaux, entre le lac Fetzara et l'oued Meboudja et il ferme aussi la dépression.

Le canal d'assèchement, long 14 km, assure le drainage des eaux du lac en période pluvieuse, il traverse la cuvette de Fetzara suivant une direction Ouest-Est et rejoint le cours d'eau de la Meboudja où il assure la vidange du lac.

Une coupe réalisé le long du canal (fig.4) nous a permis d'observer ; des sables argileux jaunâtres avec à la base des traces d'hydromorphie, des niveaux noirs argileux qui se terminent en biseaux vers l'aval, ceux-ci étant riches en matière organique. Nous avons donc là, une alternance de phases rhéasistasiques pendant lesquelles le lac recevait des formations sableuses venues soit des versants grâce au transport des oueds, soit du littoral par transport éolien, et des phases biostatiques pendant que le lac devenait marécageux avec une faune lagunaire à marine.

En effet, les arrivées sont des espèces faunistiques qu'on retrouve à l'heure actuelle dans les estuaires où les eaux sont peu salées. La présence de cette faune au fond du lac Fetzara indique donc, la relation ancienne entre cette dépression et la mer.

La liaison entre le lac et la plaine d'El Hadjar s'effectue à partir de l'oued Meboudja, qui sinuait autrefois entre Belelieta et Bouhamra avant de se relier dans l'oued Seybouse. La plaine d'El Hadjar se termine brutalement au Nord, contre le djebel Belelieta, devenant mont du massif de l'Edough. Le versant de ce djebel est rectiligne et abrupt, il s'agit certainement d'un contact par faille. La plaine d'El Hadjar a donc joué en subsidence jusqu'à une date récente. Cette subsidence semble avoir été très importante au droit du cordon dunaire du lac Fetzara, qui a permis de montrer à la fin le rôle de la tectonique et du climat dans l'élaboration du lac. La tectonique est responsable d'un jeu en subsidence de la dépression. En effet, les failles qui limitent cette cuvette sont restées actives pendant le Quaternaire.



Figure 4: Coupe du canal de drainage du lac Fetzara (Marre, 1992).

2.2. Les montagnes

Le lac Fetzara est limité dans sa partie Nord par le massif de l'Edough, qui est nettement séparé des reliefs situés au Nord-Ouest par la vallée de Oued El Aneb. Sa masse principale est plongée en direction du Nord à 55° Est. La ligne de crête relativement rectiligne longue de 26 km, débute au Nord du lac Fetzara, elle s'élève rapidement à plus de 600 m pour culminer à 1008 m d'altitude au Kef Sebâ et redescend à 867 m vers Seraidi, elle s'abaisse ensuite régulièrement jusqu'au Cap de Garde au Nord de la ville de Annaba.

A l'Est du lac Fetzara, le massif de l'Edough est isolé du djebel Belelieta par une vallée à fond plat, il s'agit là d'un fossé d'effondrement de direction Ouest-Est entre les djebels Edough et Belelieta (287 m) ouvrant ainsi une dépression vers la mer Méditerranée.

Entre Belelieta et Bouhamra, se creuse la vallée transversale de la basse Meboudja qui prend naissance au pied de la rive dunaire, elle est limitée à l'Est par la cuvette du lac Fetzara, et qui entre en confluence avec l'oued Seybouse au Nord d'El Hadjar.

A l'Ouest, djebel Edough est relié par deux ensembles de collines ; le premier situé entre les deux communes de Oued El Aneb et Berrahal (226 m), le second au Nord de Boumaiza (130 m).

Enfin au Sud, l'encadrement montagneux est constitué par les chaînes telliennes qui présentent ici une diversité morphologique encore plus grande que dans le reste de l'Algérie.

2.3. La plaine d'Annaba

Le drainage du lac Fetzara se fait par l'intermédiaire d'un canal, dont les eaux d'évacuation se déversent dans l'oued Meboudja vont ensuite, dans l'oued Seybouse. Ce dernier draine la plaine d'Annaba et débouche dans la mer Méditerranée. La plaine de Annaba est située immédiatement en arrière de la ville de Annaba. Elle est limitée au Nord par la mer Méditerranée, au Nord-Ouest par l'anticlinal du massif de l'Edough et au Sud par l'anticlinal de la chaîne numudienne, avec une topographie relativement régulière.

Dans l'espace ainsi défini, trois secteurs présentant chacun des formes différentes ; la basse plaine dans laquelle s'encaisse l'oued Seybouse, les bordures où nous pouvons observer des glacis et le littoral où quelques formations quaternaires sont visibles. Cette basse plaine a une forme inclinée et légèrement bombée avec la Seybouse comme axe de drainage. Celle-ci présente un tracé plus rectiligne *(Belhamra, 2001 ; Habes, 2006)*.

A l'Est et à l'Ouest, la basse terrasse sableuse de la Seybouse disparaît pour laisser la place à des dépressions de 2 m d'altitude et aux formations argileuses noires et hydromorphies (marais de Boukmira près de l'aéroport). La Seybouse se jette dans la mer Méditerranée à Sidi Salem par l'intermédiaire d'un chenal artificiel creusé pendant les années 1960.

3. Le couvert végétal

L'occupation du sol est un autre facteur dont il faut tenir compte. On peut distinguer, en dehors des zones urbanisées, des surfaces occupées par la végétation naturelle ou par les reboisements et d'autres de mise en valeur culturale. Les versants Nord et Sud disposent d'une remarquable couverture végétale donnant l'aspect d'une succession visible à l'œil nu, le maquis sur les niveaux plus ou moins hauts et la forêt sur les niveaux de haute altitude (fig.5).

Le djebel Menchoure au Sud, est très dégradé et ne se reconstitue que très lentement, bien qu'il ne fasse l'objet d'aucune exploitation, il s'agit uniquement de chêne-liège, de pin maritime et surtout d'eucalyptus au bord des routes. Enfin, des aménagements agricoles en versants ont été mis en œuvre par le développement d'arboriculture en montagne, comme l'olivier, le pécher, etc...

Ailleurs, principalement sur les grès, c'est le domaine du maquis méditerranéen typique à Cistes et Calycotomes associés à des plantes annuelles, le plus souvent tubéreuse et à des touffes de brachypodes rameux. Le Diss n'apparaît en abondance qu'au-dessus de 600 m d'altitude. Au Nord, la forêt occupe les sommets du massif de Berrahal et la région du douar Toubeïga à l'Ouest. Le chêne-liège est l'essence principale couvrant environ un tiers de la superficie forestière, cette forêt est exploitée en matière de bois et de liège. Elle fournit ce dernier à l'unité SNLB (Société Nationale du Liège et Bois) située à Oued El Aneb.

Un peu plus bas, la présence du maquis révèle la dégradation d'une ancienne forêt ; elle est due aux actions anthropiques continues (incendies, pacage, etc...), il serait donc nécessaire de préserver ces zones contre le pâturage pour rétablir l'équilibre naturel et lutter contre le phénomène de dégradation.

Les reboisements sont constitués de deux essences : l'une feuillue (eucalyptus) et l'autre résineuse (pin maritime), ce qui a contribué à une régénération de la forêt et une stabilisation des versants. Par ailleurs, sur les sols alluvionnaires, la végétation pastorale (prairie naturelle) occupe les zones basses de la région et principalement les alentours du lac Fetzara. C'est une végétation continue et très dense au niveau des marécages telle que Garaat Tacha au Nord-Ouest. La présence de cette couverture végétale, constitue une véritable réserve de fourrage pour le cheptel qui est important dans la région. Le surpâturage pose le problème de régénération des herbes.

L'agriculture de la plaine est surtout axée sur le maraîchage, la tomate industrielle, la céréaliculture et la culture fourragère, ainsi que l'arboriculture fruitière en irriguée pour les agrumes et fruits à noyaux.



Figure 5 : Carte des formations forestières de la wilaya de Annaba (DGF, 2007).

4. Conclusion

L'étude géomorphologique de la région du lac Fetzara et ses alentours a montré l'origine et la contribution de chaque forme de relief sur le fonctionnement du lac. La cuvette présente des bordures Nord et Sud nettement dessymétriques, où se disposent une remarquable couverture végétale, le maquis sur les niveaux plus ou moins hauts et la forêt sur les niveaux de haute altitude.

Au Sud, un véritable piémont avec plusieurs niveaux de glacis, s'est construit en avant du Tell Nord Guelmien. Au Nord, le massif de l'Edough tombe brutalement dans la cuvette du lac Fetzara et peu de formes quaternaires assurent le passage de la montagne au fond de la dépression. Enfin à l'Est, une lunette sableuse qui suit la route, isole la dépression lacustre de la plaine d'El Hadjar. **Chapitre II**

APERÇUE

GEOLOGIQUE

1. Introduction

L'analyse de l'environnement géologique est fondamentale à toute étude hydrogéologique ou hydrogéochimique. Elle permet d'identifier les matériaux et les structures des formations géologiques susceptibles d'être aquifères et qui conditionnent l'écoulement des eaux souterraines et superficielles.

Plusieurs études géologiques ont été effectuées sur la région de Annaba, dont l'ensemble montre que la région comporte à la fois les affleurements de terrains métamorphiques et éruptifs au Nord et Nord-Est du lac Fetzara (massif de l'Edough, Belelieta et Bouhamra), et des terrains sédimentaires occupent le reste de la région (fig.6).



Figure 6 : Carte géologique du bassin versant du lac Fetzara.

2. Massif de l'Edough

Le massif de l'Edough constitue le complexe métamorphique le plus oriental du littoral Algérien (fig.7). Il a fait l'objet de plusieurs études géologiques (*Hilly, 1962; Vila, 1970; Marignac et Zimmermann, 1983 ; Marignac, 1985 ; Gleizes et al., 1988 ; Monié et al., 1992 ; Hammor, 1992 ; Aissa et al., 1998 ; Hammor et Lancelot, 1998 ; Laouar et al., 2002)* et il est considéré comme une partie des zones internes de la chaîne alpine de l'Afrique du Nord, originaire de l'activité tectonique dans le bassin méditerranéen occidental associée à la collision de la plaque africaine et européenne durant la période Oligo-Miocène (*Auzende et al., 1975 ; Bouillin, 1979 ; 1986 ; Cohen, 1980 ; Maury et al., 2000 ; Laouar et al., 2005*).



Figure 7 : Carte géologique du massif de l'Edough (Laouar & al., 2002).

Le complexe de l'Edough est composé d'une variété de roches métamorphiques d'âge Précambrien à Paléozoïque. L'ensemble de ces roches forme une antiforme d'axe NE-SW. Les gneiss formant la base ont été décrits par *Ahmed-Said et Leake (1993)*. Leur étude pétrologique et géochimique indique que ce sont d'anciennes roches magmatiques à caractère calco-alcalin. Ils ont été datés par la méthode U-Pb à 595 \pm 51 Ma pour les orthogneiss de base et 606 \pm 55 Ma pour les leucogranites supérieurs qui sont fortement déformés (*Hammor et Lancelot, 1998*), et ils ont été considérés comme des roches granitiques mises en place durant l'orogène Pan-Africaine.

Les métapélites qui viennent juste au-dessus des gneiss consistent en deux unités principales : des micaschistes à grenat et souvent à disthène en alternance avec des niveaux de marbre et de skarns d'épaisseur métrique, et une unité supérieure d'âge Paléozoïque *(Ilavsky et Snopkova, 1987)*, constituée de schistes alumineux à andalousite et staurotide en alternance avec des quartzites feldspathiques. Ces formations ont subit un trajet polycyclique de température et pression durant le métamorphisme ; depuis des conditions de hautes température et pression (cycle 1) jusqu'à moyennes température et pression (cycle 2) et finalement basse pression et haute température (cycle 3) *(Hammor, 1992)*.

Les terrains cristallophylliens sont en partie, recouverts par un système de nappes sédimentaires résultant de l'activité tectonique Oligo-Miocène. Ces nappes sont constituées de marnes, d'argiles et de grès crétacés (flysch crétacé), et de grès Oligo-Miocènes (argiles et grès numidiens).

Durant le Miocène à environ 16 Ma, des corps magmatiques ont été mis en place au sein du complexe métamorphique et sa couverture sédimentaire (Marignac et Zimmermann, 1983). Ces roches ignées constituent deux groupes principaux : des masses et filons rhyolitiques, et des microgranites. Leur pétrologie, géochimie et pétrogenèse ont été étudiées par Ahmed-Saïd et al. (1993) et Laouar (2002). L'activité magmatique et l'hydrothermalisme associé dans le massif de l'Edough ont été considérés responsables de l'emplacement de plusieurs indices et gîtes polymétalliques (Laouar et al., 2002) : exemple, ceux de Ain Barbar (la mine la plus importante dans la région, actuellement fermée) et El-Mellaha (Bolfa, 1948; Marignac, 1985) ; les gîtes à W-Sn associés aux skarns de Bouzizi et Belelieta (Aissa et al., 1995) ; et les gîtes de Fe-Pb-Zn-Cu associés aux skarns et amphibolites de la région de Boumaïza et de Berrahal.

3. Description lithologique

Le cœur de l'antiforme de l'Edough est constitué essentiellement par la superposition tectonique, observée à l'Est du massif, de deux unités principales : l'unité inférieure est composée de gneiss fortement foliés, d'âge Précambrien (Pan-Africain) *(Hammor, 1992; Hammor et Lancelot, 1998)*. Des niveaux de marbre, d'amphibolites et de roches ultrabasiques sont également associés à ces deux unités.

3.1. Les Gneiss

Les gneiss à biotite qui forment le cœur de l'antiforme sont des roches fortement foliées et plissées et sont composés principalement par une variété oeillée étroitement associée à de nombreux niveaux leptynitiques (quelques centimètres à une dizaine de mètres d'épaisseur) riche en tourmaline et autre variété plus ou moins migmatique. Ces deux variétés ont été longtemps considérées comme orthogneiss et paragneiss respectivement *(Gleizes et al., 1988).* Les travaux récents de *Hammor et Lancelot (1998)* ont donnés les âges de 630 ± 50 Ma pour les paragneiss et de 606 à 595 Ma pour les orthogneiss, ces derniers sont constitués principalement de biotite, quartz, orthose, plagioclase et grenat.

L'andalousite, la fibrolite, la muscovite, l'amphibole, la tourmaline, l'apatite et le zircon peuvent également être présents. Les yeux sont des mégacristaux de feldspath potassique contenant plusieurs inclusions d'autres minéraux et leur taille peut atteindre 8 cm de diamètre.

L'étude géochimique (éléments majeurs, éléments en traces et isotopes de Rb-Sr) des orthogneiss *(Ahmed-Said et Leake, 1993)* indique qu'ils sont à l'origine des roches ignées de nature acide, à caractère calco-alcalin et qui ont été plus tard, affectées par un métamorphisme isochimique.

3.2. Les micaschistes

Ils sont constitués de deux ensembles principaux :

L'ensemble inférieur, qui repose directement sur les gneiss, est souvent caractérisé par la présence de niveaux plus ou moins lenticulaires de marbre d'épaisseur très variable (quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres). Il affleure principalement dans les zones périphériques du massif de l'Edough et dans la région de la Voile Noire au Nord-Est du massif. Dans cet ensemble se trouve également intercalés des niveaux et lentilles d'amphibolites, de métagabros, de serpentines et des filons de quartz-grenat. Ces micaschistes sont des roches schisteuses souvent riches en disthène et grenat et leur contact avec les marbres est souvent souligné par des skarns de réaction. Leur étude géochimique (*Ahmed-Said & Leake, 1993*) indique que ce sont d'anciens sédiments riches en illite avec quelques fragments ignés de composition intermédiaire et qui ont subit un métamorphisme de haute pression (7 - 9 kb) et de moyenne température (600 ± 30 °C).

L'ensemble supérieur est constitué par une série dite « des alternances » (*Gleizes et al., 1988 ; Caby et Hammor, 1992*), surmonté par une unité épimétamorphique. La série des alternances est caractérisée par une alternance régulière de micaschistes, souvent fortement alumineux, et

quartzites feldspathiques d'épaisseur décimétrique à métrique. La découverte des acritarches *(Ilavsky et Snopkova, 1987)* précise que cette série est d'âge Paléozoique (Ordovicien à Dévonien). L'unité épimétamorphique, quant à elle, est représentée par les métapélites de Beleleita, Boumaiza et Berrahal. Elle correspond à des micaschistes à mica blanc, biotite, disthène, staurotide, rutile et parfois grenat, interstratifiés avec des marbres.

3.3. Les roches métabasiques

Les roches métamorphiques basique du massif de l'Edough se trouvent généralement dans la partie supérieure des gneiss et au niveau des micaschistes. Elles comprennent des amphiboles, des pyroxènes, des péridotites, des métagabros, etc...; le volume le plus important des quelles est celui des amphiboles de Kef Lakhal (La Voile Noire). Celles-ci sont constituées de roches massives et d'autres rubanées; le passage de l'une à l'autre est souvent graduel. La roche est composée d'hornblende, plagioclase (An₃₄), grenat, rutile, magnétite, ilménite, quartz, épidote, scapolite, diopside, zircon, apatite et carbonates secondaires.

De fines couches de micaschiste à grenat, épidotites et des filons de roches à quartz et plagioclase ainsi que des filons de quartz peuvent se trouver au sein de ces amphibolites. Les filons de quartz sont contrôlés par la tectonique *(Hilly, 1962 ; Ahmad-Said et Leake, 1992)*.

Parmi les roches ultrabasiques, on note la présence d'enclaves de nature amphibolites et de roches riches en olivine, surtout au niveau des roches encaissantes (micaschistes). *Ahmed-Said et Leake (1992)* considèrent les amphibolites de Kef Lakhal comme roches ignées basiques à ultrabasiques de nature effusive, formées dans un domaine de marge continentale.

3.4. La couverture sédimentaire

Elle comprend la nappe de flyschs crétacés et la nappe de flyschs numidiens. Les flyschs crétacés affleurent en fenêtre sous la nappe numidienne et occupent la région de Ain Barbar et El-Mellaha *(Hilly, 1962 ; Marignac, 1976 ; 1985)*. Il s'agit d'intercalations d'argilites noires bleutées et de bancs peu épais de calcaires gréseux de type Massylien. Les niveaux calcaires renferment des foraminifères permettant de rapporter cette série au Maestrichtien. Les flyschs numidiens correspond à un faciès argilo-gréseux constitué par des bancs minces de grès à la base qui deviennent plus épais et plus grossiers au sommet avec la présence de dragées de quartz. L'épaisseur de cet ensemble varie de 1000 à 1500 m.

3.5. Le magmatisme tertiaire

Le magmatisme tertiaire de l'Edough est représenté par des leucogranites et aplo-pegmatites d'âge Burdigalien *(Aissa, 1995)* et des microgranites et rhyolites d'âge Langhien *(Marignac et Zemmermann, 1983)*. Les leucogranites et aplo-pegmatites se rencontrent souvent dans le socle de l'Edough, et sont spatialement associées à des complexes pegmatites. Les leucogranites restent généralement confinés dans les gneiss, alors que les aplo-pegmatites se rencontrent aussi bien dans les gneiss que dans les micaschistes, y compris ceux de la série « des alternances ».

Les microgranites et rhyolites de l'Edough s'intègrent dans le cadre du magmatisme de la marge Nord algérienne. Ils appartiennent d'une manière générale à l'ensemble Edough-Cap de Fer *(Hilly, 1962)*, et dessinent, avec toutes les intrusions dispersées de Ain Barbar, un complexe centré sur une importante anomalie magnétique suggestive de l'existence en profondeur de masses intrusives plus importantes.

Dans le massif de l'Edough, les produits de ce magmatisme scellent les grands accidents et les contacts tectoniques plus particulièrement les contacts socle-couverture.

4. Tectonique et structure du massif de l'Edough

4.1. Déformations synmétamorphiques

Le socle de l'Edough a subi une histoire tectono-métamorphique complexe où deux séquences d'événements peuvent être individualisées :

- Plissements synschisteux contemporains d'un métamorphisme de type barrovien (disthènestaurotide-grenat).
- Plissements synschisteux et cisaillements ductiles, contemporains d'un métamorphisme de basse pression (andalosite-sillimanite) dans le contexte distensif d'une faille de détachement (*Brunel et al., 1988*), d'âge Burdigalien (*Monié et al., 1992 ; Aissa et al., 1994 ; 1995*).

4.2. Déformations tardives

Les déformations tardives se résument essentiellement en la formation de plis et de failles (Aissa, 1995).

Plis droits à N140°E et brachyanticlinal N50-60°E façonnant la forme actuelle du massif. Failles : un premier type de failles (F1) constitue une famille dont l'orientation dominante varie de N120° à N150°E et correspondrait à des failles décrochantes dextres. Les failles N150° à N160°E contrôlent les minéralisations polymétalliques hydrothermales et paraissent par ailleurs, avoir guidé la mise place des rhyolites.

Un deuxième type de failles (F2), d'orientation NE-SW, semble conjugué au type précédent, et aurait probablement joué en décrochements senestres. La grande faille de l'Oued Afris qui appartient à ce système paraît avoir la mise en place de plusieurs corps microgranitiques. Un troisième type de failles (F3) moins important, qui a une direction moyenne E-W; et un quatrième type rare, de direction moyenne N-S qui semble en liaison avec le premier type (F1).

5. Minéralisation du massif de l'Edough

La présence de gîtes et indices métallifères dans le massif de l'Edough est en relation plus ou moins directe avec l'activité magmatique et les systèmes de failles, principalement (F1) contrôlés par la tectonique distensive langhienne.

Quatre types principaux de minéralisation sont reconnus (fig.7) :

(1) gîtes à Fe-(Pb-Zn-Cu) liés aux marbres et skarns; exemple : ceux de Berrahal et Boumaïza;

(2) filons à minéralisation polymétallique encaissés dans les flyschs crétacés ; exemple : Ain Barbar et El-Mellaha ;

(3) gîtes à W-As-Au liés aux skarns et gneiss ; exemple : Belelieta et Bouzizi ;

(4) filons à Sb-Au situés à travers le complexe métamorphique ; exemple : Koudiat El-Ahrach, Saf-Saf et Ain Barbar.

6. Plaines littorales

Ces plaines s'étendent de la vallée de la Seybouse jusqu'à la frontière tunisienne, sur une largeur d'environ 15 km et une longueur de 110 km. Elles ne se constituent pas par un ensemble homogène, car on y trouve des dunes sableuses des espaces marécageux, des plaines fertiles et petits reliefs.

De l'Ouest vers l'Est, on distingue successivement la plaine de Guerbes, la dépression du lac Fetzara, la plaine d'El Hadjar et la plaine de Annaba. Elles sont caractérisées par des sédiments quaternaires récents, constituant ainsi le fond de cette dépression tectonique (fig.8). Les grès numidiens constituent les sommets, dont les plus importants se situent autour du village de Daghoussa.


Figure 8 : Coupes géologiques entre Ain Berda et l'Edough par le lac Fetzara.

Les formations récentes jouent un rôle considérable dans la constitution géologique de la région de Annaba qui se présente aussi comme un secteur jeune de l'Algérie (*Zenati, 2010*).

Les études antérieurs (*Joleaud, 1936 ; Vila, 1980*) ont fait apparaitre les traits essentiels du Quaternaire :

- Quaternaire ancien ; constitué par des formations alluviales (argile, limon, sable, gravier et galets), constituant la haute terrasse, son altitude varie entre 75 et 150 m.
- Quaternaire moyen ; constitué par des argiles et des sables, il correspond à la basse terrasse de 20 à 50 m. Cette dernière se développe sur toute la région, surtout au niveau de la vallée de oued Seybouse.
- Quaternaire récent ; correspond au cordon dunaire littoral de Annaba, il est constitué par des sables et des limons alluvionnaires.
- Quaternaire actuel; constitue essentiellement les lits des oueds par des dépôts alluvionnaires (sables, cailloux, etc...), et les plages actuelles par les sables d'origine marine.

7. Conclusion

La région d'étude fait partie de l'ensemble géologique du Tell algérien Nord oriental. Elle comporte à la fois les affleurements de terrains métamorphiques, des roches éruptives et des terrains sédimentaires.

Les affleurements de bordures sont constitués par des formations métamorphiques et éruptives au Nord (gneiss, schistes, micaschistes, cipolins, marnes et marno-calcaires) et des formations gréso-argileuses au Sud. Elles sont relativement de faible potentialité hydraulique, mais constituent des zones d'alimentation pour les nappes de la région.

Les formations sédimentaires correspondent à un ensemble non uniforme où on trouve un espace marécageux, des dunes sableuses et des plaines fertiles. Ces deux dernières sont considérées comme des formations potentiellement aquifères, elles sont caractérisées par des sédiments quaternaires.

Chapitre III

CARACTERISTIQUES

HYDROCLIMATOLOGIQUES

A. Climatologie

1. Introduction

L'étude des caractéristiques hydroclimatiques d'un bassin versant (précipitations, température, évapotranspiration), joue un rôle primordial dans la compréhension des mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux superficielles et souterraines. Ces principaux facteurs permettent également d'approcher les termes du bilan hydrique, qui sont les précipitations, la température, l'évapotranspiration et la détermination du type de climat qui règne dans la région concernée.

Le travail réalisé porte sur la région du lac Fetzara, cette dernière est caractérisée par l'absence des stations météorologiques. Pour cela, nous avons utilisé les données des quatre stations limitrophes (Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal), de ce fait les résultats obtenus ne constitueront qu'une approximation des caractéristiques climatiques.

2. Stations de mesure

Pour étudier les variations des caractéristiques climatiques de la région du lac Fetzara dans le temps et dans l'espace, nous avons pris en considération les données de précipitations et de températures de quatre stations ; les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal. Les coordonnées des stations météorologiques sont récapitulées dans le tableau ci-dessous :

Stations	X (Km)	Y (Km)	Z (m)	Période d'observation	Distance par rapport au Lac
Les Salines	955.80	403.80	3	1975/2010	15 Km au N.E
Pont Bouchet	950.25	402.80	6	1975/2010	12 Km au N.E
Ain Berda	937.60	387.75	73	1975/2010	8 Km au S.E
Berrahal	923.35	405.56	33	1981/2006	2 Km au N.O

 Tableau 1: Coordonnées géographiques des stations météorologiques (ANRH).

3. Facteurs climatiques

3.1. Précipitations

3.1.1. Précipitations moyennes mensuelles

Le tableau suivant (tab.2) donne un aperçu sur la répartition des précipitations moyennes mensuelles au niveau des quatre stations (Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal)

sur une période d'observation qui s'étale sur plus de 30 ans (35 ans pour les stations Les Salines, Pont Bouchet et Ain Berda et 31 ans pour celle de Berrahal).

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Les Salines	37.2	68.5	90.3	110.8	98.1	74.8	67.1	61.1	38.2	14.6	2.7	9.6
Pont Bouchet	38.8	55.5	87.2	100.5	89.5	66.2	60.3	57.9	34.8	12.2	2.4	9.2
Ain Berda	40.23	54.13	79.59	97.32	94.01	68.10	65.90	63.63	42.53	13.60	2.59	9.32
Berrahal	30.1	58	94.5	133.9	111.4	80.7	58.2	60.3	38.8	12	3.5	6.3

Tableau 2 : Précipitations moyennes mensuelles (mm) des stations Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda(1975-2010) et Berrahal (1981-2006).

Le tableau ci-dessus montre que les mois les plus pluvieux sont novembre, décembre, janvier, février, mars et avril. Par contre, les mois de juin, juillet et août sont les moins pluvieux.

Les histogrammes des précipitations moyennes mensuelles montrent la variation des précipitations d'un mois à un autre (fig.9). Le maximum des précipitations est enregistré au mois de décembre pour les quatre stations ; Les Salines (110.8 mm), Pont Bouchet (100.5 mm), Ain Berda (97.32 mm) et Berrahal (133.9 mm). Par contre, le minimum est enregistré au mois de juillet avec des valeurs de 2.7 mm, 2.4 mm, 2.59 mm et 3.5 mm respectivement aux stations Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal.

3.1.2. Coefficient pluviométrique (H)

Ce coefficient permet de déterminer pour une station donnée, si l'année est excédentaire (H > 1) ou déficitaire (H < 1). Il est définit par le rapport de la pluviométrie (P) d'une année à

la pluviométrie moyenne \overline{p} d'une période d'observation. $H = P / \overline{p}$

Avec : H : Coefficient pluviométrique,

P : Pluviométrie d'une année (mm).

 \overline{p} : Pluviométrie moyenne annuelle (mm).

Les hauteurs moyennes annuelles des précipitations (\overline{p}) enregistrées durant la période d'observation sont de l'ordre de 673 mm, 614.5 mm, 630.95 mm, 687.77 mm successivement pour les stations Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et celle de Berrahal.









Figure 9 (A, B, C, D): Précipitations moyennes mensuelles des stations : Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975 -2010) et Berrahal (1981-2006).

A		Coefficient pluvio	métrique (H)	
Annee	Les Salines	Pont Bouchet	Ain Berda	Berrahal
1975/76	0.74	0.75	0.95	/
1976/77	1.13	1.17	1.12	/
1977/78	0.81	0.74	0.88	/
1978/79	1.01	0.96	1.04	/
1979/80	0.91	0.85	0.74	/
1980/81	0.94	0.87	0.92	/
1981/82	1.13	1.08	0.93	1.21
1982/83	1.01	0.86	0.90	0.92
1983/84	1.39	1.34	1.14	1.10
1984/85	1.38	1.47	1.32	1.28
1985/86	0.81	0.71	0.71	0.83
1986/87	1.35	1.20	1.29	1.23
1987/88	0.73	0.60	0.61	0.76
1988/89	0.83	0.79	0.76	0.66
1989/90	0.79	0.80	0.84	0.69
1990/91	1.02	1.06	1.01	1.02
1991/92	1.02	1.01	0.99	1.00
1992/93	0.96	1.03	1.08	0.96
1993/94	0.77	0.80	0.79	0.95
1994/95	0.81	0.87	0.93	0.80
1995/96	1.20	1.18	1.16	1.10
1996/97	0.63	0.63	0.62	0.92
1997/98	1.40	1.22	1.37	1.09
1998/99	1.25	1.12	1.16	1.09
1999/00	0.83	0.77	0.89	0.91
2000/01	0.82	0.85	0.87	0.88
2001/02	0.68	0.67	0.58	0.73
2002/03	1.25	1.52	1.54	1.36
2003/04	1.05	1.05	1.36	1.10
2004/05	1.47	1.56	1.34	1.55
2005/06	0.91	0.90	0.91	0.86
2006/07	0.96	1.06	0.94	/
2007/08	0.81	0.96	0.84	/
2008/09	1.28	1.42	1.41	/
2009/10	0.93	1.15	1.08	/

Tableau 3: Coefficient pluviométrique des stations : Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal.



Figure 10 : Variations des coefficients pluviométriques pour les stations : Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975-2010) et Berrahal (1981-2006).

L'analyse des courbes des variations du coefficient pluviométrique (fig.10), montre que les années déficitaires communes pour les quatre stations sont nombreuses que les années excédentaires. Les années excédentaires sont : 1976/77, 81/82, 83/84, 84/85, 86/87, 95/96, 97/98, 98/99, 2002/03, 2003/04, 2004/05 et 2008/2009, le reste des années sont considérées comme déficitaires.

Les années 2002/2003 et 2004/2005 sont les plus arrosées où la quantité des précipitations dépasse les 840 mm/an. Par contre, les années 1987/1988, 1996/1997, 2001/2002 sont les plus sèches avec une quantité des précipitations inférieure à 500 mm/an.

3.1.3. Répartition saisonnière des précipitations

La subdivision des pluies de l'année pour chaque saison est faite suivant les quatre saisons agricoles :

- L'automne (septembre, octobre, novembre),
- L'hiver (décembre, janvier, février),
- Le printemps (mars, avril, mai),
- L'été (juin, juillet, août).

L'examen des résultats du tableau 4 montre que la saison hivernale est la plus pluvieuse pour les quatre stations. Au total, il tombe 283.69 mm, 256.13 mm, 259.43 mm et 326.04 mm,

soit 42.15 %, 41.69 %, 41.12 % et 47.41 % des pluies annuelles, respectivement pour les stations : Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal (tab.4, fig. 11).

La répartition des précipitations sur la saison du printemps et celle de l'Automne est presque identique ; elles représentent entre 22.88 % et 29.55 % de la totalité des précipitations pour les quatre stations. Par contre, la saison estivale est la plus sèche, elle représente seulement 3 à 4 % de la totalité des pluies (tab.4, fig. 11).

Tableau 4: Répartition saisonnières des précipitations des stations Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda(1975-2010) et Berrahal (1981-2006).

Stations	Les sa	lines	Pont Bo	ouchet	Ain B	erda	Berr	ahal
Saisons	P (mm)	P (%)	P (mm)	P (%)	P (mm)	P (%)	P (mm)	P (%)
Automne (A)	196.00	29.12	181.54	29.55	173.96	27.57	182.66	26.56
Hiver (H)	283.69	42.15	256.13	41.69	259.43	41.12	326.04	47.41
Printemps (P)	166.49	24.74	152.98	24.90	172.06	27.27	157.33	22.88
Eté (E)	26.90	4.00	23.71	3.86	25.51	4.04	21.74	3.16
Indices saisonniers	HAPE		HAPE		HAPE		HAP	Ε
Type de Climat	Hivernal		Hivernal		Hiver	rnal	Hiveri	ıal



Figure 11: Répartition saisonnières des précipitations des stations : Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975-2010) et Berrahal (1981-2006).

3.2. La température

La température est un élément fondamental du climat, elle joue un rôle déterminant dans l'étude de l'évaporation et de l'évapotranspiration. La station Les Salines est la seule à enregistrer les mesures de ce facteur. Les valeurs de la température sont consignées dans le tableau ci-dessous ;

Temp. (°C)	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Temp. Min	11.16	13.30	9.79	10.19	9.07	9.20	11.49	13.30	14.80	12.10	22.50	22.50
Temp. Max	25.70	22.95	18.25	23.89	18.00	14.00	15.99	17.60	20.37	27.60	32.90	28.28
Temp. Moy	22.96	19.67	15.39	12.91	11.56	11.80	13.13	15.18	18.26	21.71	25.18	25.54

Tableau 5: Températures moyennes mensuelles à la station Les Salines (1975 - 2010).

D'après l'histogramme des températures moyennes mensuelles (fig.12), le mois de janvier est le mois le plus froid (11.56 °C), alors que le mois d'août est le plus chaud (25.54 °C).



Figure 12: Températures moyennes mensuelles à la station Les Salines (1975 – 2010).

3.3. L'humidité

Nous disposons des valeurs mensuelles et annuelles de l'humidité relative à la station Les Salines, avec une moyenne annuelle de l'ordre de 74.66 % sur une période d'observation de 31 ans (1975-2006) (tab.6). Elle atteint son minimum au mois de juillet avec une valeur de 70.18 % et un maximum au mois de janvier avec une valeur de 78.16 %.

 Tableau 6: Humidité relative moyenne mensuelle à la station Les Salines (1975 – 2006).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Moy
H (%)	72.42	74.70	76.42	77.20	78.16	77.00	75.45	74.65	75.03	72.83	70.18	71.86	74.66

3.4. Le vent

Le vent est l'un des éléments les plus déterminants des régimes pluvieux, de l'évaporation et par conséquent du climat.

D'après la station météorologique Les Salines, les vents dominants sont de direction Nord et Nord-Ouest avec des vitesses moyennes variant entre 2.9 et 3.45 m/s (tab.7). Ces vents en contact avec le massif de l'Edough et la barrière montagneuse du Sud, déversent des pluies au passage.

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Моу
Le vent (m/s)	3.04	2.90	3.05	3.45	3.31	3.30	3.30	3.24	3.02	3.03	3.18	3.13	3.16

Tableau 7: Vitesse moyenne mensuelle des vents à la station Les Salines (1975 – 2006).

3.5. Type de climat

La courbe pluviothermique (combinaison de la température et les précipitations), permet la détermination du type du climat régnant dans la région. Un mois sec se définit, selon (*Bagnouls et Gaussen, 1953, 1957*) comme celui ayant un total pluviométrique (moyenne en millimètres) égal ou inférieur au double de la température ($P \le 2T$). Cette formule ($P \le 2T$) permet de construire des diagrammes ombrothermiques traduisant la durée de la saison sèche d'après les intersections des deux courbes. Elle est appliquée pour les quatre stations (Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal), on remarque la succession de deux saisons, la première dite la saison humide se caractérisant par une forte pluviométrie et une faible température, elle s'étend du fin de septembre jusqu'au mois de mai. Au cours de cette période, les précipitations sont importantes atteignant leur maximum aux mois de décembre et janvier avec 110.8 mm à la station Les Salines, 100.5 mm à Pont Bouchet, 97.32 mm à Ain Berda et 133.9 mm à la station de Berrahal.

La saison sèche occupe le reste des mois, c'est-à-dire du mois de mai jusqu'au mois de septembre. Au cours de cette période les températures maximales sont atteintes, elles sont de l'ordre de 25.55 °C (fig.13).

4. Bilan hydrique

Le but du bilan hydrique est d'établir une équation d'équilibre entre les apports et les pertes qui influent directement sur la variation des réserves, il est indispensable d'évaluer ses composantes (infiltration, écoulement et évapotranspiration).



Figure 13: Courbes pluviothermiques des stations Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975-2010) et Berrahal (1981-2006).

Le bilan hydrique est calculé par la formule suivante : P = ETR + R + I

Avec ;

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

ETR : Evapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm).

- R : Ruissellement moyen annuel (mm).
- I : Infiltration moyenne annuelle (mm).

4.1. Evapotranspiration

L'évapotranspiration constitue l'élément le plus important du bilan hydrologique après les précipitations. Elle résulte de la combinaison de deux phénomènes ; l'évaporation (processus physique) et la transpiration (phénomène biologique), on distingue ;

- Evapotranspiration potentielle (ETP).
- Evapotranspiration réelle (ETR).

4.1.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)

C'est la quantité maximale d'eau pouvant s'évaporer et respirer sur une surface limitée et pendant une période bien définie.

Pour l'estimation de l'évapotranspiration, on utilise les deux formules suivantes :

4.1.1.1. Formule de Serra

$$ETP = 16 * (10t / I)^{a}$$

$$i = 0.09 * t^{3/2}, \quad I = \sum i$$

$$a = (1.6/100) * I + 0.5$$

Avec;

ETP : Evapotranspiration potentielle mensuelle (mm).

- t : Température moyenne mensuelle (°C).
- i : Indice thermique mensuel.

L'application de la formule de Serra conduit aux résultats réunis dans le tableau suivant ;

Tableau 8: Résultats de l'ETP (en mm) selon la formule de Serra.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
i	9.90	7.85	5.43	4.17	3.54	3.65	4.28	5.32	7.02	9.10	11.37	11.62	83.25
ЕТР	102.56	77.01	49.32	35.68	29.23	30.40	36.45	47.87	67.16	92.59	120.93	124.62	813.82

4.1.1.2. Formule de C.W. Thornthwaite (1948)

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

ETP : Evapotranspiration mensuelle (mm).

- T : Température moyenne mensuelle (°C).
- I : Indice thermique annuel; $I = \sum i$.
- i : Indice thermique mensuel, déterminé par l'expression; $i = (T/5)^{1.5}$
- a : Coefficient calculé par la formule; a = 1.6 (I/100) + 0.5
- K : Coefficient de correction.

Les résultats du calcul de l'ETP sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 9: Résultats de l'ETP (en mm) selon la formule de C.W Thornthwaite.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
i	9.83	7 .79	5.41	4.14	3.51	3.63	4.27	5.30	6.97	9.04	11.31	11.55	84.75
ЕТР	104.09	67.97	35.75	24.19	20.61	22.87	36.36	53.46	86.05	119	156.1	149.37	875.82

4.1.2. Evapotranspiration réelle (ETR)

Par définition, on appel évapotranspiration réelle effective actuelle ou encore déficit d'écoulement, la somme de l'évapotranspiration et de transpiration réelle pour une surface donnée. Pour le calcul de l'évapotranspiration réelle, nous utilisons les formules suivantes :

4.1.2.1. Formule de Coutagne (1954)

La formule de Coutagne permet de calculer l'évapotranspiration réelle en faisant intervenir la pluviométrie et la température.

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

Avec; $\lambda = 1 / (0.8 + 0.14T)$

ETR : Evapotranspiration réelle (mm/an).

- *P* : Précipitations moyennes annuelles (mm/an).
- T : Température moyenne annuelle (°C).

Elle est applicable pour la condition suivante : $\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda}$

Les résultats obtenus sont englobés dans le tableau suivant ;

Stations	T ℃	λ	1/2λ	P(m)	1/8λ	ETR(m)	ETR (mm)
Les salines				0.67300		0.54000	537,12
Pont Bouchet	17.77	0.30	1.67	0.61450	0.42	0.50115	501.22
Ain Berda				0.63095		0.51153	511,52
Berrahal	17.90			0.68777		0.54586	545.86

Tableau 10: Résultats de l'ETR (en mm) d'après la formule de Coutagne.

4.1.2.2. Formule de Turc (1961)

Cette formule tient compte de la durée de l'insolation et applicable à tous les types de climats, la formule est la suivante :

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

Où ; P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

 $L = 300 + 25T + 0.05T^3$; pouvoir évaporant de l'atmosphère.

T: Température moyenne annuelle (°C).

ETR : Evapotranspiration réelle (mm).

Les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant ;

Tableau 11: Résultats de l'évapotranspiration réelle (en mm) d'après la formule de Turc.

Stations	P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm)
Les Salines	673			583.29
Pont Bouchet	614.50	17.77	1024.81	547.54
Ain Berda	630.95			557.89
Berrahal	687.77	17.90	1034.27	593.66

4.2. Ruissellement

L'évaluation du ruissellement est impérative pour estimer l'importance de l'érosion mécanique et chimique qui affecte la surface du sol, il est calculé selon deux formules :

- Formule de Tixeront Berkaloff; $R = P^3 / 3 * ETP^2$, si : P < 600 mm
 - Formule de Tixeront Berkaloff modifiée par Romantchouk (1974) (in Daifallah, 2008);

$$R = P^3 / 3$$
, si : $P > 600 mm$

Avec : P : Précipitations moyennes annuelles (mm),

ETP : Evapotranspiration potentielle annuelle (mm),

R : Ruissellement (mm).

Les résultats sont représentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 12: Résultats du ruissellement (en mm) selon la formule de Tixeron-Berkaloffmodifiée par Romantchouk

Stations	P (mm)	R (mm)
Les Salines	673	101.60
Pont Bouchet	614.50	77.35
Ain Berda	630.95	83.73
Berrahal	687.77	108.44

4.3. Infiltration

L'infiltration est calculée à partir de la formule générale du bilan ;

 $P = ETR + I + R \quad \Rightarrow \quad I = P - ETR - R$

Avec : ETR : Evapotranspiration réelle (mm) (selon Thornthwaite).

Les résultats du bilan hydrologique sont récapitulés dans le tableau suivant ;

Tableau 13: Résultats du bilan hydrologique (en mm).

Stations	P (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
Les Salines	673	463.51	101.60	107.89
Pont Bouchet	614.50	446.14	77.35	91.01
Ain Berda	630.95	455.64	83.73	91.58
Berrahal	687.77	449.97	108.44	129.36

5. Bilan hydrique selon la formule de C.W Thornthwaite

C'est la méthode la plus utilisée pour les climats sub-humides et semi-arides, elle permet de quantifier ou d'évaluer la répartition des précipitations entre les différentes composantes du bilan hydrique (écoulement, infiltration et évapotranspiration). Il permet également de cerner plus précisément la notion de sécheresse.

L'estimation de l'évapotranspiration réelle établie par la méthode de Thornthwaite est liée au volume de précipitations ; trois cas peuvent se présenter :

1^{er} Cas: (P ≥ ETP ⇒ ETR = ETP): Il y a reconstitution des réserves du sol jusqu'à saturation (un sol saturé, quand il aura absorbé une lame d'eau équivalente à une précipitation de 100 mm), le surplus représentera l'écoulement superficiel.

- 2^{eme} Cas: (P < ETP ⇒ ETR = P + RFU): Dans ce cas, on puisera dans les réserves du sol jusqu'à satisfaction de l'ETP.
- 3^{eme} Cas : $(P < ETP \text{ et } RFU = 0 \Rightarrow ETR = P)$: Dans ce cas, on aura un déficit qui représentera la quantité d'eau a apporté pour l'irrigation (déficit agricole).

Les tableaux (14, 15, 16, 17) résument les calcules du bilan hydrologique pour les quatre stations : Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal.

	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Total
P (mm)	37.2	68.5	90.3	110.8	98.1	74.8	67.1	61.1	38.2	14.6	2.7	9.6	673
T (°C)	22.96	19.67	15.39	12.91	11.56	11.80	13.13	15.18	18.26	21.71	25.18	25.54	17.77
i	9.83	7.79	5.41	4.14	3.51	3.63	4.27	5.30	6.97	9.04	11.31	11.55	I=84.75
К	1.05	0.91	0.75	0.70	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	/
ETP (mm)	104.09	67.97	35.75	24.19	20.61	22.87	36.36	53.46	86.05	119	156.1	149.37	875.82
ETR(mm)	37.2	67.97	35.75	24.19	20.61	22.87	36.36	53.46	86.05	66.75	2.7	9.6	463.51
RFU(mm)	0	0.53	55.08	100	100	100	100	100	52.15	0	0	0	/
EXC(mm)	0	0	0	41.69	77.49	51.93	30.74	7.64	0	0	0	0	209.49
DA (mm)	66.89	0	0	0	0	0	0	0	0	52.25	153.40	139.77	412.31

Tableau 14: Bilan hydrique d'après la formule de Thornthwaite (Les Salines 1975-2010).

Tableau 15: Bilan hydrique d'après la formule de Thornthwaite (Pont Bouchet 1975-2010).

	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Total
P (mm)	38.8	55.5	87.2	100.5	89.5	66.2	60.3	57.9	34.8	12.2	2.4	9.2	614.50
T (°C)	22.96	19.67	15.39	12.91	11.56	11.80	13.13	15.18	18.26	21.71	25.18	25.54	17.77
i	9.83	7.79	5.41	4.14	3.51	3.63	4.27	5.30	6.97	9.04	11.31	11.55	I=84.75
K	1.05	0.91	0.75	0.7	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	/
ETP (mm)	104.09	67.97	35.75	24.19	20.61	22.87	36.36	53.46	86.05	119	156.1	149.37	875.82
ETR (mm)	38.8	55.5	35.75	24.19	20.61	22.87	36.36	53.46	86.05	60.95	2.4	9.2	446.14
RFU (mm)	0	0	51.45	100	100	100	100	100	48.75	0	0	0	/
EXC (mm)	0	0	0	27.76	68.89	43.33	23.94	4.44	0	0	0	0	168.36
DA (mm)	65.29	12.47	0	0	0	0	0	0	0	58.05	153.7	140.17	429.68

	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Total
P (mm)	40.23	54.13	79.59	97.32	94.01	68.10	65.90	63.63	42.53	13.60	2.59	9.32	630.95
T (°C)	22.96	19.67	15.39	12.91	11.56	11.80	13.13	15.18	18.26	21.71	25.18	25.54	17.77
i	9.83	7.79	5.41	4.14	3.51	3.63	4.27	5.30	6.97	9.04	11.31	11.55	I=84.75
К	1.05	0.91	0.75	0.70	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	/
ETP (mm)	104.09	67.97	35.75	24.19	20.61	22.87	36.36	53.46	86.05	119	156.1	149.37	875.82
ETR (mm)	40.23	54.13	35.75	24.19	20.61	22.87	36.36	53.46	86.05	70.08	2.59	9.32	455.64
RFU (mm)	0	0	43.84	100	100	100	100	100	56.48	0	0	0	/
EXC (mm)	0	0	0	16.97	73.4	45.23	29.54	10.17	0	0	0	0	175.31
DA (mm)	63.86	13.84	0	0	0	0	0	0	0	48.92	153.51	140.05	420.18

Tableau 16: Bilan hydrique d'après la formule de Thornthwaite (Ain Berda 1975-2010).

 Tableau 17: Bilan hydrique d'après la formule de Thornthwaite (Berrahal 1981-2006).

	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Total
P (mm)	30.11	58.04	94.51	133.88	111.41	80.75	58.22	60.26	38.85	11.97	3.47	6.30	687.77
T (°C)	23.08	20.03	15.68	13.14	11.54	11.63	13.26	15.20	18.31	21.96	25.09	25.84	17.90
Ι	9.92	8.02	5.55	4.26	3.51	3.55	4.32	5.30	7.01	9.20	11.24	11.75	I =83.63
K	1.05	0.91	0.75	0.70	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	/
ETP(mm)	108.77	72.63	38.15	25.72	21.12	22.89	38.11	55.24	89.31	125.73	160.66	158.13	916.46
ETR(mm)	30.11	58.04	38.15	25.72	21.12	22.89	38.11	55.24	89.31	61.51	3.47	6.3	449.97
RFU(mm)	0	0	56.36	100	100	100	100	100	49.54	0	0	0	/
Exc(mm)	0	0	0	64.52	90.29	57.86	20.11	5.02	0	0	0	0	237.8
DA (mm)	78.66	14.59	0	0	0	0	0	0	0	64.22	157.19	151.83	466.49

5.1. Interprétation du bilan de Thornthwaite

L'interprétation du bilan hydrologique calculé par la méthode de Thornthwaite pour les quatre stations, nous a permis de constater qu'il y a deux périodes (fig.14):

Une période hivernale s'étale du mois d'octobre à avril, caractérisée par des précipitations importantes d'ordre de 570.7 mm à la station Les Salines, 517.1 mm à Pont Bouchet, 522.68 mm à Ain Berda et 597.07 mm à Berrahal. Tandis que, l'évapotranspiration est réduite avec une valeur de 261.21 mm aux trois premières stations et 273.86 mm à Berrahal.

La reconstitution du stock se fait à partir d'octobre et l'écoulement se manifeste à partir de décembre et se poursuit jusqu'à avril. Durant cette période, la quantité coulée est égale à 209.49 mm à la station Les Salines, 168.36 mm à Pont Bouchet, 175.31 mm à Ain Berda et 237.8 mm à Berrahal.



DA : Déficit agricole, SE : Surplus d'eau, ES : Epuisement du stock

Figure 14: Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite aux stations ; Les Salines, Pont Bouchet et Ain Berda (1975-2010) et Berrahal (1981-2006)

Une période estivale qui s'étale de mai jusqu'à septembre où l'évapotranspiration potentielle (ETP) est nettement supérieure aux précipitations. Le stock commence à épuiser pour se vider complètement en juin, accompagné d'un déficit agricole, qui atteint son maximum en juillet, ce qui signifie que l'irrigation doit commencer à partir de ce mois, et devient indispensable en juillet, août et septembre.

Les résultats représentés par le tableau ci-dessous (tab.18) montrent une différence entre les résultats des diverses méthodes de mesure. Malgré cela, la méthode de Thornthwaite reste la plus appropriée pour de tels calculs, car elle contient un facteur de correction K qui intègre la durée d'insolation. L'observation des valeurs de l'ETR montre que les valeurs de la station Les Salines sont supérieures à celles des stations de Pont Bouchet et Ain Berda durant la période (1975-2010).

Stations Méthode	ETR (mm/an) Les Salines	ETR (mm/an) Pont Bouchet	ETR (mm/an) Ain Berda	ETR (mm/an) Berrahal
Thornthwaite	463.51	446.14	455.64	449.97
Coutagne	537.12	501.22	511.52	545.86
Turc	583.29	547.54	557.89	593.66

Tableau 18: Valeurs de l'évapotranspiration réelle selon les différentes méthodes.

6. Conclusion

L'analyse des données climatiques des quatre stations météorologiques (Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal), nous a permis d'attribuer à la région d'étude un climat méditerranéen à deux saisons ; l'une froide et humide s'étend du fin de septembre jusqu'au mois de mai, et l'autre chaude et sèche occupe le reste des mois.

La région d'étude reçoit des précipitations annuelles moyennes de l'ordre de : 673 mm (Les Salines), 614.5 mm (Pont Bouchet), 630.95 mm (Ain Berda), 687.77 mm (Berrahal) et une température moyenne annuelle de l'ordre de 17.77 °C enregistrée à la station Les Salines. La reconstitution du stock commence en novembre et s'achève en avril. L'épuisement du stock du sol s'observe en mai, ce qui provoque un déficit agricole (DA) nécessitant une irrigation surtout pour la période allant de juin jusqu'à octobre.

B. Hydrologie

1. Introduction

D'une façon générale, l'hydrologie peut se définir comme l'étude du cycle de l'eau et l'estimation de ses différents flux. Le cycle de l'eau, appelé aussi cycle hydrologique, est l'ensemble des cheminements que peut suivre une particule d'eau. Ces mouvements, accompagnés de changements d'état, peuvent s'effectuer dans l'atmosphère à la surface du sol et dans le sous-sol *(Laborde, 2000)*. La composition des eaux des cours d'eau affluents du lac Fetzara est variée selon l'intensité du débit, et est affectée par l'érosion et la nature géologique des sols qui se trouvent sur leurs parcours (bassin versant).

2. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du bassin versant. La définition d'un cours d'eau est difficile à donner avec précision, en particulier pour les cours d'eau temporaires.

Les eaux du lac Fetzara proviennent des montagnes environnantes, en dehors des nombreuses châabates (ruisseaux) en provenance des massifs environnants. Le lac est alimenté par les eaux des principaux oueds ; Zied, El Hout et Mellah.

- *Oued El Hout* au Sud, c'est le plus important cours d'eau alimentant le lac, il prend sa source à djebel Menchoura qui culmine à 795 m d'altitude (Tell Nord Guelmien), il s'écoule du Sud au Nord sur une longueur de 10 km.

- *Oued Zied* au Nord, qui a creusé sa vallée entre djebel Edough et djebel Bougantas, prenant naissance à environ 900 m d'altitude. Il s'écoule du Nord vers le Sud-Ouest sur une longueur de 10.5 km et débouche dans le lac Fetzara.

- *Oued Mellah* à l'Ouest, qui naît sur l'élévation de Koudiat Guendoul (100 - 130 m d'altitude) et prend sa source aux alentours de l'oued El Kébir Ouest. Il s'écoule de l'Ouest vers le canal d'assèchement du lac, avec une longueur à peu prés de 8 km.

Les cours d'eau alimentant le lac Fetzara sont caractérisés par un régime très irrégulier, torrentiel en hiver et sec en été, ce qui dénote une variation importante des apports au lac, ces derniers sont importants en saison pluvieuse et sont inexistants en période de sècheresse à l'exception de l'oued El Hout continuant seule à alimenter le site *(DGF, 2003)*. Les nombreux affluents constituent également un apport non négligeable de la cuvette du lac à un débit de 141 à 145 m³/s *(Marre, 1992)*.

Le drainage des eaux est assuré par le canal principal d'assèchement qui traverse le centre du lac, dont le but est de garder un bon équilibre d'écoulement à l'intérieur du lac, maintenir le niveau du lac à une certaine profondeur et lutter contre les inondations dans la partie aval *(Zenati, 2010)*. Ce canal se termine par un pont-vanne qui assure l'alimentation de l'oued Meboudja, ce dernier se déverse au niveau de l'oued Seybouse qui débouche dans la mer Méditerranée un peu plus à l'Est du site *(DGF, 2003)*. Cependant, cette évacuation des eaux reste insuffisante, provoquant ainsi des phénomènes d'hydromorphie à cause des effets d'inondation et aussi une grande salinisation *(Habes, 2006)*.

Le bassin versant du lac Fetzara est constitué de 30 sous-bassins versants petits et moyens avec une superficie totale de l'ordre de 515 Km² (*AJCI, 1985*).

Au Sud du bassin versant, se trouve une ligne de partage des eaux située entre 300 et 400 mètres d'altitude est relativement vaste et onduleux avec une légère pente en direction du lac.

Au Nord, la ligne de partage des eaux se situe à une hauteur d'environ 100 mètres avec une pente raide, mis à part les versants de l'oued Zied constitués de montagnes dont la hauteur s'élève à plus de 100 mètres. La ligne de partage des eaux des parties Ouest et Est se situe entre 20 et 30 mètres, le débit d'écoulement est estimé à 210 mm par jour en moyenne *(DGF, 2003)*.

Le bassin versant du lac Fetzara est composé essentiellement de trois principaux sous-bassins, on note ceux des oueds Zied, El Hout et Mellah, dont les superficies sont respectivement de 19 km², 81 km² et 47 km², représentant 29 % de la superficie totale du bassin versant. Ils font partie du réseau hydrographique endoréique (fig.15 et tab.19).

	Princi	paux sous bassir	is versants	Ruissaux et autres sous bassins versants mineurs			
Paramètres	Oued Zied	Oued Mellah	Oued El Hout	Versant Nord	Versant Sud- Ouest	Versant Sud-Est	
Superficie (km ²)	19 km ²	47 km ²	81 km ²	138 km ²	114 km^2	116 km^2	
Longueur (km)	10,5 km	8 km	10 km				
Superficie (%)	3.69 %	9.13 %	15.73 %	26.80 %	22.13 %	22.52 %	
Bassin versant du lac Fetzara 515 Km ²							

Tableau 19: Quelques caractéristiques d	les sous bassins versants du lac Fetzara.
---	---



Figure 15: Bassin versant du lac Fetzara.

3. Régime hydrologique

3.1. Lac Fetzara

La dépression du lac Fetzara a une superficie d'environ 18600 ha, elle est enserrée entre le massif de l'Edough au Nord, les monts de Ain Berda au Sud, et les deux cordons d'origine dunaire à l'Est (El Kantra) et à l'Ouest (Berrahal) *(Habes, 2006)*. Les eaux du lac Fetzara sont collectées à partir des oueds El Hout, Mellah et Zied, ainsi que celles qui se déversent le long des pentes périphériques *(DGF, 2003)*.

La superficie submergée en hiver est de l'ordre de 5800 hectares *(AJCI, 1985)*. La partie la plus profonde du lac est formée par sédimentation à une altitude d'environ 10 mètres *(DGF, 2003)*. Durant la saison pluvieuse, l'eau remonte jusqu'à la côte 12 m environ, soit à 2 m du niveau centre du lac. Cet aspect temporaire, la succession de périodes d'assèchement et de mise en eau rend particulièrement intéressant le lac en vue de la minéralisation

renouvelée à chaque saison, ce qui crée un milieu extrêmement favorable pour l'alimentation des oiseaux hivernants et notamment les Anatidés de surface et les Foulques.

Le drainage du site a lieu tout au long de l'année par l'intermédiaire du canal principal, dont les eaux d'évacuation se déversent dans l'oued Meboudja, vont ensuite, dans l'oued Seybouse qui débouche dans la mer. Durant la saison estivale, les précipitations étant presque nulles, le lac devient complètement sec, ceci est dû principalement à la détérioration de l'écluse du canal principal d'évacuation situé à El Kantra à l'Est du lac. En fin, les caractéristiques hydrologiques du lac sont la maîtrise des crues, la rétention des sédiments et des nutriments et la recharge de la nappe aquifère.

3.2. Régime des affluents du lac Fetzara

Les débits des oueds El Hout, Mellah, Zied et Meboudja au niveau du pont-vanne sont assez mal connus ; ceci est dû à l'absence de stations de jaugeages, pour cela nous avons utilisé une méthode indirecte dans la détermination des débits. Il s'agit de l'exploitation du champ des vitesses ; ceci consiste à mesurer les vitesses d'écoulement et à déterminer d'après celles-ci le débit (produit de la vitesse par la section d'écoulement).

Les mesures sont effectuées au niveau de quatre points pour les trois oueds (El Hout, Mellah et Zied) qui sont considérés comme des entrées du lac, et au niveau du pont-vanne pour l'oued Meboudja qui est considérée comme une sortie. Ces mesures nous ont permis d'apprécier l'évolution des débits des différents oueds, de ce fait nous avons essayé de comparer les moyennes des débits mesurés durant la période de janvier jusqu'en mai 2007 *(in Zahi, 2008)* avec les moyennes des débits mesurés par *Habes (2006)* durant une période s'étalant du mois de décembre 2004 jusqu'au mois de mars 2005.

L'année d'observation (2004/2005) est caractérisée par une saison d'hiver très pluvieuse, avec des quantités des précipitations d'ordre de 185 mm, 135 mm et 179 mm, respectivement pour les mois de décembre 2004, janvier et février 2005. Ces fortes précipitations se traduisant par de forts débits, surtout pour l'oued Meboudja. Par contre, l'année (2006/2007) est une année exceptionnelle caractérisée par une saison d'hiver plus ou moins sèche, tandis que des quantités de précipitations sont enregistrées pendant la période qui s'étale entre février et mars 2007, dont la forte quantité est traduite par la crue du 12 mars qui a engendré une montée des eaux de ruissellement avec débordement.

3.2.1. Oued El Hout

L'allure des courbes établies montrent que les débits durant la période qui s'étale entre décembre 2004 et mars 2005, varient de 0.37 à 2.69 m³/s (fig.16-A); ces forts débits résultent des grandes quantités des précipitations, avec 185 mm en décembre 2004, 135 mm en janvier 2005 et 179 mm en février.

Durant la deuxième période (janvier 2007 - mai 2007), l'allure des courbes montre que les forts débits sont enregistrés durant la période qui s'étale entre le 12 et le 25 mars (fig.16-A), un pic est observé le 12 mars avec un débit de 10.23 m³/s, à l'exception de cette période, la variation des débits oscille entre 5 10^{-3} et 0.551 m³/s.

3.2.2. Oued Mellah

La courbe d'évolution du débit de l'oued Mellah durant la période (décembre 2004 – mars 2005) montre des valeurs oscillant entre 0.46 et 2.68 m³/s (fig.16-B), avec trois pics assez importants enregistrés pendant les mois de décembre (2.19 m³/s), janvier (1.49 m³/s) et février (2.27 m³/s).

Durant la deuxième période (janvier 2007 – mai 2007), les forts débits sont enregistrés pendant la même période que celle de l'oued El Hout où la plus forte valeur de débit est enregistrée le 12 mars avec un débit d'ordre de 16 m³/s (fig.16-B), alors que la plus faible valeur est enregistrée le 22 février avec un débit de $1.15 \ 10^{-3} \ m^3$ /s. Le tarissement de l'oued débute à partir du 10 mai 2007.

3.2.3. Oued Zied

D'après la courbe de la période (décembre 2004 - mars 2005), on observe un pic enregistré au cours du mois de février 2005 avec une valeur de $3.21 \text{ m}^3/\text{s}$ (fig.16-C), le reste du tracé reflète des débits variant entre 0.47 et $3.21 \text{ m}^3/\text{s}$.

L'allure de la courbe des débits de l'oued Zied durant la deuxième période (janvier 2007 - mai 2007) est analogue à celles des oueds Mellah et El Hout, elle fait montrer un fort débit enregistré le 12 mars avec une valeur de 2.92 m³/s (fig.16-C). Le reste des débits variant entre $1.284 \ 10^{-2}$ et 2.37 m³/s.



Figure 16: Courbes d'évolutions des débits au niveau des oueds ; El Hout, Mellah, Zied et Meboudja (déc 2004 – mars 2005) et (jan 2007 – mai 2007).

3.2.4. Oued Meboudja

L'évolution des débits au niveau de l'oued Meboudja dépend de l'ouverture de la vanne, ils varient entre 6.95 et 13.75 m³/s au cours de la période (décembre 2004 - mars 2005). Les valeurs maximales (> 13 m³/s) sont enregistrées durant le 7 et 14 janvier et le 4 février 2005 (fig.16-D). Par contre, pendant la deuxième période (janvier 2007- mai 2007), les fortes valeurs enregistrées le 12, 13 et 22 mars avec des débits respectivement de 2.35 m³/s, 2.02 m³/s et 3.68 m³/s, le reste des valeurs oscillent entre 0.416 et 1.23 m³/s.

4. Conclusion

Les eaux du lac Fetzara proviennent des montagnes environnantes, elles sont collectées à partir de trois principaux oueds, El Hout au Sud, Mellah à l'Ouest et Zied au Nord-Est ; les trois oueds sont canalisés et leurs eaux sont évacuées par l'oued Meboudja.

Cette partie nous a permis de donner un aperçu exhaustif des valeurs des débits. Les apports d'eau vers le lac sont tributaires des précipitations, étant donné que les débits atteignent le maximum durant les mois de janvier et février 2005, où les précipitations mensuelles dépassent les 130 mm pour la première période d'observation (décembre 2004 – janvier et février 2005). Durant la crue du 12 mars de la deuxième période (janvier 2007 – mai 2007), où les précipitations dépassent les 100 mm durant 72 heures (station de pont Bouchet) avec des débits d'ordre de 10.23 m³/s, 15.99 m³/s et 2.92 m³/s respectivement pour les oueds El Hout, Mellah et Zied ; par contre l'évolution des débits de oued Meboudja dépend de l'ouverture de la vanne.

Chapitre IV

ETUDE

HYDROGEOLOGIQUE

1. Introduction

Dans le but de mieux comprendre, décrire et expliquer par une approche géochimique les différents processus responsables de la salinisation des sols et la qualité des eaux de surface et souterraines de la région du lac Fetzara. Il est nécessaire de bien connaitre les caractéristiques hydrogéologiques et hydrodynamiques de la région d'étude, les processus d'alimentation des aquifères, le sens d'écoulement et les relations existantes entre les différents systèmes (nappes – lac – oueds).

Plusieurs études géologiques et hydrogéologiques ont été effectuées sur la région de Annaba et nous ont permis de distinguer plusieurs systèmes aquifères, dont les potentialités hydrauliques sont différentes.

2. Description des différents aquifères

Les études menées ont permis de déterminer la lithologie, la géométrie et les caractéristiques hydrodynamiques des différentes nappes aquifères d'importance quantitative et qualitative inégale vis-à-vis de l'étendue, notamment l'aquifère superficiel et l'aquifère profond.

2.1. Les nappes superficielles

Selon le changement spatiale de la nature lithologique des aquifères superficiels, on peut distinguer deux nappes principales :

2.1.1. La nappe des gneiss altérés

Elle se localise dans la région Nord-Est du lac Fetzara, sur le flanc Est des massifs métamorphiques de Bouhamra et Beleleita (fig.17). La nappe est alimentée par les eaux de pluie, son épaisseur moyenne est de 15 m. Elle est exploitée par des puits et des forages pour divers usages (industrie, élevage, alimentation humaine), avec un débit moyen des captages d'ordre de 2 l/s et elle est caractérisée par une perméabilité qui oscille entre 10^{-6} et 10^{-5} m/s (*Derradji et al., 2005*).

2.1.2. La nappe des alluvions

Cette nappe est répandue sur la majorité de la plaine d'Annaba (fig.17). D'après la géomorphologie de la région, nous pouvons diviser la nappe en deux régions communiquant entre elles à travers le cordon dunaire d'El Kantra, dont la texture est différente (sables).

• La région Est présente une nappe superficielle continue localisée dans la plaine Ouest d'El Hadjar ainsi que dans la région d'Allélick. Elle est limitée par les alluvions de haut

niveau et les grès numidiens au Sud, le massif dunaire de Bouteldja au Nord, les argiles et les grès numidiens à l'Est et le cordon dunaire d'El Kantra à l'Ouest.

La région Ouest est une nappe superficielle discontinue qui entoure le lac Fetzara.
 Elle est limitée par le Tell Nord Guelmien au Sud, le massif de l'Edough au Nord, le cordon dunaire d'El Kantra à l'Est et par la plaine de Guerbes à l'Ouest.

La lithologie de cette nappe est constituée par des alluvions récentes (sables, limons, argiles) avec une texture argilo-sableuse et argilo-limoneuse. Elle est caractérisée par des valeurs de transmissivité oscillant entre 2.14 10^{-3} m²/s et 4.2 10^{-3} m²/s (*Zenati et al., 2010*), son épaisseur varie entre 2 et 10 m, donc à potentialités hydrauliques très limitées.

La capacité d'infiltration de l'eau dans le sol est moyenne d'ordre de 0.05 à 0.10 m/j. La nappe superficielle est fortement exploitée par des puits surtout et quelques forages. L'alimentation de cette nappe se fait par les précipitations et par les crues des oueds *(Zenati, 1999 ; Belhamra, 2001)*.



Figure 17: Situation géographique des nappes superficielles de la plaine de Annaba (in Zenati, 1999).

2.2. Les nappes profondes

Nous distinguons deux nappes aquifères d'inégales extensions, l'une à cipolins et l'autre à graviers:

2.2.1. La nappe des cipolins (formations métamorphiques)

Elle est contenue dans les lentilles des calcaires métamorphiques fissurés des massifs de Bouhamra et Beleleita, en contact avec la nappe des graviers (plaine Ouest de Annaba). Elle profonde de 12 à 80 m, avec une épaisseur qui ne dépasse pas les 70 m et leur superficie est inférieure à 100 ha *(Hani, 2003)*. Les débits d'exploitation des forages sont de l'ordre de 15 l/s, la transmissivité varie entre 5 10^{-5} et 10^{-3} m²/s *(Derradji et al., 2005)* et la perméabilité entre 10^{-6} et 10^{-5} m/s *(Zenati, 2010)*.

2.2.2. La nappe des graviers

Cette nappe est tantôt libre tantôt captive, avec une épaisseur très variable selon les zones, elle varie de 2 à 70 m (fig.18). La nappe est captive dans la région d'Annaba en dessous de la nappe superficielle et devient libre dans la région de Dréan. Cette nappe pourrait, dans certains cas, être alimentée partiellement par une drainance à partir de la nappe superficielle *(Derradji et al., 2005)*. Elle est contenue dans les graviers dans sa partie captive, par contre elle est constituée de sables et de galets du Plio-Quaternaire dans sa partie libre.



Figure 18: Coupe schématique du système aquifère de la région de Annaba (Derradji & al., 2005).

Cette nappe est caractérisée par une perméabilité qui varie de 10^{-4} à 10^{-5} m/s et une transmissivité oscillant entre 3 10^{-2} et 3.5 10^{-3} m²/s dans la région de Dréan, entre 4 10^{-2} et 5 10^{-3} m²/s au Nord de Ben M'Hidi et dans la région de la Mafragh et entre 10^{-3} et 2 10^{-3} m²/s dans la région de Bouteldja. Le coefficient d'emmagasinement est parfois très faible de l'ordre de 10^{-4} où la nappe est captive et atteint 10^{-2} où elle est libre *(Derradji et al., 2005 ; Zenati, 2010)*.

3. Caractéristiques de la nappe superficielle entourant le lac

3.1. Inventaire des points d'eau

Six campagnes de mesures piézométriques ont été effectuées durant une période s'étalant du décembre 2006 jusqu'à mai 2007, afin de suivre les variations piézométriques de la nappe superficielle aux alentours du lac Fetzara *(Zahi, 2008)*. Pour cet objectif, quarante huit (48) puits ont été inventoriés et reportés sur la carte topographique de la zone d'étude ; ils sont répartis de manière relativement homogène, ce qui a permis l'élaboration de six (6) cartes piézométriques, En général les eaux de la majorité des puits sont destinées à l'alimentation en eau potable (AEP) et à l'irrigation (fig.19).

Ce suivi des fluctuations piézométriques nous permettra de comprendre le comportement et le fonctionnement du système aquifère et ses relations qui peuvent exister avec les eaux superficielles (oueds et lac Fetzara). Les cartes piézométriques ont été élaborées par un traitement automatique, en utilisant le logiciel « *Surfer 10 » (Golden Software)*.



Figure 19 : Carte d'inventaire des puits dans la région du lac Fetzara.

3.2. Interprétation des cartes piézométriques

• Carte piézométrique décembre 2006

L'allure générale des courbes isopièzes montre que l'écoulement suit parfaitement la topographie de la plaine, il se caractérise par des lignes de courant dirigées vers le lac Fetzara dans sa partie centrale (fig.20), par contre au niveau de la zone Est l'écoulement est dirigé vers oued Meboudja.

Les courbes isopièzes sont serrées au niveau des bordures Nord et au Nord-Ouest du lac, ce qui traduit un fort gradient hydraulique de l'ordre de 0.66 10⁻². À l'approche du lac l'espacement des courbes devient important, ce qui signifie une baisse du gradient, à ce niveau il est de 0.25 10⁻². Ce changement dans la vitesse d'écoulement traduit un changement de la perméabilité, cette dernière faible au début devient importante caractérisant ainsi un changement latéral de faciès.

Sur les zones Sud et Sud-Est, on observe une répartition inverse par rapport à la précédente, les courbes espacées sur les bordures traduisant un faible gradient 0.42 10⁻³, se resserrent avant de s'espacer à nouveau à proximité du lac, cette situation est générée par la variation de la perméabilité, confirmée par la présence de sols hydromorphes à texture très fine.



Figure 20: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (décembre 2006).

• Carte piézométrique janvier 2007

L'allure générale de cette carte montre une situation analogue à la précédente (fig.21), l'observation dans le détail, montre que l'oued Meboudja est alimenté par les eaux de la nappe, au niveau du cordon dunaire d'El Kantra. Le lac reste alimenté par ses alentours (nappe superficielle). Les courbes isopièzes sont serrées au Nord et Nord-Ouest du lac, ce qui signifie que le gradient est fort, il est de l'ordre de 0.71 10⁻². Par contre, elles sont espacées au Sud et Sud-Est du lac Fetzara, avec un gradient hydraulique faible d'ordre de 0.83 10⁻³. Cette répartition montre que les formations sont à affleurements et par conséquent les perméabilités ne sont pas les mêmes de part et d'autres du lac.



Figure 21: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (janvier 2007)

• Carte piézométrique février 2007

La carte montre des lignes de courant dirigées en général vers le lac Fetzara avec un gradient hydraulique variant entre 0.4 10⁻² et 0.5 10⁻². Au Sud-Est, les lignes piézométriques convergent vers l'oued Meboudja, ce qui révèle le drainage de la nappe par ce dernier, avec un gradient hydraulique faible d'ordre de 0.11 10⁻², indiquant l'existence d'une forte perméabilité (cordon dunaire d'El Kantra). Au Nord-Est, l'écoulement se fait vers l'Est, indiquant l'alimentation de la nappe par l'oued Zied (fig.22).

On observe aussi une dépression avec des courbes isopièzes fermées autour du puits 15, due au pompage intensif au niveau de ce puits destiné à l'irrigation. Ce qui provoque un drainage de l'oued El Hout.



Figure 22: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (février 2007).

• Carte piézométrique mars 2007

La carte piézométrique se ramenant au mois de mars présente la même allure que les cartes précédentes, avec un écoulement de direction Nord-Sud sur la partie Nord de la carte et Sud-Nord sur la zone Sud, indiquant le mode d'alimentation du lac (fig.23).

Les parties Sud et Sud-Est du lac Fetzara, se caractérisent par un gradient hydraulique oscillant entre $0.13 \ 10^{-2}$ et $0.5 \ 10^{-2}$, par contre au niveau de la zone Nord et Nord-Ouest, le gradient est de $0.83 \ 10^{-2}$, traduisant ainsi une faible perméabilité ou une pente importante des terrains (piémont du massif de l'Edough).

Au niveau de la partie Sud et contrairement aux cartes précédentes, nous notons que l'influence du pompage n'apparaît pas sur la carte, ceci s'explique par la saturation de la nappe, provoquée par les précipitations enregistrées au cours de ce mois (203.7 mm) ce qui provoque un affleurement de la nappe.



• Carte piézométrique avril 2007

Les courbes isopièzes sont toujours serrées au Nord du lac (piémont de l'Edough), avec un fort gradient hydraulique d'ordre de $0.91 \ 10^{-2}$. Elles sont espacées au Sud (El Eulma), avec un gradient d'ordre de $0.5 \ 10^{-2}$ et très espacées au Sud-Est (Cheurfa) (fig.24), où le gradient hydraulique diminue et devient $0.13 \ 10^{-2}$.

La variation des valeurs des gradients traduit un changement des perméabilités (faciès). La région Ouest est caractérisée par la présence des dépressions piézométriques avec un espacement irrégulier des courbes hydroisohypses, probablement provoqué par la présence des vertisols (sols lourds), un autre faciès et une autre perméabilité ; ce type de sols possède une texture très fine et présente un mauvais drainage.

• Carte piézométrique mai 2007

L'allure de la carte reste la même que la précédente, l'écoulement reste convergeant vers le lac sur ses limites Nord et Sud (fig.25). Le gradient hydraulique est toujours élevé au piémont de l'Edough avec une valeur d'ordre de 0.83 10⁻², mais en allant vers le lac, l'espacement des courbes isopièzes devient important et se traduit par un gradient d'ordre de 0.25 10⁻². Il est de 10⁻³ au Sud et de 0.47 10⁻² au Sud-Est du lac Fetzara (El Eulma); cette variation du gradient est liée à l'influence de la topographie et au


changement spatial de la perméabilité des terrains traversés. La région Ouest reste une zone d'accumulation des eaux, caractérisée par une évolution irrégulière du gradient hydraulique.

Figure 24: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (avril 2007).



Figure 25 : Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (mai 2007).

L'examen de l'ensemble des cartes piézométriques nous a amené aux constatations suivantes ;

- La morphologie de la surface piézométrique suit la surface topographique et son allure reste la même pendant toutes les campagnes.
- D'une manière générale, l'alimentation du lac se fait à partir de toutes les bordures, sur la limite Sud, c'est le Tell Guelmien, alors que pour la région Nord, c'est les massifs de l'Edough et Belélieta qui assurent cette alimentation.
- Le lac constitue une zone de convergences des eaux, en effet les eaux issues des bordures Nord-Ouest et Nord-Est vont alimenter le lac. C'est également le cas pour les eaux en provenance de bordures Sud.
- Deux types d'échanges semblent exister pour mettre en évidence une interconnexion entre les différents systèmes (lac, oued et nappe). Le premier met en évidence une alimentation du lac par la nappe et les bordures ; quant au second, il montre le drainage du lac et de la nappe par l'oued Meboudja. Par contre, la relation de la nappe avec les autres oueds (El Hout, Mellah et Zied) est non identifiée. Ceci est dû au fait que les oueds existants sont temporaires et présentent de très faibles débits.

3.3. Fluctuations du niveau piézométrique entre janvier 2007 et mai 2007

Afin d'étudier l'évolution du niveau piézométrique, nous avons considéré les mois de janvier et mai 2007, comme mois extrêmes. Les précipitations enregistrées au cours de ces mois sont de 35.4 mm pour le premier et de 17 mm pour deuxième. Les variations du niveau piézométrique entre les deux mois sont récapitulées dans le tableau 20.

L'allure de la carte de battement obtenue entre les deux mois (fig.26) est analogue aux différentes cartes piézométriques précédentes. D'après son allure, nous pouvons visualiser deux zones avec des tendances différentes :

- La zone à fort battement, se localisant au Nord-Ouest de la région d'étude (Berrahal), où les variations sont importantes et atteignent par endroits les six mètres.
- Les zones à faible battement, allant jusqu'à deux mètres, observées dans la majorité des puits situés tout autour du lac Fetzara.

La variation du niveau piézométrique constatée est due aux apports qui se font par les bordures. En effet, la zone Nord-Ouest se caractérise par des apports importants au cours de la saison pluvieuse (cf. cartes piézométriques). Par contre durant la saison sèche, nous notons une baisse significative du niveau piézométrique, correspondant à un manque d'apports. A titre indicatif, les précipitations enregistrées en janvier 2007 sont de 35.4 mm et d'ordre de 7 mm en mai 2007.

Duita	Janvier	Mai	Variations	Duita	Janvier	Mai	Variations
ruits	2007	2007	(m)	rults	2007	2007	(m)
P2	16.03	16.25	0.22	P25	22.47	23.55	1.08
P4	15.98	16.9	0.92	P26	16.95	18.42	1.47
P5	17	17.8	0.8	P27	12.83	14.35	1.52
P6	17.15	18.15	1	P29	20.51	24.35	3.84
P7	15.7	16.65	0.95	P30	17.29	17.64	0.35
P8	13.62	14.75	1.13	P31	14.41	21.15	6.74
P9	14.37	14.75	0.38	P32	26.48	29.95	3.47
P8	13.72	13.95	0.23	P33	17.67	18.05	0.38
P9	14.91	17	2.09	P34	16.22	16.58	0.36
P13	21.6	22.95	1.35	P35	14.79	15.45	0.66
P14	13.27	13.35	0.08	P36	20.71	21.55	0.84
P15	11.44	11.9	0.46	P3 7	14	14.8	0.8
P16	13.1	14.7	1.6	P38	14.37	15.75	1.38
P17	13.38	13.5	0.12	P39	12.73	14.2	1.47
P18	14.25	14.35	0.1	P40	10.84	11.2	0.36
P19	22.23	23.65	1.42	P41	11.32	11.4	0.08
P20	18.67	19.25	0.58	P42	12.57	12.9	0.33
P21	19.16	19.25	0.09	P43	12.06	12.45	0.39
P22	21.75	22.6	0.85	P44	12.33	12.45	0.12
P23	16.08	16.35	0.27	P45	13.25	14.3	1.05
P24	27.08	28.35	1.27				

Tableau 20: Variation du niveau piézométrique entre janvier 2007 et mai 2007.



Figure 26: Carte des fluctuations piézométriques entre janvier 2007 et mai 2007.

3.4. Gradient hydraulique

D'après l'allure des cartes piézométriques, l'espacement des courbes isopièzes varie d'une région à l'autre. Cette variation est fonction de l'écoulement et donc du gradient hydraulique.

Les résultats du calcul du gradient hydraulique effectué dans les différentes régions et pour les différentes campagnes sont reportés dans le tableau suivant (tab.21).

Les résultats obtenus montrent que le gradient hydraulique est directement lié au niveau piézométrique de la nappe ; les faibles valeurs du gradient hydraulique sont enregistrées en décembre caractérisé par une faiblesse des précipitations (142.7 mm), par contre les valeurs maximales du gradient hydraulique correspondent aux mois de mars et mai caractérisés par une pluviosité importante d'ordre de 203.7 mm.

Régions Mois	Nord	Nord-Ouest	Sud	Sud-Est
Décembre 2006	6.67	3.30	2.50	0.42
Janvier 2007	7.14	4.54	3.57	0.83
Février 2007	5.00	4.76	4.00	1.11
Mars 2007	8.33	5.00	5.00	1.25
Avril 2007	9.09	6.67	5.00	1.25
Mai 2007	8.33	5.55	4.76	1.00

Tableau 21: Gradient hydraulique de la nappe superficielle entourant le lac Fetzara (* 10⁻³).

4. Relations piézométrie, précipitations et recharge

➢ Relations piézométrie-précipitations : les mesures piézométriques réalisées nous permettent de déterminer la réponse de la nappe aux précipitations enregistrées. A cet effet, nous avons comparé l'évolution du niveau piézométrique au niveau de quelques puits avec les précipitations mensuelles enregistrées au niveau de la station Les Salines durant la période des mesures piézométriques (décembre 2006 - mai 2007) (fig.27).

Les résultats obtenus (tab.22) montrent que la profondeur de la surface piézométrique fluctue entre 1.09 et 8.8 m en période des basses eaux (décembre 2006), cette variation est due aussi à l'effet du pompage intensif au niveau de quelques puits destinés à l'irrigation et à l'alimentation en eau potable. La profondeur oscille entre 0.15 et 2.85 m en période des hautes eaux (mars 2007) où les précipitations dépassent les 200 mm durant ce mois, la nappe est sursaturée et le niveau piézométrique coïncide avec la surface topographique dans la plupart des puits. Ensuite, la profondeur augmente et devient entre 0.45 et 3.65 m

à la fin du mois de mai 2007 à cause des faibles précipitations qui n'atteignent pas les 20 mm durant ce mois (fig.27).



 Tableau 22: Fluctuations de la profondeur de la surface piézométrique (décembre 2006 – mai 2007).



> Relations piézométrie-infiltration efficace: afin de comprendre l'influence de l'infiltration efficace sur la recharge de la nappe, une étude comparative entre la réponse de la nappe durant les mois de février et mars 2007 et l'infiltration calculée durant le mois de février selon la méthode des chlorures établie par *Scholler (1962)*. C'est une méthode basée sur la reconcentration par évapotranspiration des apports en chlorures par les précipitations, et consiste à comparer les concentrations en chlorures dans les eaux de pluie et dans les eaux souterraines. L'utilisation de cette méthode est conditionnée par l'absence de roches salines pouvant se dissoudre, des chroniques d'eau de pluie suffisantes afin d'avoir une composition moyenne représentative, et une origine des chlorures uniquement due aux précipitations (*Hadj Saïd, 2007*).

Pour déterminer l'infiltration efficace, *Scholler (1962)* a développé un ensemble d'équations dont les principales lient les concentrations en chlorures de l'eau de pluie, des eaux souterraines et les quantités de pluie. Les principales sont les suivantes :

Si le coefficient de ruissellement n'est pas négligeable :

$$\frac{Ie}{P} \times 100 = (1 - r) \frac{Clp}{C \ln} \times 100$$

Si le coefficient de ruissellement est faible :

$$\frac{Ie}{P} \times 100 = \frac{Clp}{C \ln} \times 100$$

Avec,

- P: Pluie (mm)
- *r* : Coefficient de ruissellement (mm)
- Ie : Infiltration efficace (mm)
- Clp : Concentration en chlorures de l'eau de pluie (meq/l)
- Cln : Concentration en chlorures de l'eau souterraine (meq/l)

Dans notre cas, nous avons appliqué la deuxième équation, puisque nous avons en zone de plaine (plaine ouest de Annaba), ce qui se traduit par un coefficient de ruissellement faible à négligeable.

Le niveau piézométrique de la nappe superficielle entourant le lac Fetzara évolue en fonction de plusieurs paramètres : les précipitations, les conditions d'exploitation et les échanges des apports d'eau entre les différents systèmes nappe – lac – oueds.



Figure 28: Variation du niveau piézométrique en fonction de l'infiltration efficace.

D'après l'histogramme précédent (fig.28), nous observons que le niveau piézométrique évolue différemment d'un puits à un autre. Par ailleurs, l'influence de la recharge ne se répercute pas de la même manière sur tous les puits. La recharge atteint rapidement les puits les moins profonds exceptés les puits P9 et P12 au Sud-Est du lac (Cheurfa).

Ces remarques nous ont permis de dire que la recharge de la nappe ne s'effectue pas seulement par les apports des précipitations, mais aussi par une éventuelle alimentation de la nappe à partir du lac Fetzara, par l'augmentation de la surface du contact entre le lac et la nappe pendant la période des hautes eaux (débordement du lac vers ses alentours).

5. Conclusion

La nappe superficielle entourant le lac Fetzara est contenue dans des alluvions récentes et actuelles, elle présente une texture argilo-sableuse et argilo-limoneuse.

La transmissivité de cette nappe varie entre $0.13 \ 10^{-3}$ et $1.4 \ 10^{-3} \ m^2/s$, avec des sols moyennement perméables à perméables, où le coefficient de perméabilité oscille entre $0.28 \ 10^{-5}$ et $5 \ 10^{-5}$ m/s.

Les cartes piézométriques élaborées durant les six campagnes ont la même allure. Le sens global de l'écoulement des eaux souterraines met en évidence deux types d'échanges entre les différents systèmes (lac, oueds, nappe). Le premier montre une alimentation du lac par la nappe et les bordures ; quant au second, il montre le drainage du lac et de la nappe par l'oued Meboudja. Les piémonts du massif de l'Edough au Nord du lac Fetzara sont caractérisés par les fortes valeurs du gradient hydraulique (variant entre 0.5 et 0.9.10⁻²). Par contre, le gradient est faible à très faible au Sud du lac Fetzara (Cheurfa et El Eulma) et au Sud-Ouest de Berrahal.

Chapitre V

GEOCHIMIE DES SOLS ET DES

EAUX DE LA REGION DU LAC

FETZARA

1. Introduction

Le présent chapitre a été mené afin d'expliquer à partir d'une approche géochimique certains processus responsables de l'état chimique actuel des sols et de la qualité des eaux de nappes et de surface du lac Fetzara. On note particulièrement, l'alcalinité résiduelle et les processus de changement de phases (précipitation - dissolution de minéraux alcalins et échanges cationiques). En vue d'atteindre cet objectif, nous avons abordé deux parties principales ; la première représente une étude pédologique des sols qui sont très affectés par le phénomène de salinisation. Alors que, la seconde est consacrée à l'hydrogéochimie des eaux de surface et souterraines de la région du lac Fetzara.

2. Rappels des concepts de base de la géochimie

Dans la nature, on distingue trois grandes familles de roches : sédimentaires, magmatiques et métamorphiques. Ces roches peuvent être cohérentes (granite), meubles (sables et galets), plastiques (argiles) et liquides (pétrole). Elles sont constituées d'un assemblage des différents éléments en grains appelés minéraux. Plusieurs centaines d'espèces minérales sont connues dans la nature, chacune d'entre elles est définie par sa structure cristalline et sa composition chimique (formule structurale du minéral). Toutes les formes cristallines connues dérivent de sept mailles élémentaires ou systèmes cristallins. Chacune de ces mailles élémentaires est définie par sa géométrie et ses axes de symétrie (*Bouchaib, 2007*).

Les minéraux sont habituellement classés en deux grands groupes: les silicates et les minéraux non silicatés. Les silicates très abondants, constituent en poids presque 90 % de la croûte terrestre. Les silicates les plus communs sont:

- Le quartz: SiO₂,
- Les feldspaths qui regroupent deux familles (les feldspaths potassiques: l'orthose) et les plagioclases (albite et anorthite),
- Les micas, qui regroupent deux variétés dont les micas noirs (biotite) et les micas blancs (muscovites),
- Les pyroxènes, qui forment une très grande famille avec plusieurs variétés,
- Les amphiboles, formant également une très grande famille.

Les minéraux non silicatés sont volumétriquement très réduits par rapport aux silicates. Leur concentration locale donne naissance à des gisements de substances utiles ou de minerais souvent, d'un très grand intérêt économique: calcite, gypse, pyrite, fluorine, barytine, halite, malachite, blende, etc...

2.1. Principes de base de la géochimie

Dans certaines conditions de température, pression, déficit en sels et l'état hydrique du sol, il se produit une dissociation des minéraux qui engendrent dans l'eau du sol des groupements ioniques. De cette mise en solution des sels, résultent différents phénomènes tels que l'adsorption et l'échange ionique *(Bouchaib, 2007)*.

2.1.1. Adsorption

L'adsorption est par définition un phénomène de surface. Par action des forces d'attraction et de répulsion existantes entre les ions ou les molécules des différentes phases, certains cations et anions se trouvent fixés sur la surface des éléments solides du milieu.

Dans la nature, les argiles et les colloïdes présentent de grandes surfaces spécifiques et sont électriquement chargés. Leur charge globale est le plus souvent négative. Quand ces particules se trouvent en présence de solutions renfermant des ions, ceux-ci vont être attirés par ces particules, une partie y sera adsorbée. Les colloïdes et les argiles fortement chargés fixent préférentiellement les ions bivalents.

La facilité avec laquelle un ion adsorbé peut être remplacé par un autre, ou l'ordre observé pour les cations alcalins et alcalino-terreux est : $Na^+ < K^+$, $Mg^{2+} < Ca^{2+}$. Plus un ion est gros, plus il est difficile de lui en substituer un plus petit.

Les énergies de liaisons entre ions adsorbés et support sont assez faibles, si la composition de la solution change, des ions primitivement fixés peuvent être désorbés et remplacés par d'autres, c'est le phénomène d'échange ionique ou de base.

2.1.2. Echanges ioniques

Ce phénomène plus connu avec l'argile, se produit souvent sur les argiles de l'aquifère par fixation des alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) et libération de sodium (Na^+):

$$CaMg (CO_3)_2 + Na_2 - EX + H_2CO_3 \iff CaCO_3 + 2Na^+ + Mg-EX + 2HCO_3^-$$
(Dolomite) (Calcite)

Durant son transit, l'eau de l'aquifère chargée de minéraux dissous se trouve en contact avec des complexes échangeurs de cations. Ceux-ci sont des aluminosilicates formés de couches ou feuillets, dont la cohésion est assurée par l'existence de cations et d'eau interfoliaires. La surface des feuillets est chargée négativement, favorisant ainsi la possibilité d'échange de cations avec ceux de la solution du sol.

2.1.3. Indice de saturation

La détermination de la saturation d'un minéral vis-à-vis d'une eau est défini par l'indice de saturation (IS), Il est exprimé par l'équation suivante: IS= Log (PAI/Ks)

C'est le rapport de l'activité ionique (PAI) au produit de solubilité (K_s) à une température donnée. Cet indice indique les tendances des phases à se dissoudre ou précipiter, et permet de suivre l'évolution géochimique de l'eau dans l'aquifère, en traduisant les différents processus réactionnels, dont le siège est l'interaction de l'eau avec les matériaux aquifères. Quand (IS) est positif, il signifie que la solution est saturée ou sursaturée à l'égard du minéral qui a tendance à la précipitation. Par contre, quand (IS) est négatif, la solution est sous-saturée vis à vis du minéral qui a tendance à la dissolution.

2.1.4. Géochimie des carbonates

Dans tous les cas, le point de départ du système des carbonates est la chaîne des réactions suivantes:

 $CO_2 (g) + H_2O \iff CO_2 (aq) \text{ avec } K_0 = 10^{-1.53} \text{ à } 25^{\circ}C$ $CO_2 (aq) + H_2O \iff H_2CO_3$

L'eau agressive chargée en acide carbonique est ensuite saturée par des cations le plus souvent alcalino-terreux, pour donner les bicarbonates qui circulent dans la zone noyée.

 $H_2CO_3 \longrightarrow HCO_3^- + H^+: K_1 = 10^{-6.33}$ $HCO_3^- \longleftrightarrow CO_3^- + H^+: K_2 = 10^{-10.33}$ $CO_3^{2-} + Me^{2+} \longleftrightarrow MeCO_3 \text{ (solide)}$ $HCO_3^- + Me^{2+} \longleftrightarrow H^+ + MeCO_3 \text{ (solide)}$

qui se résument en terme de bilan à:

 $MeCO_3$ (solide) + CO_2 + $H_2O \iff (CO_3H^-)_2Me$ (soluble)

Le cation Me^{2+} est en général Ca^{2+} , mais peut aussi être Mg^{2+} , Fe^{2+} et parfois $2Na^+$ dans les saumures alcalines continentales. Lorsque la matrice contient de la dolomite, le cristal composite $MgCa(CO_3)_2$ peut se trouver engagé dans un processus de dissolution incongruente au cours duquel, le cristal entier est dissous avant que la calcite ne précipite à nouveau, tandis que le magnésium reste en solution en compagnie d'ion carbonate. Cela peut être le cas dans des systèmes dans lesquels, la calcite a atteint la saturation, tandis que la solution reste sous-saturée par rapport à la dolomite. Certes, tout apport extérieur d'ions calcium, par exemple à l'occasion de la dissolution du gypse, augmentera l'état de saturation en calcite et favorise la dissolution incongruente de la dolomite. Nous notons toutefois, que les sols peuvent contenir des carbonates solides y compris lorsque la roche-mère est composée de silicates, puisque l'hydrolyse des aluminosilicates, peut conduire à la formation de calcite secondaire (recristallisation), comme dans le cas suivant *(Bustillo, 2005 ; Bouchaib, 2007)*:

 $CaAl_{2}Si_{2}O_{8} + 8H_{2}O \iff 2H_{4}SiO_{4} + 2Al (OH)_{4}^{-} + Ca^{2+}$

(Anorthite)

 $NaAlSi_3O^8 + 8H_2O \implies 3H_4SiO_4 + Na^+ + Al (OH)_4^-$

(Albite)

L'hydrolyse des silicates provoque ainsi l'augmentation locale du pH, selon le mécanisme suivant:

 $2Al (OH)_4 \implies Al_2O_3 + 3H_2O + 2OH^-$

La montée du pH induit alors la formation et la dissociation acide de H_2CO_3 selon le schéma réactionnel suivant:

 $OH^{-} + CO_2 \iff HCO_3^{-}$ $HCO_3^{-} + OH^{-} \iff CO_3^{-} + H_2O$

D'autres mécanismes d'interactions peuvent se produire; ainsi l'altération des silicates peut conduire à la kaolinite, à la gibbsite et aux bicarbonates (*Bouchaib*, 2007; *Violette*, 2010):

 $CaAl_{2}Si_{2}O_{8} + 3H_{2}O + 2CO_{2} \iff Al_{2}Si_{2}O_{5}(OH)_{4} + Ca^{2+} + 2HCO_{3}^{-}$ (Anorthite) (Kaolinite) NaAlSi_{3}O_{8} + 8H_{2}O + CO_{2} \iff Al(OH)_{3} + 3H_{4}SiO_{4} + Na^{+} + HCO_{3}^{-}
(Albite) (Gibbsite)

Tous ces mécanismes réactionnels peuvent donc participer à la production de fortes teneurs en carbone inorganique total dissous (CITD), composé d'espèces aqueuses (CO_2 (aq) et H_2CO_3) et ioniques (HCO_3^- et CO_3^{2-}). Toutes ces formes de carbone peuvent entrer en réactions d'échanges chimiques et isotopiques avec le CO_2 gazeux de la zone non saturée du sol, ou de la fraction carbonatée de l'aquifère.

A l'issue des réactions précédentes, qui gouvernent la chimie des carbonates, se résument en termes de bilan à la réaction:

 $MeCO_3(s) + CO_2(g) + H_2O \iff 2(HCO_3) + Me^{2+}$

2.2. Principales réactions géochimiques des eaux

L'altération ou transformation chimique est par définition, la mise en solution des éléments chimiques de la roche-mère. Les minéraux constitutifs de la roche sont attaqués par des eaux

riches en acide carbonique. Cette attaque provoque une hydrolyse des minéraux et la mise en solution de leurs éléments chimiques.

Ces transformations chimiques correspondent aussi bien à des dissolutions qu'à des néoformations de phases minérales et peuvent jouer une part prépondérante dans la formation de résidu sec. Ces altérations ont évidemment une influence considérable sur la perméabilité, et la porosité des fissures et des sédiments. Elles varient selon les secteurs en fonction de la composition minéralogique de la roche.

Dans ce qui suit, nous reporterons les principales réactions d'altérations produites lors des interactions eau – sol, influençant ainsi la chimie des eaux.

- $CaCO_3(s) + H_2O + CO_2 \iff Ca^{2+} + 2HCO_3^-$ (*Calcite*)
- Ca Mg $(CO_3)_2 + 2H^+ \iff Ca^{2+} + Mg^{2+} + 2HCO_3^-$ (Dolomite)
- Ca Mg $(CO_3)_2$ + H⁺ \iff CaCO₃(s) + Mg²⁺ + HCO₃⁻ (Dolomite) (Calcite)
- CaSO₄.2H₂O \iff Ca²⁺ + SO₄²⁻ + 2H₂O (*Gypse*)
- NaAlSiO₈ + H⁺ + 7H₂O \iff Na⁺ + Al (OH)₃ + 3H₄SiO₄ (Albite) (Gibbsite)
- 2NaAlSi₃O₈ + 2H⁺ + 9H₂O \iff Al₂Si₂O₅(OH)₄ + 2Na⁺ + 4H₄SiO₄ (*Albite*) (*Kaolinite*)
- $Mg_5Al_2Si_3O_{10}(OH)_8 + 10H^+ \iff Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 5Mg^{2+} + H_4SiO_4 + 5H_2O$ (Chlorite) (Kaolinite)
- $CaAl_2Si_2O_8 + H_2O + 2H^+ \iff Al_2Si_2O_5(OH)_4 + Ca^{2+}$ (Anortite) (Kaolinite)
- $2KAlSi_3O_8 + 2H^+ + 9H_2O \iff Al_2Si_2O_5(OH)_4 + 2K + 4H_4SiO_4$ (*K-feldspath*) (*Kaolinite*)
- $(CaMg_7Al_3Si_{1.7})O_6 + 3.4H^+ + 1,1H_2O \iff 3Al_2Si_2O_5(OH)_4 + Ca^{2+} + 7Mg^{2+} + 1.1H_4SiO_4$ (*Pyroxène*) (*Kaolinite*)
- $2K(Mg_2Fe)(AlSi_3)O_{10}+10H^++5O_2+7H_2O \iff Al_2Si_2O_5(OH)_4+2K^++4Mg^{2+}+2Fe(OH)_3+4H_4SiO_4$ (*Biotite*) (*Kaolinite*)
- $3NaAlSi_{3}O_{8} + Mg^{2+} + 4H_{2}O \iff 2Na_{0.5}Al_{1.5}Mg_{0.5}Si_{4}O_{10}(OH)_{2} + 2Na^{+} + H_{4}SiO_{4}$ (*Albite*) (*Na-montmorillonnite*)
- NaCl \iff Na⁺ + Cl⁻ (Halite)
- KCl \iff K⁺ + Cl⁻ (Sylvinite)

A. Pédologie

1. Introduction

La présence des sels hydrosolubles dans le sol est le résultat d'un ensemble de facteurs tels que la roche-mère, la nappe phréatique et les eaux d'irrigation salées, ainsi que l'absence de l'évacuation de ces sels hors du sol (inefficacité du drainage suite à une mauvaise conduite de l'irrigation). L'accumulation de ces sels dans les milieux poreux et la modification du complexe adsorbant (phénomène d'échange) conduisent à une dégradation et une transformation profonde des propriétés physiques et chimiques du sol avec pour conséquence la réduction de la capacité de croissance des cultures et une diminution des rendements *(Ouardi, 2005)*.

Il est évident que la qualité du sol vis-à-vis d'une utilisation donnée dépend de ses propriétés intrinsèques, de son environnement géochimique et climatique et de son utilisation par l'homme *(Badraoui et al., 1998)*. L'évaluation de cette qualité passe d'abord par la délimitation des propriétés du sol qui sont mesurables quantitativement et qui définissent les processus majeurs du fonctionnement du sol ; ce sont les indicateurs physiques, chimiques et biologiques de la qualité des sols *(Rahoui et al., 2000)*. De ce fait, la présente étude a pour objectifs d'évaluer les propriétés des sols du lac Fetzara qui sont très affectés par le phénomène de salinisation et d'étudier leur relation avec la qualité des eaux de la région.

2. Différentes classes de sols

Les sols du lac Fetzara ont fait l'objet de plusieurs études de mise en valeur agricole, qui ont révélé des contraintes non négligeables quant à leur utilisation, telles que la salinisation et l'hydromorphie (*Durand, 1950 ; Ifagraria, 1967 ; ANRH, 1981 ; AJCI, 1985 ; BNEDER, 2004 ; Djamai, 2007*). Ces études ont permis de classer les sols en quatre classes d'après la classification française CPCS (1967): sols peu évolués, vertisols, sols hydromorphes et sols halomorphes.

2.1. Les sols peu évolués (SPE)

Les sols peu évolués sont d'origine non climatique. Ils se sont formés sur une couche d'apport constituée de sables et d'argiles. L'épaisseur varie selon leur position topographique, leur superficie est de 5199 ha, soit 28 % de la surface totale du lac. Ils se situent essentiellement sur les terres onduleuses des pieds de montagnes et sur les terrasses. Ils se caractérisent par une faible rétention d'eau, une perméabilité très élevée et un taux de matières organiques moyen (fig.29).

2.2. Les sols vertisols (SV)

Ces sols s'étendent sur une superficie de l'ordre de 625 ha, soit 3.3 % de la superficie totale. Ils sont répartis dans la zone Ouest du lac et sont riches en argile gonflante (fig.29). Les vertisols ont de mauvaises propriétés physiques (sols lourds). Ils possèdent une texture très fine et présentent un mauvais drainage.

2.3. Les sols hydromorphes (SH)

Ce sont des sols peu humifères et salins, à texture très fine avec une très faible perméabilité. Ils occupent une superficie de 2548 ha, soit 13.7 % de la surface totale. Ils sont localisés dans la zone centrale du lac (fig.29). Ces sols moyennement profonds, se caractérisent par la présence d'une nappe qui explique l'hydromorphie temporaire ou permanente.

2.4. Les sols halomorphes (SHA)

Ces sols sont fréquents dans la partie Ouest du lac, sur une superficie de 10228 ha, soit 55 % de la surface totale (fig.29). Ce sont des sols salins, caractérisés par la présence de sels solubles, une perméabilité moyenne, une texture lourde et ils sont riches en minéraux argileux gonflants.



Figure 29 : Répartition des classes des sols du lac Fetzara (AJCI, 1985).

3. Matériels et méthodes

3.1. Echantillonnage des sols

L 'étude de la répartition spatiale des sels dans les sols par prélèvements d'échantillons suivi d'analyses de laboratoire est très difficile à cause de la grande variabilité des teneurs en sels d'un point à un autre. L'échantillonnage est l'étape la plus importante car la qualité des résultats d'analyses obtenus au laboratoire dépendra de la représentativité des échantillons prélevés sur le terrain. Les prélèvements des échantillons de sols ont été effectués sur les deux premières couches superficielles (0 – 25 cm et 25 – 50 cm), car c'est à ce niveau que s'effectuent les échanges ioniques les plus importants.

Les prélèvements ont été effectués, durant le mois de novembre 2009, au niveau de douze (12) points aux alentours du lac Fetzara, soit d'un total de 24 échantillons (fig.30).

Les échantillons de sols ont été séchés à l'air libre, broyés et tamisés à 2 mm, pour obtenir de la terre fine qui va servir à toutes les analyses chimiques, physico-chimiques et physiques.



Figure 30 : Carte d'inventaire des points de prélèvement.

3.3. Méthodes d'analyses au laboratoire

Les analyses de sols réalisées concernent la densité, la porosité, le carbone et la matière organique, le pH, la conductivité électrique et les sels solubles. Ces caractéristiques sont obtenues avec les méthodes d'analyse courantes en pédologie (tab.23).

Paramètres	Symboles	Unités	Méthodes
pH	pН	/	pH mètre
Conductivité électrique	CE	µs/cm	Conductimètre
Carbone organique	CO	%	Anne modifiée
Matière organique	MO	%	MO = % C * 1.72
calcaire total	CaCO ₃	%	Calcimètre de Bernard
Densités réelle et apparente	Dr et Da	g/cm ³	Paraffine
Porosité	Р	%	P = (1 - Da / Dr) * 100
Calcium, Magnésium	Ca^{2+}, Mg^{2+}	mg/l	Compléxométrie
Chlorures	Cl	mg/l	Mohr au AgNO ₃ .
Sulfates	SO_4^{2-}	mg/l	Gravimétrie au BaCl ₂
Bicarbonates, Carbonates	HCO_3^-, CO_3^-	mg/l	Acide sulfurique (H_2SO_4).
Sodium et le Potassium	Na^+, K^+	mg/l	Spectrométrie d'émission à flamme

Tableau 23: Méthodes d'analys	ses physico-chimiques des sols.
-------------------------------	---------------------------------

3.3.1 Bilan de salure

La détermination du bilan de salure des échantillons de sols a été effectué sur l'extrait de la pâte saturée, cette méthode consiste à ajouter à l'échantillon de l'eau tout en remuant jusqu'à l'obtention d'une pâte luisante qui glisse lentement lorsqu'on incline le mortier dans lequel elle a été préparée. L'extraction de la solution est obtenue par centrifugation. Les sels solubles analysés dans cette solution sont : calcium (Ca²⁺), magnésium (Mg²⁺), sodium (Na⁺), potassium (K⁺), chlorures (Cl⁻), sulfates (SO₄²⁻), bicarbonates (HCO₃⁻) et carbonates (CO₃⁻²).

3.3.2. Propriétés physico-chimiques des sols

• *Le pH (pH_{eau} et pH_{KCl})* : mesurés par la méthode électromotrice à l'aide d'un pH-mètre à l'électrode de verre (pH 209), sur une suspension de terre fine avec un rapport sol/eau : 1/5 pour le pHeau et le même rapport sol/KCl (1N) pour le pH_{KCl}.

• *La conductivité électrique (CE)* : mesurée à l'aide d'un conductimètre (EC 215). Les mesures ont été effectuées sur les solutions de sols de l'extrait de la pâte saturée, elle est exprimée en (mS/cm à 25 °C).

• Le carbone organique (C) : Le carbone organique total dans les sols peut être déterminé par titrage par la méthode de Anne modifiée (Guy, 1978). Une solution de bichromate de potassium ($K_2Cr_2O_7$) est ajoutée à un échantillon en présence d'acide sulfurique. L'excès du bichromate n'ayant pas réagi avec le carbone est dosé par une solution de sel de Mohr (réductrice). La quantité réduite est proportionnelle à la teneur en carbone organique.

• *La matière organique (MO)* : La teneur en matière organique (MO) dans le sol est évaluée à partir du taux de carbone organique (C) en utilisant la relation empirique suivante :

• L'humidité : déterminée par la méthode classique de séchage à l'étuve à 105 °C.

• *Le calcaire total (CaCO₃)* : effectué par le calcimètre de Bernard.

• *La granulométrie* : utilisation de la méthode internationale adoptée par l'association internationale pour la science du sol. La séparation des particules fines (argiles et limons fins) par la méthode de la pipette Robinson et tamisage pour les éléments grossiers (sables).

4. Résultats et discussion

4.1. Les caractéristiques physiques des sols

4.1.1 La granulométrie

Les sols naturels sont constitués par un mélange de particules élémentaires de différentes dimensions et par suite de propriétés différentes. D'une manière générale, les propriétés d'un sol dépendront de la proportion des particules fines par rapport à celle des plus grosses. Pour étudier les propriétés mécaniques des sols, il est donc nécessaire de connaître leur nature et de les classer. Pour ce faire, nous se référerons à une classification qui repose sur l'analyse granulométrique.

L'analyse granulométrique est un des moyens classiques de l'étude des sols. Elle permet de définir la texture, qui conditionne à son tour en partie les propriétés physiques et physico-chimiques du milieu *(Gobat et al., 1991)*. La texture du sol est la réflexion de la proportion des particules de sable, de limon et d'argile qui s'y trouvent. Ces proportions déterminent la grosseur des pores ou espaces entre les particules de sol et d'air et dans un large mesure, la capacité à retenir l'humidité et les éléments nutritifs. Les particules du sol de moins de 2 mm de grosseur sont classées en trois catégories: sable (la plus grosse), limon et argile (les plus petites).

On classe les sols d'après les ratios de ces différentes particules. Par exemple, les sols classés comme "sableux" sont constitués de plus de 50 à 55 % de sable, alors que les sols "argileux" ont un contenu d'argile de 45 % ou plus. Les résultats des analyses granulométriques sont présentés dans le tableau suivant (tab.24).

Couche : 0 – 25 cm				Couche : 25 – 50 cm			
N°	Limon %	Argile %	Sable %	N°	Limon %	Argile %	Sable %
S1	42.92	0.00	57.08	S'1	74.56	0.00	25.44
S2	91.80	0.00	8.20	S'2	71.84	2.00	26.16
S3	89.16	10.00	0.84	S'3	70.36	4.00	25.64
S4	34.28	2.00	63.72	S'4	1.00	16.00	83.00
S5	73.52	0.00	26.48	S'5	64.88	0.00	35.12
S6	77.24	2.00	20.76	S'6	62.80	2.00	35.20
S7	50.84	16.00	33.16	S'7	54.40	18.00	27.60
S8	62.88	10.00	27.12	S'8	25.96	12.00	62.04
S9	75.68	2.00	22.32	S'9	86.37	2.00	11.63
S10	88.44	0.40	11.16	S'10	80.00	6.00	14.00
S11	57.70	6.00	36.30	S'11	62.92	4.00	33.08
S12	87.60	2.00	10.40	S'12	48.92	0.00	51.08
Moy	69.34	4.20	26.46	Moy	58.67	5.50	35.83

Tableau 24 : Résultats de	l'analyse granulométrique d	les sols de la région du lac Fetzara.
---------------------------	-----------------------------	---------------------------------------

La représentation des résultats des analyses granulométriques sur les triangles des textures (fig.31) montre la dominance de la fraction limoneuse dans la majorité des échantillons avec des valeurs moyennes de 69.34 % pour la première couche (0 – 25 cm) et 58.67 % pour la deuxième (25 – 50 cm), cet excès de limon et l'insuffisance d'argile peuvent provoquer la formation d'une structure massive, accompagnée de mauvaises propriétés physiques de sols.

La fraction sableuse moyenne est d'ordre de 26.46 % et 35.83 % successivement pour la première et la deuxième couche, elle est supérieure à 50 % au niveau de l'échantillon (S4) situé dans la partie Sud du lac Fetzara à proximité de l'oued El Hout et au niveau de la couche 25 - 50 cm des échantillons suivants ; S'1, S'8 et S'12. Alors que la fraction argileuse se présente avec des faibles valeurs, soit une moyenne de 4.2 % pour la première couche et 5.5 % pour la seconde ; les valeurs maximales sont enregistrées au niveau de l'échantillon (S7), situé au Sud de Berrahal.

4.1.2. La densité et la porosité totale

Le tableau suivant (tab.25) montre la variabilité et l'ordre de grandeur des différents paramètres physiques des deux couches de sols analysés.

Couches	Paramètres	Max	Min	Моу
	Densité apparente (g/cm ³)	1.92	1.29	1.60
0 - 25cm	Densité réelle (g/cm ³)	2.05	1.72	1.82
	Porosité (%)	30.65	2.54	12.07
	Densité apparente (g/cm ³)	1.93	1.27	1.60
25 - 50 cm	Densité réelle (g/cm ³)	2.18	1.65	1.83
	Porosité (%)	24.85	2.42	12.45

Tableau 25: La densité apparente, la densité réelle et la porosité des sols.



B- Deuxième couche (25 - 50 cm)

Figure 31 : Texture des sols de la région du lac Fetzara.

4.1.2.1. La densité apparente (Da)

C'est le rapport entre le poids d'un volume donné de sol sec et le poids d'un égal volume d'eau, elle est déterminée par la méthode de paraffine. Les valeurs de la densité apparente des sols varient entre 1.29 et 1.92 g/cm³ avec une moyenne de 1.60 g/cm³ pour la première couche (0 - 25 cm) (fig.32-A, fig.33), et oscillent entre 1. 27 et 1.93 g/cm³ avec une moyenne de 1.60 g/cm³ pour la deuxième couche (25 - 50 cm) (fig.32-B, fig.33).

4.1.2.2. La densité réelle (Dr)

C'est la densité des particules solides du sol ou bien c'est le poids spécifique du sol en place, elle est déterminée par la méthode du pycnomètre. La densité réelle est toujours supérieure à celle de la densité apparente, elle oscille entre 1.72 et 2.05 g/cm³ dans la couche 0 - 25 cm (fig.32-A, fig.34), et de 1.65 à 2.18 g/cm³ dans la couche 25 - 50 cm (fig.32-B, fig.34), avec des moyennes successives d'ordre de 1.82 et 1.83 g/cm³.







B- Deuxième couche (25 – 50 cm). Figure 32 : Densité réelle et apparente des sols du lac Fetzara.



Figure 33 : Variation de la densité apparente des sols du lac Fetzara.



Figure 34 : Variation de la densité réelle des sols du lac Fetzara.

4.1.2. La porosité totale (P %)

La porosité totale (P %) d'un échantillon est égale au rapport, exprimé en pourcent, du volume des vides (Vv) au volume total. Elle est calculée au laboratoire par la méthode de la détermination des densités selon la formule suivante : P (%) = (1 - Da / Dr) * 100



Figure 35: Variation de la porosité totale des sols de la région du lac Fetzara.

D'après les résultats obtenus, nous observons que la porosité totale des sols varie entre 2.54 % et 30.65 % avec une moyenne de 12.07 % pour la couche supérieure (0 - 25 cm) (fig.35). Par contre, elle varie entre 2.42 % et 24.85 % avec une moyenne d'ordre de 12.45 % pour la couche inférieure (25 - 50 cm) (fig.35). Si l'on se réfère à l'échelle proposée par *Katchinski (in Djamai, 1993)*, la porosité totale des sols varie entre les classes des sols de faible à très faible porosité *(annexe.1)*.

4.1.3. La perméabilité

De la même manière que la porosité, la perméabilité est liée à la texture du sol. Une terre sableuse est caractérisée par une forte infiltration d'eau et une faible capacité de rétention, ceci est dû à la faiblesse de la force de surface des particules. Une terre très argileuse est souvent difficile à travailler en temps sec car elle est dure et également en période humide, car elle est plastique et collante, c'est pour cette raison qu'on l'appelle terre lourde. Elle a une faible infiltration de l'eau à cause de la faible perméabilité, et leur capacité de rétention d'eau est très importante.

De nombreux travaux ont montré que la perméabilité des sols dépend aussi de la concentration saline du pourcentage de sodium échangeable (l'ESP); la perméabilité diminue lorsque l'ESP s'élève et augmente avec la concentration saline de la solution du sol *(Mc Neal et Coleman, 1968 ; Halitim et al., 1984 ; Daoud, 1993 ; Djamai, 1993 et 2007).*

Les sols du lac Fetzara ont un coefficient de perméabilité le plus souvent inférieur à 2 cm/h (*Djamai, 1993 ; Zenati, 1999 ; Habes, 2006*). Si en comparant avec l'échelle de la perméabilité (*Duchaufour, 1970*), nous constatons que les sols du lac Fetzara sont moyennement perméables, avec un coefficient de perméabilité entre 1 à 18 cm/h (*annexe.2*).

4.2. Les caractéristiques physico-chimiques des sols

4.2.1. Caractère acide ou alcalin du sol

La réaction acide ou alcaline d'un sol est conditionnée par la présence simultanée des sels acides contenus en particulier par l'humus et des sels basiques, offerts notamment par le calcaire. La terre est acide lorsque ce sont les premiers cités qui prédominent sur les seconds et elle est alcaline ou calcaire dans le cas contraire. La réaction est dite neutre lorsque acides et bases s'équilibrent mutuellement.

• *Mesure de la réaction du sol (pH)* : l'acidité ou l'alcalinité d'une terre se mesure par un indice appelé pH (potentiel hydrogène), c'est une des propriétés les plus importantes

de la solution du sol. Il exprime la teneur en ions d'hydrogène libres dans une solution du sol, dans l'eau pure ou additionnée de chlorure de potassium (KCl).

Les résultats de mesures de pH_{eau} et pH_{KCl} sont enregistrés dans le tableau suivant :

	Couc	he:0 - 2	5 cm	Couche : 25 - 50 cm			
N^{o}	pH _{eau}	<i>pH_{KCl}</i>	pH_{eau} - pH_{KCl}	N^{o}	<i>pH_{eau}</i>	<i>pH_{KCl}</i>	pH_{eau} - pH_{KCl}
S1	7.56	7.02	0.54	S'1	7.72	7.16	0.56
S2	7.64	7.08	0.56	S'2	7.62	7.17	0.45
S3	7.29	6.96	0.33	S'3	7.29	7.01	0.28
S4	7.40	6.63	0.77	S'4	7.79	7.33	0.46
S5	7.59	6.95	0.64	S'5	7.64	6.95	0.69
S6	7.12	6.71	0.41	S'6	7.25	6.75	0.50
S7	7.67	6.17	1.50	S'7	8.10	6.69	1.41
S8	6.37	5.97	0.40	S'8	7.02	6.33	0.69
S9	7.03	6.72	0.31	S'9	7.11	6.66	0.45
S10	6.91	6.43	0.48	S'10	7.13	6.50	0.63
S11	7.16	6.62	0.54	S'11	7.22	6.46	0.76
S12	7.47	6.78	0.69	S'12	7.40	6.89	0.51
Max	7.67	7.08	1.50	Max	8.10	7.33	1.41
Min	6.37	5.97	0.31	Min	7.02	6.33	0.28
Moy	7.27	6.67	0.60	Moy	7.44	6.83	0.62

Tableau 26 : Variation des pH des sols de la région du lac Fetzara.

- *pH_{eau}*: il correspond à l'acidité active ou acidité réelle du sol. Les valeurs du pH_{eau} varient entre 6.37 et 7.67 pour la couche supérieure (0 25 cm) avec une moyenne de 7.27 (fig.36-A). Par contre, elles oscillent entre 7.02 et 8.10 avec une moyenne de 7.44 pour la couche inférieure (25 50 cm) (fig.36-B). Si l'on se réfère à l'échelle proposée par *Gaucher (in Soltner, 1981)*, le pH des sols varie entre les classes faiblement acides à alcalins (annexe.3).
- pH_{KCl} : il correspond à la concentration en hydrogène du sol obtenu après ajout de KCl, ce dernier a pour effet de chasser les H⁺ fixés sur le complexe argilo-humique, ce qui permet de déterminer l'acidité totale ou acidité de réserve du sol. Les valeurs maximales du pH_{KCl} sont d'ordre de 7.08 et 7.33 (fig.36). Par contre, les valeurs minimales restent inférieures à 6.5, avec des valeurs moyennes d'ordre de 6.67 et 6.83 successivement pour la couche de 0 25 cm et celle de 25 50 cm (fig.36).

Le pH_{KCl} est en effet toujours inférieur au pH_{eau} et l'écart entre les deux valeurs d'un même échantillon traduit l'acidité de réserve du sol.

- Un écart inferieur à 0.5 indique une acidité de réserve faible.
- Un écart de 0.6 à 1 indique une acidité de réserve moyenne.
- Un écart supérieur à1 indique une acidité de réserve élevée.





A- Première couche (0 - 25 cm).

B- Deuxième couche (0 - 25 cm).



4.2.2. Le carbone et la matière organique des sols

Les principaux résultats d'analyse du carbone et de la matière organique sont récapitulés dans le tableau ci-dessous (tab.27)

Fahantillang	Carbone orga	nique (%C)	Matière organique (%MO)		
Echantmons	0 - 25 cm	25 - 50 cm	0 - 25 cm	25 - 50 cm	
1	1.93	1.44	3.31	2.47	
2	1.36	1.02	2.34	1.75	
3	1.39	0.39	2.38	0.67	
4	0.24	0.97	0.4	1.66	
5	1.11	0.90	1.9	1.55	
6	0.65	0.62	1.11	1.07	
7	0.71	0.81	1.79	1.39	
8	1.14	1.00	1.95	1.71	
9	1.85	1.57	3.19	2.69	
10	1.65	1.51	2.83	2.59	
11	2.02	0.82	3.47	1.4	
12	1.53	0.85	2.63	1.46	
Max	2.02	1.57	3.47	2.69	
Min	0.24	0.39	0.4	0.67	
Moy	1.30	0.99	2.28	1.70	

Tableau 27: Le carbone et la matière organique des sols de la région du lac Fetzara.

4.2.2.1. Le carbone organique (% C)

La détermination du carbone organique total nous permet d'évaluer la quantité de la matière organique présente dans l'échantillon de sol.

D'une manière générale, les teneurs en carbone organique dans la première couche (0 - 25 cm) sont supérieures à celles de la deuxième couche (25 - 50 cm). Elles oscillent entre 0.24 % et 2.02 % dans la première et entre 0.39 % et 1.57 % pour la deuxième, avec des moyennes d'ordre de 2.02 % et 1.57 % successivement pour les deux couches (0 - 25 cm) et 25 - 50 cm) (tab.27 et fig.37).



Figure 37 : Evolution du carbone organique dans les sols du lac Fetzara.

4.2.2.2. La matière organique (% MO)

La matière organique contenue dans le sol est formée essentiellement par des détritus de végétaux se présentant à tous les stades de décomposition jusqu'à celui de la substance organique noire intimement incorporée au sol qui constitue l'humus proprement dit.



Figure 38 : Evolution de la matière organique dans les sols de la région du lac Fetzara.

Les résultats obtenus (tab.27 et fig.38) indiquent que la teneur de la matière organique diminue d'une façon significative avec la profondeur dans la majorité des échantillons, elle varie entre 0.4 et 3.47 % avec une moyenne de 2.28 % pour la couche de 0 - 25 cm, et entre 0.67 et 2.69 % avec une moyenne d'ordre de 1.70 % pour la couche de 25 - 50 cm (tab.27 et fig.38), ce qui indique une variation très large de la matière organique dans l'espace et en fonction de la profondeur.

4.2.3. Le calcaire total (CaCO₃)

C'est l'ensemble du calcaire de sol représenté sous toutes dimensions (tailles). Sa quantité dans le sol peut être déterminée après sa dissolution par un acide moyennement concentré. Pour interpréter les résultats des analyses obtenus, nous utilisons l'échelle d'appréciation ci-dessous (tab.28).

Tableau 28 : Normes d'interprétation du taux du calcaire du sol (in Baize, 1988).

Taux du calcaire	< 1 %	1 à 5 %	5 à 25 %	25 à 50 %	50 à 80 %	> 80 %
Appréciation	Non calcaire	Peu calcaire	Modérément calcaire	Fortement calcaire	Très fortement calcaire	Excessivement calcaire

Les résultats de mesure du calcaire total dans les sols du lac Fetzara sont résumés dans le tableau suivant :

Couches	Calcair	e total (%)	Humia	lité (%)
Stations	0 - 25 cm	25 - 50 cm	0 - 25 cm	25 - 50 cm
1	23.80	24.60	6.33	5.20
2	24.13	24.60	6.26	5.73
3	20.98	18.85	6.00	6.30
4	16.88	16.78	1.46	0.86
5	18.74	21.19	3.85	1.75
6	20.25	18.88	6.66	4.61
7	17.35	18.88	2.90	2.20
8	16.30	14.88	0.46	1.66
9	21.10	21.63	6.53	5.53
10	15.63	19.38	6.26	6.93
11	17.00	16.08	4.20	4.86
12	24.80	24.80	4.60	5.06
Max	24.80	24.80	6.66	6.93
Min	15.63	14.88	0.46	0.86
Moy	19.75	20.05	4.63	4.22

Tableau 29: Le calcaire total et l'humidité dans les sols de la région du lac Fetzara.

La présence de calcaire total (CaCO₃) dans le sol est variable d'un échantillon à un autre et même en fonction de la profondeur. Il varie entre 14.88 % et 24.80 % avec des pourcentages moyens d'ordre de 19.75 % et 20.05 % successivement pours les deux

couches (0 - 25 cm et 25 - 50 cm) (fig.39). Suite aux normes données par *Baize (1988)* (tab.28), nous constatons que les sols de tous les échantillons étudiés sont considérés comme étant des sols modérément calcaires, car les teneurs en calcaire se situent entre 5 à 25 %.



Figure 39: Variation du calcaire total dans les sols de la région du lac Fetzara.

4.2.4. L'humidité (%)

L'analyse des taux d'humidité des sols de la région du lac Fetzara, a donné des valeurs fluctuant entre 0.46 et 6.66 % pour la couche superficielle (0 - 25 cm), avec une moyenne de 4.63 %. Alors que, pour la deuxième couche (25 - 50 cm), le taux d'humidité oscille entre 0.86 et 6.93 % avec une moyenne de 4.22 %. La figure 40 montre une légère diminution de l'humidité en fonction de la profondeur dans la majorité des stations, à l'exception des stations S10, S11 et S12 localisées au Nord-Est du lac Fetzara (Oued Zied). Cette variation de l'humidité semble être contrôlée par plusieurs facteurs ; les conditions climatiques (précipitations et évaporation), la végétation et les caractéristiques physiques du sol qui sont la perméabilité, l'infiltration, la capacité de rétention d'eau et l'action capillaire.



Figure 40: Variation de l'humidité dans les sols de la région du lac Fetzara.

4.2.5. Etude de la salinité des sols

Les études précédentes montrent que la salinité est particulièrement importante au Nord, à l'Est et au Sud-Est du lac Fetzara. L'Ouest et le centre du lac semble être les zones les moins affectées par les sels à cause de déplacement des sels vers la périphérie avec désalinisation du centre du lac (*Joleaud*, *1936*; *Durand*, *1950*; *Djamai*, *1993 et 2007*).

4.2.5.1. La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique est importante à connaître, car elle nous donne une idée générale sur la salinité d'un sol. Les résultats de la conductivité électrique mesurée sur l'extrait de la pâte saturée sont récapitulés dans le tableau suivant (tab.30).

Couches	0 - 25 cm	25 - 50 cm
1	6.79	8.36
2	6.52	12.32
3	17	19.3
4	7.56	8.03
5	8.06	11.1
6	16.14	17.14
7	7.46	14.09
8	6.59	12.74
9	16.19	20.2
10	24.3	17.56
11	14.22	14.53
12	7.61	12.17
CE Max	24.3	20.2
CE Min	6.52	8.03
CE Moy	11.54	13.96

Tableau 30: Variation de la conductivité électrique des sols (mS/cm).

La conductivité électrique de la solution de sol du lac Fetzara varie entre 6.52 et 24.3 mS/cm avec une moyenne de 11.54 mS/cm pour la couche 0 - 25 cm, et de 8.03 à 20.2 mS/cm avec une moyenne de 13.96 mS/cm pour la couche 25 - 50 cm. Des valeurs maximales dépassant parfois 15 mS/cm sont enregistrées particulièrement au niveau des stations 3, 6, 9 et 10 (fig.41); nous notons aussi une augmentation de la conductivité électrique en fonction de la profondeur dans la majorité des échantillons, à l'exception de l'échantillon (S10) où la conductivité diminue dans la couche inferieure (25 - 50 cm), ce qui indique une variation très importante entre les deux couches avec une concentration en sels solubles plus forte en profondeur (tab.30 et fig.41).



Figure 41: Variation de la conductivité électrique (CE en mS/cm).

La classification des sols du lac Fetzara en fonction de la conductivité électrique mesurée sur l'extrait de pâte saturée d'après la classification proposée par l'*US Salinity Laboratory* (1954) (tab.31), nous a permis d'identifier les échantillons correspondant en cinq classes de salinité. Nous remarquons que la majorité des sols sont affectés par la salinité avec une évolution de cette dernière en fonction de la profondeur, ils sont répartis sur trois classes comme suit; 25 % des échantillons sont des sols moyennement salés ($4 < CE \le 8$), 41.67 % sont des sols salés ($8 < CE \le 16$) et 33.33 % sont des sols très salés (CE > 16).

CE (mS/cm)	0 – 25 cm	25 – 50 cm	Appréciation	
CE ≤ 2	/	/	Les sols ne sont pas salés	
$2 < CE \le 4$	/	/	Les sols sont faiblement salés	
$4 < CE \le 8$	S1, S2, S4, S7, S8, S12	/	Les sols sont moyennement salés	
8 < CE ≤ 16	S5, S11	S'1, S'2, S'4, S'5, S'7, S'8, S'11, S'12	Les sols sont salés	
CE > 16	S3, S6, S9, S10	S'3, S'6, S'9, S'10	Les sols sont très salés	

Tableau 31 : Classification des sols en fonction de la conductivité électrique (USSL, 1954).

4.2.5.2. Les sels solubles

Les sols peuvent être affectés par le problème de la salinité à cause de la présence des concentrations excessives en sels solubles (sols salins), en sodium adsorbé (sols sodiques ou alcalins) ou les deux à la fois (sols alcalino-salins). Les sels solubles concernés sont essentiellement ; Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^- . La dynamique de ces sels dans le sol est liée au fonctionnement hydrique et structural des sols, aux conditions hydriques et géochimiques aux limites du profil de sol, soit principalement à l'apport d'eau d'irrigation et aux fluctuations de nappe *(Douaoui et al., 2004)*. Les principaux résultats des analyses

chimiques effectuées sur l'extrait de pâte suturée sont synthétisés dans le tableau ci-dessous (tab.32).

Couches	Sels solubles (meq/l)	Maximum	Minimum	Moyenne	Ecart-type
0 – 25 cm	Ca ²⁺	14.40	2.80	6.18	3.51
	Mg^{2+}	31	0.60	13.27	10.61
	Na ⁺	29.90	1.24	13.86	7.10
	\mathbf{K}^{+}	3.66	0.64	1.88	0.90
	Cl	240	40	105	67.27
	SO ₄ ²⁻	61.25	6.25	26.24	20.85
	HCO ₃ ⁻	4	1.20	2.13	0.72
25 – 50 cm	Ca ²⁺	16.50	3	6.09	3.89
	Mg^{2+}	34.40	1.40	14.54	10.19
	Na ⁺	24.29	2.49	16.35	6.13
	\mathbf{K}^{+}	7.32	1	2.33	1.64
	Cl	220	60	139.17	49.74
	SO ₄ ²⁻	61.98	14.50	31.09	15.96
	HCO ₃	3.60	0.60	2.29	0.82

Tableau 32: Résultats des analyses chimiques des solutions de sols de la région du lac Fetzara.

a- La concentration des cations

• <u>Teneurs en calcium (Ca²⁺)</u>: les ions calcium sont en quantités pratiquement équivalentes dans la plupart des échantillons, avec des moyennes respectivement de 6.18 meq/l au niveau de la première couche (0 – 25 cm) et de 6.09 meq/l au niveau de la deuxième (20 – 40 cm) (fig.42-A). Les teneurs maximales en calcium sont enregistrées au niveau des deux stations (S3 et S9), la première située au Sud-Est du lac Fetzara (Cheurfa) et la deuxième situé au Nord-Est (Oued Zied).

• <u>Teneurs en magnésium (Mg^{2+}) </u>: le magnésium se trouve à des concentrations très variables, soit dans l'espace ou bien en fonction de la profondeur, avec des concentrations moyennes de 6.18 et 6.09 meq/l et un écart-type d'ordre de 10.61 et 10.19 meq/l respectivement pour les couches (0 – 25 cm et 25 – 50 cm). Les fortes concentrations sont enregistrées au niveau des sols S3 et S6 situés au Sud du lac, et au niveau des sols (S8, S9, S10, S11 et S12) qui sont localisés au Nord du lac Fetzara (fig.42-B).

• <u>Teneurs en sodium (Na⁺)</u>: la concentration en ions sodium est la plus élevée par rapport aux autres cations, avec une concentration moyenne d'ordre de 13.86 et 16.35 meq/l respectivement pour la couche supérieure (0 – 25 cm) et la couche inférieure (25 – 50 cm) (fig.42-C). Les teneurs les plus élevées sont enregistrées au Nord-Est dans la commune d'Oued Zied (S9, S10, S11 et S12). Par contre, la concentration minimale enregistrée au niveau de l'échantillon (S7) situé dans la région de Berrahal avec 1.24 et 2.49 meq/l respectivement pour les deux couches (0 – 25 cm et 25 – 50 cm). • <u>Teneurs en potassium (K^+) </u>: cet ion se trouve en quantités très faibles par rapport aux autres cations, avec des moyennes de 1.88 et 2.33 meq/l respectivement pour la couche supérieure et la couche inférieure. nous observons une évolution irrégulière des teneurs de potassium (fig.42-D), elles sont inferieures à 4 meq/l dans la plupart des échantillons, sauf au niveau de la station (S7) située dans la région de Berrahal, atteignant un maximum de 7.32 meq/l.



Figure 42 : Evolution de la concentration des cations dans les solutions de sols du lac Fetzara.

b- La concentration des anions

• <u>Teneurs en chlorures (CI)</u>: le chlorure est un élément principal responsable de la formation des sols salés. Il a une solubilité très élevée et une forte toxicité pour les végétaux, il se trouve sous plusieurs formes de sels ; chlorure de sodium (NaCl), chlorure de potassium (KCl), chlorure de calcium (CaCl₂) et chlorure de magnésium (MgCl₂).

Les chlorures représentent l'élément le plus important par rapport aux autres anions, avec des concentrations moyennes d'ordre de 105 et 139.17 meq/l respectivement pour les deux couches (0 - 25 cm et 25 - 50 cm) (fig.43-A). On note aussi une évolution importante des concentrations en chlorures en fonction de la profondeur dans la majorité des échantillons.

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées en S3 et S6 dans la partie Sud du lac, et en S9, S10, S11 et S12 au Nord-Est du lac (Oued Zied) avec un maximum de 240 meq/l.

• <u>Teneurs en sulfates $(SO_4^{2^-})$ </u>: les sels sulfatés se trouvent en quantités variables dans les sols. Parmi ces sels, les sulfates de calcium (CaSO₄), les sulfates de magnésium (MgSO₄), les sulfates de sodium (Na₂SO₄) et les sulfates de potassium (K₂SO₄).

Les sulfates sont présents dans les solutions de sols à des concentrations moyennes d'ordre de 26.24 et 31.09 meq/l, l'évolution spatiale des sulfates est pratiquement identique à celle des chlorures, les valeurs les plus élevées sont enregistrées toujours dans les échantillons S3, S6, S9, S10 et S11 avec une teneur maximale de 61.98 meq/l (fig.43-C).



Figure 43 : Evolution de la concentration des anions dans les solutions de sols du lac Fetzara.

• <u>Teneurs en bicarbonates (HCO₃</u>): les bicarbonates résultent essentiellement par la dissolution des formations carbonatés ; la calcite (CaCO₃) et la dolomite (CaMg(CO₃)₂). Les bicarbonates sont présents dans les solutions de sols en quantités pratiquement équivalentes, ils varient entre 0.60 et 4 meq/l, avec des moyennes d'ordre de 2.13 et 2.29 meq/l respectivement pour la couche supérieure (0 – 25 cm) et la couche inférieure

(25 – 50 cm) (fig.43-B). La concentration minimale est enregistrée au niveau de l'échantillon (S12) à l'Est du lac Fetzara (El Kantra) avec 0.6 meq/l.

4.3. Faciès chimiques des solutions de sols

Afin de déterminer les faciès chimiques dominants dans les solutions de sols du lac Fetzara et de suivre leur évolution dans l'espace et en fonction de la profondeur. Nous avons utilisé la formule ionique pour calculer le pourcentage de chaque ion par rapport à la somme des autres ions, afin de simplifier la classification par ordre décroissant les quantités en réaction en (méq/l) des groupes anions et cations (tab.33), puis les représenter sur le diagramme triangulaire de Piper. L'analyse des espèces chimiques montre que les solutions de sols sont caractérisées par l'abondance des ions (Na⁺, Cl⁻, Mg²⁺ et SO₄²⁻) dans la majorité des échantillons de sols, avec un ordre de classement décroissant Cl⁻ > SO₄²⁻> HCO₃⁻ pour les anions et Na⁺ + K⁺ > Mg²⁺ > Ca²⁺ pour les cations (tab.33).

Stations	Anions	Cations			
	Amons	(0 – 25 cm)	(25 -50 cm)		
1	$Cl^{-}>SO_{4}^{2-}>HCO_{3}^{-}$	$Na^{+}+K^{+}>Ca^{2+}>Mg^{2+}$	$Na^{+}+K^{+}>Ca^{2+}>Mg^{2+}$		
2	$Cl^{-} > SO_4^{-} > HCO_3^{-}$	$Na^{+}+K^{+}>Ca^{2+}>Mg^{2+}$	$Na^++K^+>Mg^{2+}>Ca^{2+}$		
3	$Cl^{-} > SO_4^{-} > HCO_3^{-}$	$Mg^{2+} > Na^{+} + K^{+} > Ca^{2+}$	$Na^{+}+K^{+}>Ca^{2+}>Mg^{2+}$		
4	$Cl^{-} > SO_4^{2^-} > HCO_3^{-}$	$Na^{+}+K^{+}>Mg^{2+}>Ca^{2+}$	$Na^{+}+K^{+}>Mg^{2+}>Ca^{2+}$		
5	$Cl^{-} > SO_4^{2^-} > HCO_3^{-}$	$Na^{+}+K^{+}>Mg^{2+}>Ca^{2+}$	$Na^{+}+K^{+}>Mg^{2+}>Ca^{2+}$		
6	$Cl^{-} > SO_4^{2^-} > HCO_3^{-}$	$Mg^{2+} > Na^{+} + K^{+} > Ca^{2+}$	$Mg^{2+} > Na^{+} + K^{+} > Ca^{2+}$		
7	$Cl^{-} > SO_4^{2-} > HCO_3^{-}$	$Na^{+}+K^{+}>Ca^{2+}>Mg^{2+}$	$Na^{+}+K^{+}>Ca^{2+}>Mg^{2+}$		
8	$Cl^{-} > SO_4^{2^-} > HCO_3^{-}$	$Na^{+}+K^{+}>Mg^{2+}>Ca^{2+}$	$Na^{+}+K^{+}>Mg^{2+}>Ca^{2+}$		
9	$Cl^{-} > SO_4^{2-} > HCO_3^{-}$	$Mg^{2+} > Na^{+} + K^{+} > Ca^{2+}$	$Mg^{2+} > Na^{+} + K^{+} > Ca^{2+}$		
10	$Cl^{-} > SO_4^{2^-} > HCO_3^{-}$	$Na^{+}+K^{+}>Mg^{2+}>Ca^{2+}$	$Na^{+}+K^{+}>Mg^{2+}>Ca^{2+}$		
11	$Cl^{-} > SO_4^{2^-} > HCO_3^{-}$	$Na^{+}+K^{+}>Mg^{2+}>Ca^{2+}$	$Na^{+}+K^{+}>Mg^{2+}>Ca^{2+}$		
12	$Cl^{-} > SO_4^{2-} > HCO_3^{-}$	$Na^{+}+K^{+}>Mg^{2+}>Ca^{2+}$	$Na^{+}+K^{+}>Mg^{2+}>Ca^{2+}$		

Tableau 33 : Classification des solutions de sols selon la formule ionique.

Le report des résultats des analyses chimiques des solutions de sols sur le diagramme de Piper (fig.44), nous permet de donner une idée sur les éléments prédominants et d'aboutir aux remarques suivantes :

Sur les triangles des anions, nous remarquons la dominance totale des chlorures, ils représentent une moyenne de 79.29 % et 80.74 % de la somme totale des anions respectivement pour les deux couches (0 - 25 cm et 25 - 50 cm), où les échantillons forment pratiquement un seul grand groupe, proche du pôle chloruré. Les sulfates se trouvent en deuxième position avec une moyenne de 18.59 % pour la première couche et 17.78 % pour la deuxième. Par contre les bicarbonates présentent de faibles quantités ne dépassant pas 4.5 %.



B- Deuxième couche (25 - 50 cm)

Figure 44 : Faciès chimiques des solutions de sols de la région du lac Fetzara.

Concernant les triangles des cations, le sodium est l'ion le plus important, il représente 47.81 % et 50.51 % de la somme totale des cations respectivement pour la couche supérieure et inferieure. Le magnésium vient en deuxième position avec une moyenne de 31.52 % et 32.70 %, il est dominé dans cinq échantillons par rapport le sodium et le calcium. En fin, on trouve le calcium en troisième position avec un taux de 20.67 % et 16.79 %, et parfois dans certains échantillons, il occupe la deuxième position après le sodium.

D'une manière générale, nous remarquons que les solutions de sols sont caractérisées par l'abondance des ions (Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺ et Mg²⁺), avec la dominance d'un faciès chloruré sodique pour la plupart des échantillons de sols (fig.44), à l'exception des échantillons S6, S'6, S9 et S'9 et la couche supérieure de l'échantillon S3 où le faciès chloruré magnésien prédomine (fig.44-A).

5. Etude statistique des données chimiques des solutions de sols

5.1. Analyses en composantes principales (ACP)

L'ACP est une méthode statistique essentiellement descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique, le maximum de l'information contenu dans un tableau de données. Ce tableau est constitué, en lignes par des individus (points de prélèvement) sur lesquels sont mesurées des variables quantitatives (éléments physico-chimiques) disposées en colonnes. Le but recherché est de déterminer la structure des variables, leur répartition ainsi que leur implication.

L'analyse effectuée (ACP) a été réalisée sur un tableau de données à 12 variables (CE, pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , humidité (H %), carbone organique (CO) et matière organique (MO)) et à 24 échantillons (individus). L'interprétation de l'analyse se fera selon l'ordre des informations par le logiciel (*SPAD version 5.5*).

Pour le traitement des données statistiques, nous avons choisi les trois premiers axes factoriels qui expriment 74.53 % de la variance totale avec ; 45.89 % pour le premier facteur ; 18.01 % pour le second et 15.14 % pour le troisième facteur (fig.45).



Figure 45 : Variance des quatre premiers axes factoriels
5.2. Matrice des corrélations

La matrice montre qu'il existe des corrélations positives et négatives très significatives entre les éléments physico-chimiques (tab.34). La signification du coefficient de corrélation (r) est fonction du nombre des individus traités (n), pour le cas présent nous avons (n = 24), donc le coefficient « r » accepté d'après *Mangin* est de 0.68 *(annexe.4),* ce qui nous permet de dégager les associations suivantes :

$CE - Mg^{2+}; r = 0.84$	CO - M.O; r = 0.99	$HCO_3^{-} - SO_4^{2-}$; r = 0. 69
$CE - Cl^{-}; r = 0.98$	$Mg^{2+} - SO_4^{2-}$; r = 0.84	$Cl^{-} - SO_4^{2-}$; $r = 0.81$
$CE - Na^+$; $r = 0.68$	$Mg^{2+} - Na^+$; r = 0.73	$Na^+ - Cl^-; r = 0.72$
$CE - HCO_3$; r = 0.80	$Mg^{2+} - Cl^{-}; r = 0.84$	$Na^{+} - SO_{4}^{2-}$; r = 0.66
$CE - SO_4^{2-}$; r = 0.80		

Tableau 34: Matrice des corrélations des paramètres physico-chimiques.

Variables	pН	CE	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl	HCO ₃ -	Na ⁺	\mathbf{K}^{+}	SO ₄ ⁻²	Н%	СО	M.O
рН	1.00											
CE	-0.16	1.00										
Ca ⁺²	0.01	0.49	1.00									
Mg ⁺²	-0.42	0.84	0.33	1.00								
Cl	-0.17	0.98	0.50	0.84	1.00							
HCO ₃ ⁻	0.01	0.67	0.03	0.64	0.61	1.00						
Na ⁺	-0.54	0.68	0.12	0.73	0.72	0.51	1.00					
K ⁺	0.56	0.44	0.14	0.16	0.43	0.33	-0.14	1.00				
SO_4^{-2}	-0.24	0.80	0.35	0.84	0.81	0.69	0.66	0.24	1.00			
Н%	-0.03	0.50	0.40	0.47	0.51	0.46	0.43	-0.07	0.50	1.00		
CO	0.00	0.09	0.19	0.15	0.10	0.34	0.29	-0.16	0.20	0.39	1.00	
M.O	0.04	0.06	0.18	0.11	0.06	0.32	0.24	-0.12	0.18	0.38	0.99	1.00

5.3. Etude des variables et des individus

• Premier plan factoriel F1F2: l'observation du cercle de corrélation formé par les deux axes factoriels F1et F2, nous montre que le facteur F1 exprime 45.89 % de la variance (fig.46). Cet axe regroupe les sels solubles (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ et HCO₃⁻) sur sa partie positive et qui sont bien corrélés avec la conductivité électrique (CE), l'ensemble s'oppose au pH qui représente l'acidité des sols. Donc, c'est un axe qui traduit probablement le phénomène de salinisation affectant certains types de sols.

Le second axe F2, qui exprime 18.01 % de la variance, oppose le carbone et la matière organique au pH et le potassium K^+ . Il pourrait traduire d'une part, la dissolution des carbonates qui conduit à une consommation de CO₂, cette dernière est susceptible d'entraîner une variation du pH. Ce type de mécanisme est à l'origine d'une augmentation transitoire du pH conduisant à la dissolution de matières organiques (*Marlet et Job, 2006*) ; et d'autre part,

des phénomènes de fixation du K⁺ par certains minéraux argileux. La répartition des individus sur le plan (F1F2) nous a permet de visualiser deux groupes d'associations (fig.46-B). Le premier groupe (G1) se caractérise par des solutions fortement minéralisées, ce dernier s'oppose au deuxième groupe (G2) qui représente des solutions de sols à caractère basique et moins minéralisées.



Figure 46 : ACP des solutions de sols de la région du lac Fetzara selon le plan F1F2.

• *Second plan factoriel F1F3* : ce plan factoriel exprime une inertie totale d'ordre de 61 %, il comprend les axes F1 et F3 (fig.47), le premier axe a été discuté précédemment, traduit la concentration globale des solutions de sols (axe de minéralisation). Le second axe F3 représente par sa partie positive les solutions de sols à caractère alcalin et riches en potassium, résultant d'une fixation de ce dernier par certains minéraux argileux (fig.47-A).





Figure 47: ACP des solutions de sols de la région du lac Fetzara selon le plan F1F3.

6. Salinité et sodicité des sols

Le risque de dégradation des sols peut être apprécié par deux critères importants à savoir, la teneur en sels solubles qui mesure la salinité au sens strict et le pourcentage de sodium échangeable dans le sol mesurant la sodisation *(Ouardi, 2005)*.

La salinisation est un terme générique caractérisant une augmentation progressive de la concentration des sels dans les sols. Elle peut affecter des milieux naturels sans qu'il y ait intervention directe de l'homme. Il s'agit alors de salinisation primaire. Elle peut aussi être une résultante de pratiques agricoles et de l'irrigation sur des sols cultivés, c'est alors une salinisation secondaire.

Le phénomène de sodisation, s'agit d'un échange de sodium sur le complexe absorbant des argiles. La capacité du sol d'échanger des cations est appelée capacité d'échange cationique (CEC). La sodisation est mesurée en pourcentage de la CEC occupée par le sodium. Ce pourcentage est nommé le pourcentage de sodium échangeable (ESP), il est donné par la formule suivante : $ESP(\%) = (Na^+/CEC) * 100$

Durant notre étude, nous n'avons pas effectué les mesures de la capacité d'échange cationique (CEC), c'est pour cela nous avons été obligé de chercher d'autres méthodes pour calculer le pourcentage du sodium échangeable (ESP). Nous avons utilisé une équation empirique proposée par *USSL (1954)*, cette dernière s'exprime par le pourcentage du sodium échangeable (ESP) en fonction des valeurs du rapport d'adsorption de sodium (SAR) des solutions du sol. Elle est utilisée par plusieurs auteurs *(Cheverry, 1972 ; Saidi et al., 2008 ; Boutelli, 2012)*, et peut s'écrire par la formule suivante :

$$ESP(\%) = \frac{100(-0.0126 + 0.01475 * SAR)}{1 + (-0.0126 + 0.01475 * SAR)}$$

Cette équation empirique satisfait la condition de limite théorique pour les hautes valeurs du SAR et ESP. Toutefois, les données utilisées dans le calcul de ce rapport étaient SAR < 65 et ESP < 50.

Le rapport d'adsorption de sodium (SAR), a été développé pour décrire empiriquement le déséquilibre entre les cations bivalents (calcium et magnésium) et le sodium pour évaluer le risque de sodisation du complexe adsorbant, il a été calculé selon la formule suivante où les concentrations sont exprimées en (meq/l) :

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

Le tableau ci-dessous (tab.35) montre la variabilité et l'ordre de grandeur du pourcentage de sodium échangeable (ESP) et le rapport d'adsorption de sodium (SAR) des solutions de sols de la région du lac Fetzara.

Couche (0 - 25 cm)	SAR	ESP (%)	Couche (25 - 50 cm)	SAR	ESP (%)	
S1	3.62	3.92	S'1	4.52	6.41	
S2	5.32	6.18	S'2	6.25	7.31	
S3	3.43	3.66	S'3	3.76	18.06	
S4	5.04	5.81	S'4	6.38	4.70	
S5	5.61	6.55	S'5	5.84	6.41	
S6	3.78	4.14	S'6	4.00	21.11	
S7	0.75	0.15	S'7	1.37	3.48	
S8	3.72	4.06	S'8	4.61	12.46	
S9	3.76	4.11	S'9	4.89	24.45	
S10	6.95	8.25	S'10	7.01	14.12	
S11	6.48	7.66	S'11	7.68	11.89	
S12	6.48	7.66	S'12	7.16	10.73	
Max	6.95	8.25	Max	7.68	24.45	
Min	0.75	0.15	Min	1.37	3.48	
Moy	4.58	5.18	Моу	5.29	11.76	

 Tableau 35 : Le rapport d'adsorption de sodium et le pourcentage de sodium échangeable des solutions de sols de la région du lac Fetzara.

6.1. Classification des sols salins

Il existe différentes méthodes de classification des sols salins, américaine, française, russe et *FAO (1975)*. Parmi ces classifications et la plus utilisée est la classification de l'*USSL (1954) (tab.36)*, parce qu'elle est basée sur des paramètres faciles à obtenir comme la conductivité électrique et le pourcentage du sodium échangeable (ESP).

Tableau 36 : Classification des sols salins selon USSL (1954).

Paramètres	$CE \le 4 \text{ mS/cm}$	<i>CE</i> > 4 mS/cm		
<i>ESP</i> ≤ 15 %	sols non salins et non alcalins	Sols salins		
<i>ESP</i> > 15 %	sols alcalins	sols alcalino-salins		

- Sols salins : sols caractérisés par une teneur élevée en sels (Aubert, 1983 ; Ouardi, 2005). Ils sont généralement floculés, ce qui contribue à maintenir une bonne structure du sol et une bonne circulation de l'eau et de l'air (Ouardi, 2005). Ces sols sont caractérisés par une conductivité électrique de l'extrait de saturation supérieur à 4 mS/cm, un pH inferieur à 8.5 et un pourcentage de sodium échangeable inférieur à 15 %.
- *Sols salins à alcalins :* caractérisés par une conductivité électrique de l'extrait de saturation supérieur à 4 mS/cm et pH supérieur à 8.5. Par définition, ce sont des sols qui contiennent suffisamment de sels solubles et de sodium échangeable supérieur à 15 %.

• *Sols alcalins* : sols présentant un taux de sodium échangeable suffisamment élevé, mais ils ne contiennent pas des quantités excessives de sels solubles *(Aubert, 1983 ; Ouardi, 2005)*. Ces sols sont caractérisés par une conductivité électrique de l'extrait de saturation inférieur à 4 mS/cm, un pH compris entre 8.5 et 10 et un pourcentage de sodium échangeable supérieur à 15 %.

6.2. Les sols du lac Fetzara

La représentation graphique de la variation du pourcentage du sodium échangeable (ESP) en fonction de la conductivité électrique mesurée sur l'extrait de pâte saturée, et d'après la classification proposée par *USSL (1954)*, nous remarquons que la majorité des sols étudiés de la région du lac Fetzara (environ 87.5 %) sont classés parmi les sols salins (ESP ≤ 15 %, CE > 4 mS/cm) (fig.48), le reste (trois échantillons de la couche inferieure 25 – 50 cm) fait partie des sols alcalino-salins (ESP ≥ 15 %, CE > 4 mS/cm).



Figure 48 : Classification des sols de la région du lac Fetzara selon USSL (1954).

6.3. Influence de la salinité sur les propriétés physiques des sols

La salinité du sol correspond à la quantité de sels solubles dans le sol. L'influence de cette dernière sur la qualité des sols se traduit par des modifications notables sur ses propriétés physiques. La structure des sols du lac Fetzara est du type prismatique à tendance columnaire, ces caractéristiques sont celles des sols affectés par la salinité.

Le sodium est l'élément responsable de la détérioration de la structure et ceci même en faibles quantités *(Aubert, 1983)*, contrairement aux ions Ca⁺² et Mg⁺² qui ont un effet favorable sur les propriétés physiques des sols *(Dermoch, 1976 ; in Djamai, 1993)*.

La dispersion des particules fines provoquant un colmatage des pores entraînant une réduction de la porosité et par conséquent celle de la perméabilité comme dans le cas des sols du lac Fetzara. Cependant sur le terrain, il y a une difficulté à lier la présence du sodium échangeable à une quelconque détérioration de la structure des sols, ceci peut être due à la présence des sels neutres qui maintiennent l'argile à l'état floculé et à celle du gypse et la calcite qui stabilisent la structure *(Halitim, 1988 ; Djamai, 1993 et 2007)*.

6.4. Influence de l'eau salée sur les sols

L'eau est un facteur important de la genèse des sols, c'est l'agent principal de l'altération, de la décomposition et de la désagrégation des roches. Son rôle sur la pédogenèse est surtout perçu au travers certaines caractéristiques du climat dont les précipitations. Au niveau de la région du lac Fetzara, l'eau commande en permanence l'évolution des caractéristiques physiques et chimiques des sols. Son effet est conditionné par les inondations d'hiver et l'exondation estivale.

6.4.1. Effet de l'eau salée sur les caractéristiques physiques de sols

Les caractéristiques physiques les plus couramment étudiées sont la granulométrie, la porosité, la stabilité structurale, la perméabilité, etc.... Ces caractéristiques évoluent pour un sol donné d'une saison à l'autre. Leur évolution est donc étroitement liée au cycle de l'eau, elle provoque ;

- Un appauvrissement des couches supérieures du sol par entraînement en profondeur de leurs éléments solides et solubles.
- Une augmentation de l'indice d'instabilité structurale,
- Une légère amélioration de la porosité en favorisant la prolifération des microorganismes,
- Un ralentissement du drainage interne (principalement dans les sols hydromorphes formés sur nappe peu profonde).

6.4.2. Effet de l'eau salée sur les caractéristiques chimiques et physico-chimiques de sols

Les caractéristiques chimiques permettent d'évaluer les concentrations des différents éléments minéraux contenus dans le sol et d'apprécier, d'une façon globale la fertilité. La teneur en matières organiques (carbone, azote et rapport C/N), la capacité d'échange cationique, la somme des bases échangeables, le taux de saturation, le pH et les teneurs en oligo-éléments sont également influencés par la qualité des eaux.

En effet, l'eau joue deux rôles opposés, elle contribue à la salinisation des sols par ses apports en éléments minéraux et son évaporation, et assure le lessivage de ces derniers au niveau des couches de surface.

7. Conclusion

Les études pédologiques effectuées sur les sols du lac Fetzara, nous ont permis de ressortir quatre classes de sols, les sols peu évolués, les vertisols, les sols hydromorphes et les sols halomorphes.

L'interprétation des données analytiques par les différentes méthodes, nous a amené au constat que les sols du lac Fetzara sont caractérisés par une porosité moyenne d'ordre de 12 %, un coefficient de perméabilité inférieur à 2 cm/h, un pH faiblement acide à alcalin (5.97 à 8.10) et une teneur en matière organique très variable (0.4 à 3.47 %).

Les analyses granulométriques montrent la dominance de la fraction limoneuse dans la majorité des échantillons, avec des valeurs moyennes de 69.34 % pour la première couche (0 - 25 cm) et 58.67 % pour la deuxième (25 - 50 cm).

La majorité des sols sont classés parmi les sols salins (ESP ≤ 15 %, CE > 4 mS/cm) avec une conductivité électrique très variable (6.52 à 24.3 mS/cm) et un maximum dans les parties Nord-Est (Oued Zied) et au Sud-Est du lac (Cheurfa). Les solutions de sols sont caractérisées par l'abondance des ions (Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺ et Mg²⁺), avec la dominance d'un faciès chloruré sodique dans la plupart des échantillons analysés.

En fin, l'étude statistique par l'analyse en composantes principales (ACP) a montré que la salinité des sols du lac Fetzara semble être contrôlée essentiellement par deux processus, à savoir ; la forte évaporation des eaux qui caractérise la région d'étude et les phénomènes d'échange ioniques entre le complexe adsorbant et les solutions de sols.

B. Hydrogéochimie

1. Introduction

Il est évident que le chimisme naturel des eaux dépend principalement de la nature des formations géologiques des milieux traversés et du temps de séjour des eaux ; en effet, l'interaction eau - roche est responsable de la modification des teneurs des éléments majeurs constitutifs (calcium, magnésium, sodium, potassium, chlorure, sulfate et bicarbonate, etc...). Les concentrations de ces éléments naturels sont conditionnées par divers facteurs, tels que les facteurs climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface. Dans la région du lac Fetzara, le chimisme des eaux (souterraines et de surface) est souvent influencé par l'effet de la dissolution des formations géologiques, l'évaporation des eaux du lac, les rejets industriels et l'activité agricole.

Le présent chapitre a été mené afin de connaître le régime, l'origine, le mécanisme du chimisme, l'évolution des éléments chimiques décrits et de caractériser la qualité des eaux souterraines et de surface du bassin versant du lac Fetzara.

2. Echantillonnage et analyse hydrochimique

Deux campagnes de prélèvements (février et novembre 2009), pour un total de 95 échantillons, ont été effectuées afin d'étudier la qualité des eaux souterraines et de surface, l'origine de la salinité et son évolution spatio-temporelle. Les analyses effectuées se rapportent aux eaux souterraines de la nappe superficielle et aux eaux de surface du bassin versant du lac Fetzara. Les prélèvements sont répartis de la façon suivante :

• *Eaux souterraines* : 22 puits ont été choisis pour chaque campagne, soit 44 échantillons, ils sont bien répartis et couvrent la totalité de la nappe superficielle aux alentours du lac Fetzara (fig.49).

• *Eaux de surface* : Les prélèvements ont été effectués sur tous les affluents qui alimentent le lac, plus le canal principal et oued Meboudja qui assurent le drainage des eaux du lac (fig.50). Les échantillons sont répartis de la façon suivante : 29 échantillons pour la première campagne (février 2009) et uniquement 22 échantillons pour la deuxième (novembre 2009), puisque la plupart des cours d'eaux sont taris durant cette période.

- *Mesures in situ* : Quatre paramètres physico-chimiques (le potentiel d'hydrogène, le potentiel de redox, la température et la conductivité électrique) ont été mesurés *in situ*, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon à l'aide d'une valise multi-paramètres de terrain.



Figure 49 : Localisation des points de prélèvements des eaux souterraines.



Figure 50 : Localisation des points prélèvements des eaux de surface.

- Analyse des éléments chimiques : Les analyses chimiques ont été effectuées sur les principaux éléments responsables à la minéralisation des eaux, appelés couramment les éléments majeurs ; les cations (calcium, magnésium, sodium et potassium) et les anions (chlorures, sulfates et bicarbonates). Au total 95 échantillons appartenant à des eaux de surface (51 échantillons) et de la nappe phréatique (44 échantillons) ont été analysés par des méthodes d'analyses internationales ; les anions (Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻) par méthodes colorimétriques et les cations (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ et K⁺) par complexométrie et spectrométrie d'absorption atomique à flamme (*Perkin-Elmer 1100*). Pour les différentes analyses des eaux de surface et souterraines, les erreurs d'analyses ont été tolérés jusqu'à 10 % de la balance ionique.

3. Caractérisation physico-chimique des eaux

3.1. Détermination des principaux faciès hydrochimiques

L'interprétation des résultats d'analyses chimiques des éléments majeurs: Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻ et HCO₃⁻ était nécessaire pour bien identifier les faciès hydrochimiques et avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux de surface et souterraines du bassin versant du lac Fetzara. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours à la formule ionique pour le calcul des quantités en réaction et la classification des ions et au diagramme de Piper pour la représentation graphique des résultats. La réalisation de ce dernier a été faite grâce au logiciel *Diagrammes*, conçu par *Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon, 2004*).

3.1.1. Formule ionique

La formule ionique consiste à calculer le pourcentage de chaque ion (r %) par rapport à la somme des autres ions (C) ;

$$r \% = (c * 100) / C$$

Avec;

c : concentration de l'ion considéré en meq/l ;

C : somme des ions en meq/l ;

Cette formule a pour but de classer par ordre décroissant les quantités en réaction (en méq/l) des groupes anions et cations et permet de définir les caractéristiques physico-chimiques des eaux et de les classer selon la même origine. Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant (tab.37).

Types d'eaux	Campagnes	Faciès chimiques	Effectifs	Pourcentage		
		Chloruré-sodique	12	54.55 %		
es	Février 2009	Chloruré-magnésien	6	21.92.0/		
ain		Chloruré-calcique	1	51.82 70		
err	(22 échantillons)	Bicarbonaté-sodique	2	9.09 %		
out		Bicarbonaté-magnésien	1	4.54 %		
Z Z	Novembre 2000	Chloruré-sodique	16	72.73 %		
auy	Novembre 2009	Chloruré-magnésien	2	9.09 %		
Ä	(22 échantillons)	Bicarbonaté-sodique	3	13.64 %		
	(22 conditions)	Bicarbonaté-magnésien	1	4.54 %		
		Chloruré-sodique	16	55.17 %		
	F/ : 2 000	Chloruré-calcique	6	27 59 %		
face	Février 2009	Chloruré-magnésien	2	27.39 70		
	(29 échantillons)	Bicarbonaté-calcique	3	12 70 %		
sur	()	Bicarbonaté-magnésien	1	13.79 70		
de		Sulfaté-calcique	1	3.45 %		
X		Chloruré-sodique	5	22.73 %		
Eau	Novembre 2009	Chloruré-magnésien	7	40.01.9/		
		Chloruré-calcique	2	40.91 /0		
	(22 échantillons)	Bicarbonaté-magnésien	6	26 26 0/		
		Bicarbonaté-calcique	2	30.30 %		

Tableau 37: Classification hydrochimique des eaux selon la formule ionique.

3.1.2. Digramme de Piper

Ce type de diagramme permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global (fig.51).



Figure 51 : Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants.

L'interprétation des résultats d'analyses hydrochimiques, correspondant aux périodes d'observations, a permis d'avoir une idée sur les faciès chimiques des eaux de notre zone d'étude, leur évolution dans le temps, ainsi que sur les conditions naturelles qui sont à l'origine de ces faciès.

3.1.2.1. Eaux souterraines

La représentation des données physico-chimiques des eaux souterraines du lac Fetzara (44 échantillons) des deux campagnes (février et novembre 2009) sur le diagramme de Piper ont montré l'existence de plusieurs éléments chimiques.

Les chlorures représentent l'élément le plus abondant dans la composition anionique des eaux souterraines avec des concentrations variant entre 2.41 et 32.11 méq/l (fig.52, fig.53). Ensuite, les bicarbonates constituent le deuxième pôle dominant, leurs concentrations varient de 1.38 à 9.55 méq/l. Concernant les cations, le sodium est l'élément le plus important avec des concentrations variant entre 1.65 et 25.52 méq/l (fig.52, fig.53). Alors que, les teneurs en calcium et en magnésium varient respectivement de 2.2 à 12.25 méq/l et de 2.07 à 13.73 méq/l. Ces éléments permettent de dégager des groupes à comportement commun qui reflètent des faciès chimiques dont les plus dominants sont les suivants:

★ Faciès chloruré-sodique : représente 54.55 % des échantillons pour la première campagne (février 2009) et 72.73 % pour la deuxième (novembre 2009), la bonne corrélation entre les ions Na⁺ et Cl⁻ confirme la même origine de ces deux éléments, qui serait la dissolution des formations évaporitiques (halite NaCl) au cours du transit des eaux dans la formation aquifère (Rouabhia et al., 2012).

★ Faciès chloruré-magnésien et calcique : représente 31.82 % des eaux souterraines de février 2009 (fig.52) et 9.09 % des eaux de novembre 2009 (fig.53). Les deux éléments (calcium et magnésium) interviennent dans plusieurs processus géochimiques tels que la dissolution et les précipitations secondaires des carbonates, l'échange cationique avec les minéraux argileux et la dissolution des minéraux gypseux.

✤ Faciès bicarbonaté-sodique : représente 9.09 % des échantillons pour la première campagne et 13.64 % pour la deuxième. Ceci est dû à la dissolution des formations carbonatées (cipolins, calcaire) par les apports souterrains sortant du socle métamorphique de l'Edough d'une part et d'autre part la dissolution des formations salifères (Djabri et al. 2008).



Figure 52 : Faciès des eaux souterraines selon le diagramme de Piper (février 2009)



Figure 53: Faciès des eaux souterraines selon le diagramme de Piper (novembre 2009)

3.1.2.2. Eaux de surface

La représentation sur le diagramme de Piper des teneurs en ions majeurs des 51 échantillons prélevés au niveau des cours d'eau qui alimentent le lac Fetzara, permet d'avoir une approche globale de la composition chimique des eaux de surface de notre région. Le triangle des anions montre que la plupart des échantillons occupent deux pôles (fig.54, fig.55),

l'un pour les chlorures et l'autre pour les bicarbonates ; les chlorures représentent l'élément le plus abondant avec des concentrations variant entre 2 et 39.07 méq/l. Ensuite, les bicarbonates avec des concentrations oscillant entre 1.1 méq/l à 8.1 méq/l. En ce qui concerne le triangle des cations, les ions magnésiens et calciques, marquent la totalité des échantillons représentés sur le triangle des cations, les teneurs en calcium et en magnésium varient respectivement de 1 à 12.2 méq/l et de 1.22 à 7.1 méq/l. Par contre, le sodium dominant surtout dans les eaux du canal principal et de l'oued Meboudja avec des teneurs atteignant 22.17 méq/l.



Figure 54 : Faciès des eaux de surface selon le diagramme de Piper (février 2009)



Figure 55: Faciès des eaux de surface selon le diagramme de Piper (novembre 2009)

Le diagramme de Piper montre la dominance de trois faciès chimiques (fig.54, fig.55):

✤ Faciès chloruré-sodique : représente 55.17 % des eaux de la première campagne et 22.73 % des eaux pour la deuxième. Ce type de faciès est observé surtout à l'exutoire du lac Fetzara au niveau des eaux du canal principal et oued Meboudja. Ce dernier indique des apports plus riches en éléments salifères, dus à l'effet de l'évaporation au niveau du lac Fetzara.

✤ Faciès chloruré-calcique et magnésien : représente 27.59 % des eaux de février et 40.91 % pour novembre. Généralement, ce type de faciès caractérise les eaux issues des bordures Nord et Sud du lac Fetzara et reflète l'influence des apports des massifs calcaires environnants.

✤ Faciès bicarbonaté-calcique et magnésien : représente 13.79 % des échantillons de la première campagne (fig.54) et 36.36 % pour la deuxième (fig.55). Ce type de faciès est observé surtout au Nord, sur l'axe Berrahal-Oued Zied et au Sud-Est du lac Fetzara dans la commune de Cheurfa (C8 et C10), ce faciès est dû d'une part à la dissolution des cipolins du socle métamorphique de l'Edough au Nord et d'autre part aux formations carbonatées du côté Sud.

4. Evolution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques

4.1. Eaux souterraines

Les eaux souterraines contiennent toujours des sels dissous qui leur confèrent les caractéristiques du milieu dont elles sont issues. Ces sels peuvent également provenir de phénomènes exogènes qui ont contribué à des modifications de la chimie du milieu, parmi lesquels nous notons l'évaporation et le lessivage *(Gouaidia, 2008)*.

Afin d'apprécier la répartition spatiale des principaux éléments chimiques, leur évolution dans le temps et leur origine, nous avons procédé à une cartographie de ces éléments chimiques. La cartographie hydrochimique a été illustrée par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel *Surfer 10 (Golden Software)*.

Le tableau suivant (tab.38) montre la variabilité et l'ordre de grandeur des différents paramètres physico-chimiques des eaux souterraines analysées durant les deux campagnes. Les valeurs de l'écart-type dans la plupart des cas sont inférieures à celle de la moyenne, ce qui indique une certaine homogénéité dans le type d'eau.

Eléments		Fév	vrier 2009		Novembre 2009				Normes	
chimiques en mg/l	Min	Max	Моу	Ecart- type	Min	Max	Моу	Ecart- type	(OMS)	
CE	292	6800	1687.41	1376.28	591	20900	2985.77	4245.9	400 µs/cm	
pН	6.63	8.12	7.66	0.47	6.46	7.48	7.04	0.23	6.5 - 8.5	
Eh	171	237	214.91	19.08	-209	428	173.73	106.34	/	
Т	13.9	19.4	16.18	1.42	18.44	23.7	21.63	1.16	25°C	
Na ⁺	38.02	437.61	157.80	96.55	41	587	205.09	125.37	150 mg/l	
K ⁺	2.06	31.02	12.41	6.89	1.2	42.5	7.74	9.58	12 mg/l	
Ca ²⁺	52	245.1	91.56	40.34	44	192	92.99	36.62	100 mg/l	
Mg ²⁺	24.8	144	61.47	28	28.16	164.8	68.23	32.70	50 mg/l	
Cl	85.57	1007	353.19	237.78	116.5	1140	410.5	278.79	200 mg/l	
HCO ₃ ⁻	94.92	582.7	246.09	104.59	84.09	438	256.45	88.99	/	
SO ₄ ²⁻	10.27	402	128.41	104.42	10	228.12	140.74	59.36	250 mg/l	

Tableau 38: Variation des différents paramètres physico-chimiques des eaux souterraines.

4.1.1. Température (T °C)

La température de l'eau est un paramètre très important, elle régit les activités chimiques, bactériologiques et l'évaporation de l'eau. Elle oscille entre 13.9 et 19.4°C avec une moyenne de 16.18°C pour la première campagne (février 2009). Une légère augmentation de la température marquée en novembre, elle varie entre 18.44 et 23.7°C avec une moyenne de 21.63°C (fig.56), mais reste inférieure à la norme de potabilité (25°C). Cette augmentation est due principalement à la température extérieure de la saison.



Figure 56 : Variation de la température des eaux souterraines (février et novembre 2009)

4.1.2. Potentiel hydrogène (pH)

Le pH de l'eau est défini selon la concentration des ions H^+ contenus dans la solution, il exprime l'alcalinité ou l'acidité du milieu, aussi c'est un élément important sur le caractère agressif ou incrustant de l'eau.

La figure 57 montre que les valeurs du pH fluctuent entre 6.63 et 8.12 avec une moyenne de 7.66 au mois de février et entre 6.46 et 7.48 avec une moyenne de 7.04 durant la deuxième campagne (novembre 2009), elles se trouvent dans l'intervalle des normes de potabilité (6.5 à 8.5). À l'inverse de la température, nous remarquons une diminution du pH sur toute la nappe durant la deuxième campagne (novembre 2009) où le pH ne dépasse pas 7.5. Cette dernière se traduit par une corrélation négative entre ces deux paramètres.





4.1.3. Potentiel d'oxydo-réduction (Eh) :

Le potentiel redox (Eh) permet de prévoir l'état des ions chimiques dans l'eau, la direction des réactions chimiques (oxydation, réduction) et l'évolution de la composition chimique des eaux naturelles au cours des échanges avec les autres phases de leur environnement. En générale, la variation du potentiel d'oxydo-réduction est très liée à l'effet des précipitations, il est élevé pendant la période des hautes eaux et faible pendant la période des basses eaux.

• *Février 2009* : la figure 58 montre que les valeurs du Eh oscillent entre 171 et 237 mV avec une moyenne de 214.91 mV, les plus fortes valeurs (> 230 mV) se rencontrent aux puits P20, P26 et P28 au Sud-Ouest et au Nord du lac Fetzara au niveau du puits P34 (fig.58).

• *Novembre 2009 :* d'une manière générale, durant cette campagne on remarque une légère diminution des valeurs du Eh dans la majorité des puits, à l'exception de deux puits P2 (El Kantra) et P20 (El Eulma); le premier puits (P2) situé dans une ferme à la proximité du canal principal avec un potentiel redox (Eh) très faible avec -209 mV (fig.59), traduisant un milieu réducteur et peut-être dû à la présence de formations argileuses empêchant l'oxygénation de la nappe. Par contre, il augmente dans le deuxième puits (P20) et atteint le maximum de 428 mV, dû certainement au contact direct avec l'air qui permet une bonne oxygénation des eaux.



Figure 58 : Carte du potentiel rédox (Eh) (février 2009)



Figure 59 : Carte du potentiel rédox (Eh) (novembre 2009)

4.1.4. Cartes des conductivités électriques (CE en µS/cm)

La conductivité électrique est un excellent indicateur de la minéralisation qui reflète la concentration de l'ensemble des minéraux dissous. Pour cela, nous avons effectué des mesures de la conductivité électrique durant les deux campagnes (février et novembre 2009).

• *Février 2009*: durant cette campagne, la conductivité électrique est comprise entre 292 et 6800 μ S/cm avec une moyenne d'ordre de 1687 μ S/cm. L'observation de la carte (fig.60) montre la présence de trois secteurs de faibles valeurs de la conductivité électrique (< 1000 μ S/cm). Il s'agit de la zone Sud-Ouest à proximité de oued Mellah au niveau des puits P24 et P26, au Nord-Ouest (P29) et l'Est du lac où se trouve le cordon dunaire d'El Kantra. Par contre, les fortes valeurs (> 2500 μ S/cm) sont localisées dans la limite Est au puits P1 à la proximité du canal principal et au Sud-Est du lac (Cheurfa) où la conductivité atteint son maximum (6800 μ S/cm) au puits P9. Ces valeurs montrent que tous les points d'eau dépassent largement la norme recommandée pour les eaux d'alimentation en eau potable (400 μ S/cm).

• Novembre 2009 : la conductivité électrique varie entre 591 et 20900 μ S/cm avec une moyenne d'ordre de 2985 μ S/cm. nous observons que la répartition des conductivités est analogue à la période précédente (février 2009), avec une augmentation des valeurs dans la majorité des puits, particulièrement dans la partie Sud-Est du lac au niveau du puits P9 avec 20900 μ S/cm (fig.61). Les faibles valeurs de la conductivité électrique (< 1000 μ S/cm) sont enregistrées presque sur l'ensemble des puits de la partie Nord du lac (Piémont de djebel Edough).



Figure 60 : Carte des conductivités électriques (février 2009)



Figure 61 : Carte des conductivités électriques (novembre 2009)

4.1.5. Cartes du calcium (Ca²⁺ en mg/l)

Cet élément est fréquent dans les roches carbonatées, sa présence dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO₃), soit la dissolution des formations gypseuses (CaSO₄, 2H₂O) selon les équations suivantes :

 $CaCO_3 \leftrightarrow Ca^{2+} + CO_3^{2-}$ $CaSO_4, 2H_2O \leftrightarrow Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$

• *Février 2009* : les concentrations en calcium oscillent entre 52 et 245 mg/l avec une moyenne de 91.5 mg/l. Les valeurs les plus élevées (> 100 mg/l) sont observées dans trois régions, Berrahal au puits P31, El Kantra au puits P1 et dans le Sud-Est du lac (Cheurfa) au puits P11 (fig.62). Les faibles concentrations (< 60 mg/l) sont enregistrées dans la région Sud-Ouest (à proximité de oued Mellah). Cependant, le reste de la plaine est caractérisé par des teneurs moyennes qui varient entre 60 et 100 mg/l. Ce qui indique que ces eaux sont moins influencées par la dissolution des formations carbonatées et gypseuses.

• *Novembre 2009* : les concentrations en Ca^{2+} durant cette campagne oscillent entre 44 et 192 mg/l (fig.63). Les plus faibles valeurs (< 60 mg/l) caractérisent les eaux de la patrie centrale de la plaine (P20, P34 et P47). Comparativement à celle de la première campagne (février 2009), nous remarquons une augmentation des teneurs aux bordures de nappe, elles atteignent un maximum de 192 mg/l au puits P11 dans la commune de Cheurfa.



Géochimie des sols et des eaux de la région du lac Fetzara

Figure 62 : Carte du calcium (février 2009)



Figure 63 : Carte du calcium (novembre 2009)

4.1.6. Cartes du magnésium (Mg²⁺ en mg/l)

Ses origines sont comparables à celle du calcium, car il provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (magnésite et dolomite) selon les relations suivantes :

 $\begin{array}{ll} \textit{Magnésite:} & \text{MgCO}_3 \leftrightarrow \text{Mg}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \\ \textit{Dolomite:} & \text{CaMg(CO}_3)_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 2\text{CO}_3^{2-} \end{array}$

• *Février 2009*: les concentrations en magnésium varient entre 24 et 144 mg/l avec une moyenne de 61.5 mg/l, elles sont supérieures à la limite admise par l'OMS (50 mg/l). Les teneurs les plus élevées (50 à 144 mg/l) sont observées dans la majorité des puits situés dans la partie Nord-Ouest (Berrahal) au puits P31 et sur le coté Est du lac Fetzara, avec un pic de 144 mg/l enregistré au niveau du puits P1 (fig.64). Les faibles teneurs (< 50 mg/l) apparaissent dans quelques échantillons surtout sur les bordures de la zone d'étude.



Figure 64 : Carte du magnésium (février 2009)



Figure 65 : Carte du magnésium (novembre 2009)

• *Novembre 2009* : comparativement à la première campagne (février 2009), nous remarquons une forte augmentation des concentrations au niveau de quelques échantillons (P3, P9 et P20) où elles dépassent les 100 mg/l (fig.65). Elles sont relativement faibles (< 50 mg/l) dans les puits P5, P11, P26, P29 et P38.

4.1.7. Cartes du sodium (Na⁺ en mg/l)

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères et à l'effet de la salinité marine. La dissolution des minéraux salifères se fait selon la relation suivante : NaCl \leftrightarrow Na⁺ + Cl⁻

• *Février 2009*: les teneurs du sodium varient entre 38 et 440 mg/l. Les fortes concentrations caractérisent les eaux de la région Est du lac Fetzara (P1), la région Sud-Est (P9) et au Nord-Est dans la commune de Oued Zied au niveau du puits (P46), avec des teneurs fluctuant entre 200 et 440 mg/l (fig.66). Par contre, le reste de la plaine (parties Nord-Ouest et Sud-Ouest du lac) présente des faibles concentrations inférieures à 200 mg/l.

• *Novembre 2009*: au cours de cette campagne, nous remarquons un accroissement des teneurs en Na⁺ qui dépassent les 200 mg/l dans la majorité des points d'eau, où les concentrations oscillent entre 40 et 590 mg/l avec une moyenne de 205 mg/l. La carte du sodium (fig.67) présente la même allure de la précédente, sauf que sur certains endroits, nous observons une augmentation importante des teneurs en sodium notamment aux puits P24 (El Eulma) et P3 (El Kantra) où les concentrations dépassent les 280 mg/l, indiquant l'existence de forts apports salifères à partir des formations évaporitiques.



Figure 66 : Carte du sodium (février 2009)



Figure 67 : Carte du sodium (novembre 2009)

4.1.8. Cartes du potassium (K⁺ en mg/l)

Le potassium (K⁺) est assez abondant sur la terre, mais peu fréquent dans les eaux. En effet, il est facilement adsorbé et recombiné dans les sols, sur les argiles notamment. Les sources principales de potassium sont les roches cristallines, mais dans des minéraux moins altérables que ceux qui contiennent du sodium, les évaporites (sylvinite), les argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques.



Figure 68 : Carte du potassium (février 2009)

Grossièrement, les teneurs en potassium varient entre 2 et 31 mg/l avec une moyenne de 12.41 mg/l au mois de février (fig.68), et entre 1.2 et 42.5 mg/l avec une moyenne de 7.74 mg/l durant la deuxième campagne (novembre 2009) (fig.69). Les fortes concentrations (> 12 mg/l) sont enregistrées sur la limite Est du lac Fetzara (P1, P9 et P43), alors qu'elles sont inferieures à 12 mg/l dans la majorité des puits. Une augmentation des concentrations est notée durant la deuxième campagne, où les teneurs atteignent 42 mg/l au niveau de P9 dans la commune de Cheurfa.



Figure 69: Carte du potassium (novembre 2009)

4.1.9. Cartes des chlorures (Cl⁻ en mg/l)

Les chlorures peuvent avoir une origine multiple, soit l'intrusion des eaux marines, ou la contamination par des eaux usées, soit la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères. La dissolution de ces sels étant très facile d'où leur présence en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argilo-sableuses ou argileuses.

• Février 2009 : la plupart des concentrations en chlorures oscillent entre 85 et 1007 mg/l avec une moyenne de 350 mg/l. La carte des chlorures (fig.70) montre que les fortes teneurs (> 500 mg/l) sont enregistrées dans la région Est (P1), la partie Sud-Est du lac Fetzara (Cheurfa) et au niveau du puits P31 dans la région de Berrahal. Par contre des concentrations relativement faibles (< 200 mg/l) caractérisent les eaux de trois secteurs, il s'agit du cordon dunaire d'El Kantra (P3 et P5), la partie Sud-Ouest du lac à proximité de oued Mellah (P24, P26 et P28) et la bordure Nord du lac au niveau du puits P38. Ces teneurs dépassent largement les normes de potabilité (250 mg/l).



Géochimie des sols et des eaux de la région du lac Fetzara

Figure 70 : Carte des chlorures (février 2009)



Figure 71 : Carte des chlorures (novembre 2009)

• *Novembre 2009* : durant cette période la répartition des concentrations est presque analogue à la période précédente où les teneurs varient entre 116.5 et 1140 mg/l avec une moyenne de 410.5 mg/l (fig.71). Cependant, nous observons une augmentation remarquable des teneurs, particulièrement aux puits P3, P24 et P46. Cette importante variation des teneurs, à cause des caractéristiques spéciales de cet élément qui ne rentre pas dans les phénomènes de précipitation chimique, ne s'adsorbe pas par les formations géologiques et qui reste très mobile *(in Debieche, 2002).*

4.1.10. Cartes des sulfates (SO₄²⁻ en mg/l)

Les origines des sulfates dans les eaux sont variées. Elles sont liées à l'eau de pluie (évaporation d'eau de mer) et à la mise en solution de roches sédimentaires évaporitiques, notamment les formations gypseuses, selon la relation : $CaSO_4$, $2H_2O = Ca^{2+} + SO_4^{2-} + 2H_2O$.



Figure 72 : Carte des sulfates (février 2009)



Figure 73: Carte des sulfates (novembre 2009)

• *Février 2009*: les concentrations en sulfates varient entre 10 et 402 mg/l avec une moyenne de 128 mg/l, dont les fortes teneurs (> 200 mg/l) se manifestent au Nord-Est du lac (Oued Zied) et au Sud-Est du lac Fetzara (Cheurfa) avec des pics de 285 mg/l et 402 mg/l

respectivement pour les puits P11 et P46 (fig.72), ceci est dû probablement aux formations géologiques qui fournissent cet élément à partir des argiles, des marnes et du gypse. Par contre, elles ne dépassent pas les 120 mg/l dans la majeure partie de la région d'étude.

• *Novembre 2009* : une légère augmentation des concentrations en sulfates dans la majorité des puits avec une moyenne de 140 mg/l. Les fortes valeurs se localisent au Nord-Est (Oued Zied) et au Sud-Est du lac Fetzara (Cheurfa) (fig.73). Elles restent inférieures à 80 mg/l dans le secteur Sud-Ouest de la nappe à partir d'El Eulma jusqu'à oued Mellah.

4.1.11. Cartes des bicarbonates (HCO₃⁻ en mg/l)

Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique. Leur origine principale est la dissolution des roches carbonatées et gypsifères selon l'équation suivante : $(Ca^{2+}, Mg^{2+}) CO_3 + H_2O + CO_2 = 2HCO_3^- + (Ca^{2+}, Mg^{2+})$.

• *Février 2009*: les teneurs en bicarbonates varient entre 95 et 582 mg/l avec une moyenne de 246 mg/l. Elles sont supérieures à 220 mg/l dans la majorité des puits avec des pics enregistrés au niveau des puits P3, P1, P34 et P28 (fig.74), ceci est dû au lessivage des roches calcaires d'une part et des formations salifères d'autre part. Par contre, elles ne dépassent pas les 200 mg/l dans la partie amont du lac (axe oued Mellah – Berrahal) et au Nord-Est dans la commune de Oued Zied.



Figure 74 : Carte des bicarbonates (février 2009)

• *Novembre 2009* : les bicarbonates présentent toujours des teneurs importantes variant entre 84 et 438 mg/l avec une moyenne de 256 mg/l. Durant cette campagne, nous observons une légère diminution des concentrations en bicarbonates dans la partie centrale et la région de

Berrahal (fig.75). Elles restent supérieures à 220 mg/l sur les bordures de la région d'étude, montrant ainsi l'effet des apports qui se font par les formations extérieures.



Figure 75: Carte des bicarbonates (novembre 2009)

4.2. Eaux de surface

Afin d'étudier la qualité des eaux superficielles du bassin versant du lac Fetzara et de déterminer l'origine et l'évolution de leur minéralisation, nous avons procédé à une étude hydrochimique de ces eaux. Cette étude a été effectuée sur la base des analyses chimiques de tous les affluents qui alimentent le lac, ainsi que le canal principal et l'oued Meboudja qui assurent son drainage, puisque la salinité des eaux du lac Fetzara et son évolution sont sous la dépendance des entrées et sorties d'eau dans le lac.

La salinité des eaux de surface dépend, ainsi, de nombreux facteurs et de leurs interactions, particulièrement le régime hydrologique du bassin versant, puisque la plupart des cours d'eau sont caractérisés par un régime très irrégulier, torrentiel en hiver et sec en été (Zenati, 1999; Zahi, 2008).

L'évaporation joue un rôle fondamental dans l'évolution du taux de salinité des eaux en fonction de la saison, du volume du réservoir (lac) et de la gestion des apports fluviaux, elle est particulièrement influente durant les périodes de basses eaux et de fermeture du pontvanne à l'exutoire du lac. La nature des formations géologiques traversées et les échanges entre le lac et la nappe sous-jacente sont aussi à prendre en considération. Le tableau suivant (tab.39) récapitule la variation des différents paramètres physico-chimiques des eaux de surface analysées durant les deux campagnes (février et novembre 2009).

Eléments		Fé	vrier 2009)	Novembre 2009				
en mg/l	Min	Max	Moy	Ecart-type	Min	Max	Moy	Ecart-type	Normes (OMS)
CE	162	2370	1048.17	638.12	420	8990	2572.45	2290.4	400 µs/cm
рН	6.85	8.8	7.74	0.54	6.62	7.24	6.98	0.17	6.5 - 8.5
Eh	109	256	205.10	30.47	76	226	167.5	43.38	/
Т	10.4	19.5	14.85	2.83	19.3	24.7	21.40	1.46	25°C
Na	29	178.08	85.95	41.83	17	510	155.55	169.16	150 mg/l
K	0.23	2.87	1.21	0.71	0.9	21.1	5.91	6.66	12 mg/l
Ca	28	102	64.97	18.45	32	142	84.05	31.89	100 mg/l
Mg	12.6	84.4	38.44	18.87	22	146.4	74.04	37.47	50 mg/l
Cl	88.75	532.5	224.44	132.89	71	1387	441.23	430.23	200 mg/l
HCO ₃	67.1	494.1	252.34	96.77	140.3	469.7	264.46	79.06	/
SO ₄	4.08	195.17	40.06	44.94	12	322	88.55	105.34	250 mg/l

Tableau 39: Variation des différents paramètres physico-chimiques des eaux de surface.

4.2.1. Température (T°C)

D'une manière générale, la température des eaux des différents affluents varie entre 10.4°C et 19.5°C avec une moyenne de 14.85°C pour la première campagne (février 2009) et entre 19.3°C et 24.7°C avec une moyenne de 21.4°C pour la deuxième campagne (novembre 2009). L'histogramme ci-dessous (fig.76) montre une augmentation de la température pour la deuxième campagne ce qui est logique, car la température des eaux de surface est très influencée par la température saisonnière.



Figure 76 : Variations de la température des eaux de surface (février et novembre 2009)

4.2.2. Conductivité électrique (CE µS/cm)

L'évolution de la conductivité électrique dans les eaux de surface est bien visible à l'échelle des saisons. La figure 77 montre que les valeurs de la conductivité électrique oscillent entre 162 et 2370 μ S/cm en février, elles sont inférieures à 1000 μ S/cm dans la plupart des affluents à cause des apports pluvieux qui diluent les concentrations. Durant la deuxième campagne (novembre 2009), nous observons une augmentation de la conductivité électrique, particulièrement à l'exutoire du lac Fetzara au niveau du canal principal et l'oued Meboudja, qui peuvent aller jusqu'à 9000 μ S/cm, liées aux apports plus riches en éléments salifères, dû à l'effet de l'évaporation au niveau du lac Fetzara.



Figure 77: Variations de la conductivité électrique dans les eaux de surface (février et novembre 2009)

4.2.3. Potentiel hydrogène (pH)

L'histogramme de variations du pH (fig.78) fait apparaître deux groupes d'eaux durant la première campagne (février 2009). Le premier groupe englobe les eaux issues de la bordure Sud et l'exutoire du lac Fetzara (canal principal et oued Meboudja), ce groupe se caractérise par des eaux à caractère basique, où les valeurs du pH varient entre 7.78 et 8.8, alors que le deuxième groupe observé au niveau des cours d'eau de la partie Nord (entre Berrahal et Oued Zied), se caractérise par un pH acide à neutre, oscillant entre 6.85 et 7.34.

Durant la deuxième campagne (novembre 2009), nous remarquons une diminution des valeurs du pH dans tous les affluents, elles fluctuent entre 6.62 et 7.24 avec une moyenne de 6.98 (fig.78). Cette diminution traduit l'augmentation de la minéralisation qui entraîne une élévation de la force ionique de l'eau et donc une diminution du pH.



Figure 78: Variations du pH dans les eaux de surface (février et novembre 2009)

4.2.4. Potentiel d'oxydo-réduction (Eh)

Le potentiel d'oxydo-réduction (Eh) est la mesure de la concentration des électrons en solution (en mV). Il permet de prévoir l'évolution de la composition chimique des eaux naturelles au cours des échanges avec les autres phases de leur environnement.

La figure 79 montre que la variation du potentiel d'oxydo-réduction dans les eaux de surface est irrégulière, les valeurs du Eh oscillent entre 109 et 256 mV avec une moyenne de 205 mV durant la première campagne.



Figure 79: Variations du Eh dans les eaux de surface (février et novembre 2009)

L'évolution du Eh est inversement proportionnelle à la température et presque similaire à la variation du pH. Nous observons une légère diminution du Eh durant la deuxième campagne (novembre 2009) où les valeurs fluctuent entre 76 et 226 mV avec une moyenne de 167.5 mV. Ce paramètre est très lié à l'effet des précipitations et à la température de l'air.

4.2.5. Teneurs en calcium

Généralement, l'existence de cet élément dans les eaux est lié à la nature des terrains traversés, par la dissolution des formations carbonatées (CaCO₃) et gypseuses (CaSO₄, 2H₂O).

L'histogramme ci-dessous (fig.80) montre que les teneurs en calcium durant les deux campagnes varient entre 28 mg/l et 142 mg/l, avec une moyenne de 65 mg/l au mois de février et de 84 mg/l au mois de novembre 2009. Nous observons une légère augmentation des concentrations dans la plupart des cours d'eau durant la deuxième campagne, elles sont supérieures à 100 mg/l à l'exutoire du lac Fetzara (canal principal et oued Meboudja) et en B7 et B8 dans la région de Oued Zied, ceci peut être expliqué par la dissolution des cipolins (socle métamorphique).



Figure 80: Variations des teneurs en calcium dans les eaux de surface (février et novembre 2009)

4.2.6. Teneurs en magnésium

L'histogramme suivant (fig.81) montre que l'évolution des teneurs en magnésium est presque analogue à celle du calcium. Nous observons une augmentation des concentrations en magnésium durant la deuxième campagne (novembre 2009), atteignant 146 mg/l. Les teneurs les plus élevées (> 50 mg/l) sont observées au niveau de trois secteurs ; la région de Oued Zied (B7, B8 et R Dech), l'axe Cheurfa- El Eulma (C9, C10, C12, C13 et oued El Hout) et

dans la partie aval au niveau des eaux du canal principal (C1, C2, C3 et C4) et oued Meboudja (fig.81). Alors que les plus faibles teneurs (< 50 mg/l) sont enregistrées à l'Est du lac Fetzara au niveau des cours d'eau C6, C7 et C8, dans la partie Sud-Ouest (C14, C15 et oued Mellah) et au Nord-Ouest (B1, B2, B3, B5 et B6).



Figure 81: Variations des teneurs en magnésium dans les eaux de surface (février et novembre 2009)

4.2.7. Teneurs en sodium

D'une manière générale, les concentrations en sodium sont très variables oscillant entre 17 mg/l et 510 mg/l avec un écart type d'ordre de 169.16 mg/l. Les teneurs sont inférieures à 100 mg/l dans la plupart des cours d'eau durant les deux campagnes (fig.82). Par contre, les fortes teneurs (> 100 mg/l) sont enregistrées en B7 et B8 à Oued Zied, au C9 à Cheurfa, au niveau des eaux du canal (C1, C2, C3 et C4) et oued Meboudja, où nous observons une forte augmentation des teneurs durant la deuxième campagne (novembre 2009) atteignant 500 mg/l. Dans ces derniers, l'origine du sodium est liée à la dissolution rapide des formations évaporitiques (halite NaCl) (*Débieche, 2002*) et aux apports salifères du lac Fetzara par l'effet de l'évaporation (*Zenati, 1999*).

4.2.8. Teneurs en potassium

La figure ci-dessous (fig.83) montre que les concentrations en potassium durant la première campagne (février 2009) ne dépassent pas les 3 mg/l dans tous les cours d'eau. Par contre, durant la deuxième campagne, une forte augmentation des teneurs est observée au niveau d'oued El Hout, oued Meboudja et le canal principal (C1, C2, C3 et C4) atteignant les 21 mg/l, avec une légère élévation des teneurs dans les autres cours d'eau, mais restent toujours inférieures à 5 mg/l. La présence de cet élément dans les eaux de surface est liée

aux rejets urbains et industriels dans le lac et probablement aux échanges de bases avec les formations argileuses riches en potassium.



Figure 82: Variations des teneurs en sodium dans les eaux de surface (février et novembre 2009)



Figure 83: Variations des teneurs en potassium dans les eaux de surface (février et novembre 2009)

4.2.9. Teneurs en chlorures

Les chlorures sont généralement très répandus dans la nature, sous forme de sels de sodium (NaCl) de potassium (KCl) et de calcium (CaCl₂), l'ion chlorure est très mobile.

La figure 84 montre que les concentrations en chlorures durant la première campagne (février 2009) sont très variables (écart type = 224.44 mg/l), elles oscillent entre 88.75 mg/l et 532.5 mg/l et dépassent les 250 mg/l dans certains cours d'eau notamment sur le canal principal (C1, C2 et C3), à Cheurfa (C9, C10 et C12) et à Oued Zied (B7 et B8).
Durant la deuxième campagne (novembre 2009) la répartition des concentrations est presque analogue à la précédente, avec une forte augmentation des teneurs surtout à Oued Zied (B7et B8), à Cheurfa (C9), sur le canal principal (C1, C2, C3, C4) et oued Meboudja où les concentrations varient entre 450 et 1400 mg/l (fig.84). La présence des chlorures dans ces eaux peut être liée à la pollution provenant des rejets urbains et industriels et à l'existence de forts apports salifères du lac Fetzara.



Figure 84 : Variations des teneurs en chlorures dans les eaux de surface (février et novembre 2009)

4.2.10. Teneurs en bicarbonates

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (cipolin, calcaire) par des eaux chargées en gaz carbonique *(Débieche, 2002)*. La figure 85 montre une variation importante et très irrégulière des teneurs en bicarbonates durant les deux campagnes (février et novembre 2009), les teneurs oscillent entre 65 et 500 mg/l.



Figure 85 : Variations des teneurs en bicarbonates dans les eaux de surface (février et novembre 2009)

Les fortes valeurs (> 250 mg/l) sont enregistrées au Sud-Est du lac dans la commune de Cheurfa (C8 et C10) et sur les cours d'eau de la partie Nord du lac sur l'axe Berrahal-Oued Zied (B2 jusqu'au B10), la présence des bicarbonates dans ces eaux est liée à la dissolution des cipolins de djebel Edough.

4.2.11. Teneurs en sulfates

Durant la première campagne (février 2009) les concentrations en sulfates de la majorité des échantillons sont inférieures à 100 mg/l. Les fortes valeurs (> 150 mg/l) sont enregistrées dans les eaux du Nord-Est du lac Fetzara (B8 et Oued Zied).

Durant la deuxième campagne, une légère variation des teneurs en sulfates est enregistrée dans la majorité des cours d'eau, mais reste inférieure à 50 mg/l (fig.86). Par contre, nous observons une forte augmentation des teneurs atteignant 322 mg/l, surtout à l'Est dans les eaux du canal principal (C1, C2, C3 et C4) et oued Meboudja, elles sont dues aux apports gypseux issus du lac Fetzara (*Debièche, 2002 ; Djabri et al., 2008*) et au Nord-Est au niveau de B7 et les rejets de la décharge publique (R Dech), elles sont liées à la dissolution des cipolins de l'Edough et de Beleleita.



Figure 86: Variations des teneurs en sulfates dans les eaux de surface (février et novembre 2009)

5. Analyse en composantes principales (ACP)

Dans cette étude, plusieurs analyses en composantes principales ont été effectuées sur les deux campagnes d'échantillonnage (février et novembre 2009) et qui se présentent en deux parties : analyse des eaux de surface et souterraines (nappe superficielle). Les données ont été traitées statistiquement grâce à l'utilisation du logiciel *SPAD (version 5.5)*.

Le but de cette analyse statistique (ACP) est de faire dégager les associations qui peuvent éventuellement exister et de ressortir les différents points d'eau qui possèdent des concentrations élevées en éléments chimiques par rapport aux autres. Cela nous permis de donner une idée préalable sur les éléments et les sites de pollution.

Dans cette étude, nous ne présenterons que la projection des variables et des individus sur le premier plan factoriel (F1F2) qui porte une inertie totale suffisante supérieure à 61 %, dans toutes les analyses en composantes principales, et que les autres axes des variances moindres donnent presque tous la même information (*Annexe.5*).

5.1. Eaux souterraines

L'analyse en composantes principales des eaux souterraines (nappes superficielles entourant le lac Fetzara) a été effectuée sur un tableau de données de 11 variables et 44 individus qui se distribuent sur deux campagnes d'échantillonnages, février et novembre 2009.

5.1.1. 1^{ère} Campagne (février 2009)

L'analyse des données durant cette campagne est effectuée sur 11 variables et 22 observations (puits). Le tableau ci-dessous (tab.40) rend compte des valeurs propres et des variances expliquées par les premiers axes factoriels. Il montre une variance de 61.48 % sur le premier plan F1F2, plusieurs relations entre les éléments chimiques ont été observées. Pour le traitement, nous avons choisi deux axes qui expriment 61.48 % des renseignements (fig.87).

Axes	F1	F2	F3	F4
Valeurs propres	4.95	1.81	1.13	0.92
Variance	45.01	16.47	10.26	8.33
% cumulé	45.01	61.48	71.74	80.07

Tableau 40: Variance des quatre premiers axes factoriels.



Figure 87: Variance des quatre premiers axes factoriels.

La matrice de corrélation entre les éléments chimiques (tab.41) montre que la conductivité est très corrélée avec les ions Cl⁻, Na⁺ et Mg²⁺, avec une relation importante entre ces derniers éléments (r > 0.7) indiquant que la salinité des eaux est due probablement à la dissolution des formations évaporitiques.

	CE	рН	Eh	Т	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO ₃	SO ₄
CE	1.00										
рН	0.02	1.00									
Eh	-0.54	-0.24	1.00								
Т	-0.08	-0.36	0.13	1.00							
Na	0.76	0.29	-0.58	-0.42	1.00						
К	0.47	0.01	-0.16	-0.31	0.51	1.00					
Ca	0.29	0.17	-0.33	-0.17	0.51	0.09	1.00				
Mg	0.86	-0.02	-0.38	-0.14	0.62	0.33	0.19	1.00			
Cl	0.87	0.28	-0.54	-0.35	0.93	0.45	0.51	0.74	1.00		
HCO ₃	0.63	-0.08	-0.32	0.26	0.31	0.37	0.35	0.46	0.43	1.00	
SO ₄	0.26	0.17	-0.49	-0.34	0.58	0.30	0.55	0.22	0.37	-0.01	1.00

Tableau 41: Matrice des corrélations (février 2009)

• Projection sur le plan factoriel F1F2 :

Le traitement des données sur le plan factoriel F1F2 a donné une inertie totale de 61.48 %. Ce plan factoriel s'est révélé suffisant pour traduire l'essentiel de cette inertie. Sur les graphiques issus de l'analyse factorielle (fig.88-A, B), nous remarquons des regroupements, des oppositions et des tendances directionnelles.

L'axe F1 (45.01 % de la variance) présente le pôle de la minéralisation (fig.88-A), il regroupe les variables suivantes : CE, Cl⁻, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, HCO₃⁻, SO₄²⁻ et K⁺, avec une forte corrélation de la conductivité avec les chlorures, sodium et magnésium. Cette dernière s'explique par la dominance de deux faciès, l'un chloruré-sodique et l'autre chloruré-magnésien.

La projection des individus sur le plan factoriel F1F2 montre que l'axe F1 oppose les eaux fortement minéralisées (G1) des puits P1 (El Kantra) et P9 (Cheurfa) aux eaux faiblement chargées (G2) ; ces eaux regroupent surtout les puits P5, P24, P26, P34, P38, etc... (fig.88-B). Pour l'axe F2 (16.47 % de la variance), il est représenté par deux évolutions, l'une dans sa partie positive avec la température et les bicarbonates, et l'autre dans sa partie négative figurée par les eaux basiques riches sulfates (fig.88-A), elles s'observent surtout au niveau des puits P11 au Sud-Est (Cheurfa), P43 et P46 au Nord-Est (Oued Zied) (fig.88-B).



B- Projection des individus sur le plan F1F2 Figure 88 : ACP des eaux souterraines (février 2009)

5.1.2. 2^{ème} Campagne (novembre 2009)

L'analyse des variances montre que les deux premiers axes factoriels permettant de représenter le maximum d'informations. Ils expriment 62.8 % de la variance totale, avec 44.65 % pour le premier facteur et 18.15 % pour le second (tab.42 et fig.89).

Axes	F1	F2	F3	F4
Valeurs propres	4.91	1.99	1.29	1.02
Variance %	44.65	18.15	11.73	9.28
% Cumulé	44.65	62.80	74.53	83.82

Tableau 42 : Variance des quatre premiers axes factoriels.



Figure 89 : Variance des quatre premiers axes factoriels.

L'examen du tableau 43 relatif à la matrice des corrélations permet de voir de fortes corrélations, d'une part entre la conductivité électrique avec le sodium, potassium, calcium et chlorures et d'autre part entre ces mêmes éléments (Cl⁻ - Na⁺), (Cl⁻ - Ca²⁺), (Cl⁻ - Mg²⁺), (Na⁺ - K⁺), (Na⁺ - Ca²⁺) et (Na⁺ - Mg²⁺).

	CE	pН	Eh	Т	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO ₃	SO ₄
CE	1.00										
pН	0.24	1.00									
Eh	-0.10	0.39	1.00								
Т	-0.14	-0.10	0.42	1.00							
Na	0.82	0.39	-0.14	0.00	1.00						
K	0.85	0.36	-0.05	-0.33	0.76	1.00					
Ca	0.36	0.59	0.00	0.06	0.70	0.36	1.00				
Mg	0.68	0.45	0.19	0.06	0.65	0.52	0.37	1.00			
Cl	0.65	0.57	-0.08	0.07	0.89	0.59	0.75	0.75	1.00		
HCO ₃	-0.09	0.15	0.27	0.27	0.09	-0.29	0.35	0.25	0.10	1.00	
SO ₄	0.24	0.43	-0.14	-0.16	0.57	0.39	0.63	0.16	0.47	0.07	1.00

 Tableau 43 : Matrice des corrélations (novembre 2009)
 Participation

Projection sur le plan factoriel F1F2 : la projection des variables sur le plan factoriel F1F2 montre que l'axe F1 exprime 44.65 % de la variance, il comporte dans sa partie positive les éléments de la minéralisation tels que Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, et SO₄²⁻ et qui sont bien corrélés à la conductivité électrique (fig.90-A). Il oppose donc les eaux faiblement minéralisées du premier groupe (G1) aux eaux minéralisées à fortement minéralisées du deuxième groupe (G2), représentées généralement par les puits P1, P3, P9, P11, P43 et P46, qui se localisent surtout dans la partie Nord-Est et Sud-Est du lac Fetzara (fig.90-B). Cette minéralisation est due à la présence de sels d'origines diverses qui sont lessivés par les eaux souterraines ou par contact direct entre l'aquifère et le lac Fetzara, constituant autant de

facteurs pouvant favoriser la salinisation des eaux souterraines par infiltration des eaux du lac qui sont déjà chargées en éléments chimiques (Zahi et al., 2013).

L'axe F2 exprime 18.15 % de la variance, il regroupe dans sa partie négative la température et le potentiel redox avec les bicarbonates. La projection des individus (fig.90-B) montre que cet ensemble (T°C, Eh et HCO₃⁻) est bien représenté par le troisième groupe (G3) qui contient les puits P11, P20, P24 localisés dans la partie Sud (axe Cheurfa-El Eulma).



Figure 90 : ACP des eaux souterraines (novembre 2009)

5.2. Eaux de surface

L'analyse en composantes principales a été orientée essentiellement sur les paramètres physico-chimiques et les éléments majeurs avec onze (11) variables et 51 observations concernant tous les affluents qui alimentent le lac Fetzara, qui se distribuent sur deux campagnes d'échantillonnages :

- 1^{ère} campagne (février 2009) avec 29 échantillons.
- 2^{ème} campagne (novembre 2009) avec 22 échantillons.

5.2.1. 1^{ère} Campagne (février 2009)

Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs propres et la variance expliquée par les premiers axes factoriels. Il montre que les deux premiers facteurs fournissent une variance expliquée de 67.45 % qui semble assez bonne compte-tenu de l'inertie moyenne (tab.44).

Tableau 44:	Variance	des	quatre	premiers	axes	factoriels.
			1	r	····· J	

Axes	F1	F2	F3	F4
Valeurs propres	5.63	1.80	1.32	0.92
Variance	51.13	16.32	12.04	8.39
% cumulé	51.13	67.45	79.49	87.88



Figure 91 : Variance des quatre premiers axes factoriels.

La matrice de corrélation (tab.45) présente les différentes corrélations entre les variables prises deux à deux, la signification du coefficient (r) est fonction du nombre des individus traités (n), pour le cas présent, le nombre d'échantillons étant de vingt neuf (n = 29), ce qui nous permet d'utiliser un coefficient de corrélation (r = 0.64). La matrice des corrélations permet de voir que pratiquement la conductivité électrique et tous les éléments majeurs sont corrélés entre eux.

	CE	pН	Eh	Т	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO3	SO4
CE	1.00										
рН	0.14	1.00									
Eh	-0.41	-0.33	1.00								
Т	0.09	-0.52	-0.30	1.00							
Na	0.97	0.20	-0.44	0.05	1.00						
K	0.50	-0.10	-0.45	0.21	0.55	1.00					
Ca	0.75	-0.13	-0.23	0.12	0.71	0.51	1.00				
Mg	0.87	-0.05	-0.31	0.11	0.83	0.59	0.73	1.00			
Cl	0.93	0.22	-0.31	-0.07	0.94	0.48	0.70	0.86	1.00		
HCO3	0.64	-0.29	-0.12	0.20	0.54	0.33	0.73	0.66	0.42	1.00	
SO4	0.39	-0.15	-0.26	0.20	0.45	0.66	0.35	0.55	0.39	0.13	1.00

Tableau	45:	Matrice	des	corrélations	(février	2009).
---------	-----	---------	-----	--------------	----------	--------

• *Projection sur le plan factoriel F1F2* : la projection des variables sur le plan factoriel F1F2 nous donne une variance de 67.45 %. L'axe F1 (51.13 % de la variance) présente le pôle de la salinité avec une relation proportionnelle entre les éléments Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , K^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} et la conductivité électrique, elle est très importante entre les chlorures, le sodium et la conductivité, où le faciès chloruré-sodique prédomine avec 55.17 %. Cette salinité est corrélée négativement avec le potentiel d'oxydo-réduction qui occupe la partie négative (fig.92-A).

La projection des individus par rapport à cet axe montre une opposition entre deux groupes (fig.92-B); le premier (G1) contient les eaux fortement minéralisées à caractère réducteur où le potentiel d'oxydo-réduction n'atteint pas les 200 mV, ce groupe correspond aux eaux du canal principal (C2, C3 et C4), les cours d'eau de la région de Cheurfa (C9, C10, C11 et C12) et celles de Oued Zied (B7, B8 et B10). Par contre, le deuxième (G2) contient les eaux faiblement minéralisées à caractère oxydant où les valeurs du potentiel d'oxydo-réduction sont très importantes, il contient les oueds principaux et le reste des cours d'eau.

L'axe F2 (16.32 % de la variance) montre l'évolution du pH, par une opposition entre deux groupes (fig.92-A) ; le premier (G3) présente les eaux basiques, caractérisant les cours d'eau de la région Sud (Cheurfa et El Eulma) (fig.92-B). Alors que, le deuxième (G4) regroupe les eaux acides riches en bicarbonates, caractérisant les eaux issues de djebel Edough dans la partie Nord (Berrahal et Oued Zied) par le lessivage des formations métamorphiques carbonatées (cipolins).



Figure 92: ACP des eaux de surface (Février 2009)

5.2.2. 2^{ème} Campagne (novembre 2009)

L'analyse en composantes principales des eaux de surface a été effectuée sur seulement vingt deux (22) échantillons, puisque la plupart des cours sont inexistants en période sèche. Le tableau 46 et la figure 93 permettent de constater que plus de la moitié de l'information (76.54 %) est contenue dans le premier plan factoriel F1F2.

		Axe	8		F1	F2]	F3	F4
	Va	leurs p	ropres		6.80	1.62	0	.76	0.60
		Varia	nce		61.85	14.69	6	.90	5.45
	(% Cun	nulé		61.85	76.54	83	3.44	88.90
		0	10	20	Varia 30	nce (%) 40	50	60	70
els	F1								
ctori	F2								
Axes Fa	F3		1						
	F'4								

 Tableau 46 : Variance des quatre premiers axes factoriels.

Figure 93 : Variance des quatre premiers axes factoriels.

La matrice des corrélations (tab.47) montre deux types des corrélations entre les éléments physico-chimiques, les unes directes (positives) et les autres inverses (négatives). Le nombre étant de 22, le coefficient de corrélation accepté est de 0.70 selon *Mangin (Annexes.4)*, ce qui permet de dégager les corrélations suivantes:

• Très forte corrélation entre la conductivité électrique et les éléments majeurs, avec une bonne corrélation entre ces derniers éléments, sauf avec les bicarbonates, elle est moins significative.

• Une corrélation négative du potentiel d'oxydo-réduction avec les éléments responsables de la minéralisation des eaux (sodium, calcium, magnésium et chlorures).

	CE	рН	Eh	Т	Na	K	Ca	Mg	Cl	HCO ₃	SO ₄
CE	1.00										
pН	-0.52	1.00									
Eh	-0.67	0.36	1.00								
Т	-0.23	0.15	0.19	1.00							
Na	0.91	-0.50	-0.78	-0.36	1.00						
K	0.67	-0.32	-0.48	-0.32	0.76	1.00					
Ca	0.82	-0.47	-0.72	-0.08	0.81	0.55	1.00				
Mg	0.91	-0.43	-0.68	-0.14	0.91	0.72	0.84	1.00			
Cl	0.94	-0.48	-0.75	-0.32	0.98	0.77	0.81	0.93	1.00		
HCO ₃	-0.01	-0.07	-0.05	0.43	-0.17	-0.27	0.29	0.08	-0.18	1.00	
SO ₄	0.72	-0.50	-0.58	-0.26	0.86	0.66	0.73	0.78	0.81	-0.09	1.00

 Tableau 47 : Matrice des corrélations (novembre 2009)
 Image: Construit des corrélations (construit des corrélations)

Projection sur le plan factoriel F1F2 : la représentation des variables et des individus sur le plan factoriel F1F2 (76.54 % de la variance), montre que selon l'axe F1 (61.85 %),

il existe une opposition entre deux groupes (fig.94-A); le premier groupe (G1) contient les eaux fortement minéralisées avec un pH acide (pH < 7) et un caractère réducteur (Eh < 150 mV), ces eaux observées à l'exutoire du lac Fetzara et bien représentées par les eaux du canal principal (C1, C2, C3, C4) et oued Meboudja (fig.94-B). Par contre, le deuxième groupe (G2) englobe les eaux faiblement minéralisées à pH neutre qui caractérisent le reste des cours d'eau de la région d'étude.





Le deuxième axe F2, présente 14.69 % de la variance, la température et les bicarbonates occupent sa partie négative (fig.94-A), cet axe est représenté par les individus du groupe (G3); l'affluent C10 au Sud-Est (Cheurfa), les cours d'eau B4, B7, B8 et les rejets de la décharge publique (R Dech) dans la partie Nord (Berrahal et Oued Zied) (fig.94-B).

6. Rapports caractéristiques

Afin de comprendre le processus de minéralisation des eaux souterraines et de surface de la région du lac, apprécier les relations entre les différents éléments chimiques et déterminer leurs origines, nous avons utilisé les résultats des deux campagnes (février et novembre 2009) à la fois, en se basant sur les meilleures corrélations qui existent entre les différents paramètres, ainsi que sur les faciès chimiques prédominants.

6.1. Relations entre chlorures et éléments majeurs

Nous avons essayé de représenter l'évolution des éléments majeurs en fonction des chlorures (fig.95, fig.96), ce dernier est un élément très soluble, considéré comme un traceur stable et conservatif des évaporites, il n'entre pas dans les réactions de précipitation et de dissolution (*Benlahcen, 1996 ; Fehdi et al., 2009*), il n'intervient pas également dans les phénomènes d'oxydo-réduction ou d'adsorption et peu influençable par l'intervention des bactéries (*Debièche, 2002 ; Jalali, 2007 ; Seghir et Kherici, 2008*). Il est souvent utilisé dans le déchiffrement des processus hydrochimiques, permettant de définir la quantité de perte (ou de gain) des autres constituants, et aussi comme un facteur normalisant pour interpréter les sources possibles des constituants salins (*Frape et Fritz, 1987*).

- **Couple** Na⁺ - CI⁻: Ces deux ions sont dominants dans les eaux de la région du lac Fetzara, ils sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl). La représentation graphique de l'évolution des teneurs en sodium en fonction des concentrations en chlorures (fig.95-A, fig.96-A), montre une répartition fortement linéaire des données avec des coefficients de corrélation très élevés d'ordre de 0.82 et 0.96 pour respectivement les eaux souterraines et les eaux de surface, indiquant l'origine chlorurée-sodique commune (halite) de ces deux éléments chimiques *(Djabri et al., 2008)*. L'excès des teneurs en sodium par rapport à la pente égale à 1 dans quelques points d'eau (fig.94-A), s'explique par l'existence d'une autre origine pour les ions sodiques qui a fait accroître la concentration du sodium par rapport à celle des chlorures.

- **Couple Ca²⁺- CI**^{\cdot}: La représentation graphique de l'évolution des teneurs en calcium en fonction des concentrations en chlorures (fig.95-B, fig.96-B) montre une légère augmentation de la concentration en calcium avec celle des chlorures. Cette dernière se traduit par une corrélation moyenne entre les deux éléments d'ordre de 0.63 pour les eaux de surface,

influencée la dissolution des formations gypsifères (CaSO₄-2H₂O et CaSO₄) et par les apports salifères du lac Fetzara *(Debièche, 2002),* car les fortes concentrations en calcium sont enregistrées à l'exutoire (entre 5.40 et 7.10 meq/l). Par contre, nous enregistrons une faible corrélation ($R^2 = 0.39$) pour les eaux souterraines (fig.94-B), ce déficit en calcium par rapport au chlorures est expliqué d'une part, par le phénomène d'échanges de bases avec les formations argileuses et d'autre part la dissolution de formations carbonatées, ce processus est bien confirmé par des corrélations très faibles à presque nulles entre les chlorures et les bicarbonates (fig.95-F, fig.96-F).



Figure 94: Relations Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, SO₄⁻²⁻, HCO₃⁻ avec Cl des eaux souterraines.



Figure 96: Relations Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, SO₄⁻², HCO₃⁻ avec Cl⁺ des eaux de surface.

- Couple Mg^{2+} CI⁻: La représentation des concentrations en magnésium en fonction des chlorures montre une bonne corrélation ($R^2 = 0.82$) entre les deux éléments dans les eaux de surface (fig.96-D), exprimée par une répartition linéaire des données sur le graphique. Cette évolution réciproque des chlorures et du magnésium est observée surtout au niveau des eaux à forte minéralisation issues du lac Fetzara (à l'exutoire), due aux apports salifères du lac Fetzara sous l'effet de l'évaporation (*Zenati, 1999 ; Debièche, 2002*). Par contre, nous observons une corrélation moyenne ($R^2= 0.56$) entre les deux éléments dans les eaux souterraines (fig.95-D). Le déficit de cet élément dans quelques puits s'explique par la fixation des ions magnésium par le processus d'échange de base, alors que leur excès dans d'autres puits est expliqué par le phénomène de la dédolomitisation qui serait provoquée par la dissolution irréversible des sulfates accompagnée de la dissolution de la dolomite et la précipitation de la calcite *(Bouchaib, 2007 ; Djamai et al., 2011)*, selon le mécanisme suivant:

$$CaMg (CO_3)^2 + Ca^{2+} \leftrightarrow 2CaCO_3 + Mg^{2+}$$

- Couple SO_4^{2-} CI⁻: La relation entre SO_4^{2-} et Cl⁻ montre l'existence d'une corrélation importante (R²= 0.59) entre les deux éléments dans la quasi-totalité des échantillons pour les eaux de surface (fig.96-E). Un enrichissement de quelques points en sulfates par rapport aux chlorures, observé surtout au Nord-Est du lac (Oued Zied et B8) et à son exutoire (canal principal), il est dû aux apports gypseux issus du lac Fetzara *(Debièche, 2002)*. En ce qui concerne les eaux souterraines (fig.95-E), nous remarquons une faible corrélation entre les deux éléments (R² = 0.15), ceci indique que ces deux ions sont issus de deux formations différentes, le SO_4^{2-} qui provient du gypse et le Cl⁻ de la dissolution des évaporites chlorurées notamment l'halite (NaCl).

6.2. Origine du calcium

Après avoir fait le point sur les origines des différents éléments chimiques en fonction des chlorures, nous avons essayé de déterminer l'origine du calcium en fonction des bicarbonates et des sulfates, car ce cation tire son origine des carbonates et du gypse.

La représentation graphique de l'évolution du calcium en fonction des bicarbonates (fig.97-A, fig.97-C), montre un ensemble de points avec une évolution linéaire, réciproque et exponentielle des deux éléments, indiquant l'origine carbonatée des ions du calcium. Un deuxième ensemble des points observé au dessus de la droite (pente 1), présente un excès des teneurs en Ca^{2+} , relatif à des concentrations en bicarbonates inférieures à 5 meq/l, il est interprété comme le résultat de la mise en solution du gypse.

Les figures représentant l'évolution des teneurs en Ca^{2+} en fonction de $HCO^{3-} + SO_4^{2-}$ (fig.97-B, fig.97-D), font apparaître trois évolutions :

- Un excès en calcium par rapport aux bicarbonates et les sulfates, indiquant l'origine évaporitique du calcium par la dissolution des formations gypsifères.
- Une évolution linéaire entre le calcium et les ions bicarbonates et sulfates, interprétée comme le résultat de la dissolution des formations carbonatées.
- Un excès des deux anions (HCO³⁻ et SO₄²⁻) par rapport au calcium dans quelques points d'eau, reflète deux autres faciès chimiques, l'un bicarbonaté-sodique et l'autre bicarbonaté-magnésien.



Figure 97: Origine du calcium dans les eaux souterraines et de surface de la région du lac Fetzara.

- **Couple Ca²⁺- Mg²⁺:** la représentation de l'évolution du calcium en fonction du magnésium montre deux évolutions, d'une part un excès en ions du calcium uniquement au niveau du puits P11 (Cheurfa) pour les eaux souterraines durant les deux campagnes (février et novembre 2009) (fig.98-A), et d'autre part, un excès en ions du magnésium, où le rapport Ca²⁺/Mg²⁺ < 1, cet excès caractérise particulièrement les eaux du canal principal, oued Meboudja et autres affluents notamment C9, B4 et B8 pour les eaux de surface (fig.98-B), et les puits P1, P3, P9, P31 et P20 pour les eaux souterraines (fig.98-A). Cet excès en ions magnésium est expliqué par le phénomène de la dédolomitisation qui serait provoquée par la dissolution irréversible des sulfates accompagnée de la dissolution de la dolomite et la précipitation de la calcite.



Figure 98: Relation entre calcium et magnésium dans les eaux souterraines et de surface.

6.3. Echanges de bases

Les études d'échange ionique dans les formations géologiques ont révélé, qu'en général, au cours du processus d'échange, un des ions est retenu très fortement contre tout déplacement par les autres ions. C'est une adsorption préférentielle connue comme une sélectivité

d'échange ionique *(Ghebouli et al., 2008).* Pour bien expliquer ce phénomène, nous avons essayé d'interpréter le diagramme $Ca^{2+} / (HCO_3^- + SO_4^{2-}) - Na^+ / Cl^-$ avec un report de tous les points d'eaux (surface et souterraines). Ce diagramme fait apparaître trois regroupements :

• Le premier groupe se caractérise par un excès en Ca^{2+} par rapport aux ions HCO_3^- et SO_4^{2-} au niveau de quelques points (P11 et P31) pour les eaux souterraines (fig.99-A) et en C9, C15, B1 et oued Meboudja pour les eaux de surface (fig.99-B) ; ceci est dû certainement aux formations gypseuses qui fournissent plus d'ions Ca^{2+} que ne peut consommer l'effet de la précipitation chimique ou l'effet de la fixation du calcium par les argiles *(Debièche, 2002)*.



Figure 99: Echanges de bases dans les eaux souterraines et de surface de la région du lac Fetzara.

• Le deuxième groupe, se caractérise par un excès des teneurs en sodium par rapport aux chlorures, nous pouvons expliquer ce résultat par l'existence d'une autre origine pour les ions sodiques qui a fait accroître la concentration de ces derniers. Cet excès en sodium s'accompagne par un déficit en Ca^{2+} par rapport aux HCO_3^- et SO_4^{2-} (fig.99), en effet dans un échange de bases lié aux minéraux argileux, il y a fixation d'un Ca^{2+} après libération de deux Na^+ . Ce phénomène observé particulièrement dans les eaux souterraines, est relatif au temps de contact des eaux avec les formations géologiques de l'aquifère.

• Le troisième groupe, englobe les points d'eaux présentant un état naturel (fig.99). Ils sont caractérisés par un déficit en Ca^{2+} par rapport aux HCO_3^- et SO_4^{2-} et un excès en Cl^- par rapport au Na⁺; ce groupe explique la présence de deux faciès chimiques, l'un chloruré-calcique et magnésien avec respectivement 18.18 % et 21.57 % et l'autre bicarbonaté-magnésien avec 4.55 % (eaux souterraines) et 13.73 % (eaux de surface).

6.4. Relation conductivité électrique-cations (Na⁺, Ca²⁺ et Mg²⁺)

Les deux graphiques représentant l'évolution de la conductivité électrique en fonction des trois cations majeurs (Na⁺, Ca²⁺ et Mg²⁺), montre que la conductivité électrique augmente proportionnellement avec le sodium ; le magnésium vient en deuxième position avec une corrélation moyenne, par contre la conductivité électrique n'évolue pas avec le calcium (fig.100). La forte minéralisation des eaux souterraines et de surface de la région d'étude est fortement influencée par la richesse des eaux en éléments Na⁺, Cl⁻, Mg²⁺ et SO₄²⁻; elle est liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées en sels notamment les eaux du lac et par dissolution des formations évaporitiques.



Figure 100: Evolution des cations en fonction de la conductivité électrique.

6.5. Relation conductivité électrique - anions (HCO₃⁻, Cl⁻ et SO₄²⁻)

Pour mieux comprendre l'influence des concentrations des anions sur la minéralisation des eaux, nous avons essayé de représenter leur évolution en fonction de la conductivité électrique.

La représentation graphique (fig.101-A) montre que la conductivité électrique n'évolue pas avec les bicarbonates et sulfates, par contre il existe une corrélation positive entre la conductivité et les chlorures. Ceci est dû soit à la dissolution des formations évaporitiques riches en halite (NaCl) et sylvinite (KCl) au cours du transit des eaux dans la formation aquifère, ou à l'infiltration des eaux du lac (fortement minéralisées) particulièrement durant la période des basses eaux.

En ce qui concerne les eaux de surface, la figure 101-C montre une bonne corrélation entre la conductivité électrique et les chlorures, elle est moins significative avec les sulfates, et presque nulle avec les bicarbonates. Ce qui indique que les bicarbonates n'ont pas un rôle dans la minéralisation et que la salinité des eaux de surface du lac Fetzara possède deux origines possibles qui sont la dissolution des formations gypsifères et les apports salifères du lac Fetzara notamment pour les eaux du canal principal et oued Meboudja.

6.6. Relation (HCO₃⁻/Cl⁻ + SO₄²⁻) - Conductivité électrique

D'une manière générale, la représentation graphique du rapport $HCO_3^{-}/(Cl^{-} + SO_4^{2^{-}})$ conductivité électrique montre que l'évolution de la conductivité électrique est inversement proportionnelle avec le rapport (fig.101-B, fig.101-D).

Le rapport est inférieur à l'unité (< 1) dans les eaux souterraines (fig.101-B), ce qui traduit une dominance des chlorures et sulfates par rapport aux bicarbonates.

Concernant les eaux de surface, le graphique ($HCO_3^-/Cl^- + SO_4^{2-}$) - conductivité électrique révèle la présence de deux pôles (fig.101-D) :

• Le premier est carbonaté avec un rapport supérieur à l'unité (> 1), est représente 17.65 % des affluents, il se caractérise par une dominance des ions HCO_3^- pour des conductivités inférieures à 1500 µS/cm ; ces eaux caractérisent essentiellement oued Mellah et les affluents issus de la partie Nord (B2, B3, B4, B5, B9 et Dech), ayant un faciès bicarbonaté-calcique.

• Le deuxième pôle se caractérise par un rapport inférieur à l'unité (< 1), il indique la dominance des chlorures et sulfates, et représente la majorité des cours d'eau (82.35 %). Ce pôle est accompagné d'une conductivité plus importante qui atteint 8000 μ S/cm. Cette minéralisation est liée à la dissolution des formations gypsifères et les dépôts évaporitiques.



Figure 101 : Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique.

7. Qualité des eaux

La qualité naturelle des eaux peut être altérée d'une part par l'activité humaine et d'autre part par les conditions naturelles (climatiques et géologiques). La détérioration de la qualité de l'eau est appréciée par la mesure des paramètres physico-chimiques et bactériologiques. Dans le cas d'une détérioration jugée importante, l'eau ne sera plus considérée comme potable pour la consommation humaine, elle pourra être utilisée à d'autres fins (irrigation, industrie, etc...) ou devra subir un traitement appropriée pour retrouver sa potabilité.

7.1. Dureté ou Titre Hydrotimétrique (TH)

La qualité d'une eau est caractérisée par sa dureté ou le titre hydrotimétrique (TH), qui est directement liée à la nature des terrains traversés. Elle est mesurée par rapport aux teneurs en carbonate de calcium et de magnésium. Ils proviennent des roches calcaires ou dolomitiques et la présence du CO₂ favorise cette dissolution. Le titre hydrotimétrique est donné par la formule suivante : TH = (r Ca²⁺ + r Mg²⁺) *5 en degré français (°F).

Les résultats sont récapitulés dans le tableau ci-après :

			TH en °F		0 - 7	7 - 22	22 - 32	32 - 54	> 54	
Classes des eaux					Douce	Modérément douce	Assez douce	Dure	Très dure	
ge	\$		Eaux	Février 2009	0	0	13.64	59.09	27.27	
entag	point	(%	souterraines	souterraines	Novembre 2009	0	0	9.09	54.55	36.36
ourc	les J	ಲ	Eaux surface	Février 2009	0	20.69	41.38	34.48	3.45	
Ā	J		Buux Juliace	Novembre 2009	0	0	22.73	40.91	36.36	
	Moyenne en %					5.17	21.71	47.26	25.86	

Tableau 48 : Classification des eaux de la région du Fetzara selon la dureté (TH en °F)

D'une manière générale, les eaux de la région du Fetzara sont considérées comme dures à très dures. Les valeurs de la dureté dépassent les 32°F dans la majorité des points d'eaux (95 échantillons d'eau de surface et souterraines), soit un pourcentage qui dépasse 73.12 %.

Nous remarquons une dégradation de la qualité durant la deuxième campagne (novembre 2009), marquée par l'augmentation des pourcentages de classes « dure » et « très dure » (fig.102-B, D). Par contre, nous constatons l'absence de la classe « modérément douce » pour les eaux de surface (fig.102-D) et une réduction des pourcentages de la qualité « assez douce » avec 4.55 % pour les eaux souterraines (fig.102-B) et de 18.65 % pour les eaux de surface (fig.102-D). La forte dureté des eaux de la région du lac Fetzara est due à la forte évapotranspiration qui caractérise la région en période estivale et au lessivage des formations géologiques suite aux apports météoriques, ce qui entraîne un enrichissement des nappes en sels solubles particulièrement en Ca²⁺ et Mg²⁺ (*Zahi et al., 2013*).



Figure 102: Classification des eaux de la région du Fetzara selon la dureté.

7.2. Aptitude des eaux à l'irrigation

Les eaux de surface et souterraines contiennent toutes avec différentes proportions des éléments chimiques dissous (ions, abusivement appelés sels), qui proviennent surtout de l'altération du milieu (couverture pédologique ou substratum rocheux) à travers ou sur lequel elles circulent. Pour connaître la qualité de ces eaux et d'examiner leur utilisation à des fins agricoles, il est important de diagnostiquer les origines et les sources des éléments chimiques dissous. Il y a deux critères majeurs à considérer lors de l'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation, la concentration en sels dissous (risque de salinité) et la quantité du sodium dans l'eau comparée à d'autres cations (risque de sodicité).

7.2.1. Risque de sodicité et de salinité

La salinité peut entraîner des effets nocifs conséquents en raison de la fixation du sodium par les colloïdes du sol. Le sodium exerce alors une action néfaste sur la végétation, de façon indirecte, en dégradant les propriétés physiques du sol, il devient compact et asphyxiant pour les plantes *(Todd, 1980)*. Lorsque la concentration en Na⁺ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent fréquemment les cations Ca²⁺ dans le complexe absorbant, une eau chargée en sels peut provoquer cet effet *(Derradji et al., 2004 ; Rouabhia et al., 2010)*.

Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable « Sodium Absorption Ratio : SAR ». Pour une même conductivité électrique, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé.

En saison sèche, les eaux superficielles disponibles déjà peu abondantes, se concentrent souvent rapidement en sels par suite de phénomènes évaporatoires importants ; c'est le cas des eaux du lac Fetzara qui durant de longues saisons sèches subissent une évaporation intense, l'utilisation de leurs eaux en irrigation nécessite alors une attention particulière afin d'éviter les problèmes habituels dus à l'emploi d'eaux salées *(Zenati, 1999)*.

Pour estimer l'influence des eaux de la région du lac Fetzara sur le sol et sur certaines cultures pratiquées dans la région, nous allons essayer d'évaluer leur aptitude à l'irrigation. Pour cela, nous utilisons la méthode du SAR *(Diagramme de Richards),* le report des résultats sur ce diagramme nous permet de classer les différents types d'eaux d'irrigation et d'indiquer les diverses utilisations selon la tolérance des cultures.

7.2.2. Diagramme de Richards

Ce diagramme est essentiellement utilisé pour évaluer le risque de salinisation des sols. Il utilise pour cela la conductivité électrique (CE) ou la charge totale dissoute, toutes deux relatives à la salinité de l'eau et l'indice d'adsorption du sodium (SAR) aussi appelé « pouvoir alcalisant », qui est une mesure du risque de la sodisation du sol du fait de l'irrigation. Le diagramme est découpé en quatre classes de salinité (axe des abscisses) et quatre classes de risques de sodisation (axe des ordonnées). Le SAR est donné par la formule ci-dessous, il est utilisé en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau.

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$
 où tous les éléments sont exprimés en méq/l.

Le tableau suivant récapitule les résultats obtenus après l'interprétation des diagrammes.

Types d'eaux	Qualité	Classes	Nbre d'échantillons	Pourcentage
S	Admissible	C3 S1	31	72 73 %
rine x		C3 S2	1	12.13 /0
au	Médiocre	C4 S1	2	25.04
E		C4 S2	9	23 70
80	Mauvaise	C4 S3	1	2.27 %
	Bonne	C2 S1	13	25.49%
x de face	Admissible	C3 S1	33	64. 71 %
Eau surt	Médiocre	C4 S2	4	7.84 %
	Mauvaise	C4 S3	1	1.96 %

 Tableau 49: Résultats d'après l'interprétation des diagrammes de Richards.

Le diagramme de Richards fait apparaître pour les eaux de surface et souterraines de la région du lac Fetzara quatre classes : *Bonne, Admissible, Médiocre et Mauvaise*. Chacune de ces classes présente ses propres caractéristiques :

- *Bonne (C2 S1):* Eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels et sur les sols ayant une bonne perméabilité. Cette catégorie est présente uniquement au niveau des eaux de surface avec huit (08) échantillons pour la première campagne (fig.104-A) et cinq (05) pour la deuxième (fig.104-B).
- Admissible (C3S1-C3S2): Eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit être cependant contrôlée. Cette classe représente la majorité des eaux avec 72.73 % des eaux souterraines et 64.71 % des eaux de surface (fig.103-A, fig.104-B).
- *Médiocre (C4S1-C4S2):* Eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés. Cette classe d'eau apparaît surtout durant la deuxième campagne (novembre 2009), elle représente 25 % des eaux souterraines (fig.103-B) et 7.84 % des eaux de surface (fig.104-B).
- *Mauvaise (C4S3)*: Cette eau ne convient généralement pas à l'irrigation, mais peut être utilisée sous certaines conditions : sols très perméables, bon lessivage, plantes très tolérantes aux sels (choux, betterave, etc...). Cette classe apparaît durant la deuxième campagne au niveau de deux (02) échantillons l'un pour les eaux de surface (C3) (fig.104-B) et l'autre pour les eaux souterraines (P9) (fig.103-B).

En fin, d'après la classification de Richards, nous remarquons une légère dégradation de la qualité des eaux durant la deuxième campagne (novembre 2009) dans quelques puits (P1, P3, P9, P11, P16, P24, P31 et P46) et aussi pour les eaux de l'exutoire du lac Fetzara, au niveau du canal principal (C1, C2, C3 et C4) et oued Meboudja (O Meb)



Conductivité en µS/cm B- Novembre 2009

Figure 103 : Diagramme de Richards des eaux souterraines de la région du lac Fetzara.



Conductivité en µS/cm B-Novembre 2009

Figure 104 : Diagramme de Richards des eaux de surface de la région du lac Fetzara.

8. Conclusion

L'interprétation des données analytiques par les différentes méthodes, a montré que les eaux (souterraines et superficielles) de la région du lac Fetzara, ont des conductivités électriques élevées. Elles ont une qualité «dure» à «très dure» et caractérisées par une dominance des chlorures pour les anions et le sodium pour les cations. L'ordre d'importance décroissant pour les anions est le suivant : $Cl^- > HCO_3^- > SO_4^{2-}$, et pour les cations il est : $Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$.

La richesse des eaux en éléments Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺ et SO_4^{2-} est liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées en sels et par dissolution des formations évaporitiques. Par contre, les éléments Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^{-} sont liés à la dissolution des cipolins de l'Edough et des formations carbonatées environnantes.

Les études statistiques par analyse en composantes principales (ACP) et par les rapports caractéristiques montrent une forte corrélation entre les chlorures, sodium et conductivité électrique, ce qui confirme que les chlorures et le sodium sont à l'origine de la minéralisation élevée des eaux. La forte minéralisation est enregistrée dans la région de Cheurfa et celle de Oued Zied pour les eaux souterraines et à l'exutoire du lac au niveau du canal principal et oued Meboudja pour les eaux de surface.

L'étude de l'aptitude des eaux de la région d'étude à l'irrigation, a révélé que les eaux de la majorité des puits et des affluents ont une qualité admissible avec 72.73 % et 64.71 % successivement pour les eaux souterraines et les eaux de surface. Ces eaux sont en général acceptables pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés, mais nécessitent un contrôle préalable de l'évolution de la salinité.

CONCLUSION

GENERALE

Conclusion Générale

Cette étude est une contribution à l'étude hydrogéochimique du bassin versant du lac Fetzara, elle a été menée afin d'étudier et expliquer à partir d'une approche géochimique certains processus responsables au phénomène de salinisation qui affecte les sols et les eaux de la région du lac Fetzara. Le lac est situé à l'extrême Nord-Est Algérien, à 18 km au Sud-Ouest de la ville d'Annaba. Il s'allonge sur 17 km d'Est en Ouest et sur 13 km du Nord au Sud dans sa plus grande largeur, avec une superficie d'environ 18600 ha.

L'étude géomorphologique de la région du lac Fetzara et ses alentours a montré l'origine et la contribution de chaque forme de relief sur le fonctionnement du lac. La cuvette présente des bordures Nord et Sud nettement dessymétriques, où se disposent une remarquable couverture végétale, le maquis sur les niveaux plus ou moins hauts et la forêt sur les niveaux de haute altitude. Au Sud, un véritable piémont avec plusieurs niveaux de glacis, s'est construit en avant du Tell Nord Guelmien. Au Nord, le massif de l'Edough tombe brutalement dans la cuvette du lac Fetzara et peu de formes Quaternaires assurent le passage de la montagne au fond de la dépression. Enfin, à l'Est, une lunette qui suit la route, isole la dépression lacustre de la plaine d'El Hadjar.

Du point de vue géologique, la région d'étude fait partie de l'ensemble géologique du tell algérien Nord oriental, elle comporte à la fois les affleurements de terrains métamorphiques et éruptifs au Nord et Nord-Est du lac Fetzara, et des terrains sédimentaires occupent le reste de la région. Les affleurements métamorphiques sont datés du Précambrien au Paléozoïques, ils sont présents au niveau du massif de l'Edough et ses environs constituants la limite Nord du lac, ils sont constitués de Gneiss et des Métapélites (Unité de Schistes alumineux). Les formations sédimentaires, résultent de l'activité Oligo-Miocène, elles occupent le reste de la zone d'étude, elles sont constituées de ; marnes, argiles, grés crétacés (flysch crétacés), et les grés Oligo-Miocène (grés numidiens).

L'analyse des données climatiques des quatre stations météorologiques (Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal), nous a permis d'attribuer à la région d'étude un climat méditerranéen à deux saisons ; l'une froide et humide s'étend du fin de septembre jusqu'au mois de mai, et l'autre chaude et sèche occupe le reste des mois. La région d'étude reçoit des précipitations annuelles moyennes de l'ordre de : 673 mm (Les Salines), 614.5 mm (Pont Bouchet), 630.95 mm (Ain Berda), 687.77 mm (Berrahal) et une température moyenne annuelle de l'ordre de 17.77 °C enregistrée à la station Les Salines. La reconstitution du stock commence en novembre et s'achève en avril. L'épuisement du stock du sol s'observe en mai, ce qui provoque un déficit agricole nécessitant une irrigation surtout pour la période allant de juin jusqu'à octobre.

L'étude hydrologique nous a permis de donner un aperçu sur le mode d'alimentation du lac Fetzara et les débits des principaux oueds. Les eaux du lac Fetzara proviennent des montagnes environnantes, elles sont collectées à partir de trois principaux oueds, El Hout au Sud, Mellah à l'Ouest et Zied au Nord-Est ; les trois oueds sont canalisés et leurs eaux sont évacuées par l'oued Medjouba. Les apports d'eau vers le lac sont tributaires au lame d'eau précipitée sur le bassin versant, alors que l'évolution du débit de oued Meboudja dépend essentiellement de l'ouverture du pont vanne situé à El Kantra, à l'exutoire du lac Fetzara.

D'un point de vue hydrogéologique, le lac Fetzara occupe la région Ouest de la plaine d'Annaba, il est entouré par une nappe superficielle discontinue. Cette nappe est constituée essentiellement par des alluvions récentes (sables, limons et argiles) avec une texture argilosableuse à argilo-limoneuse, son épaisseur varie entre 2 et 10 m, donc à potentialités hydrauliques très limitées. Elle se caractérise par une transmissivité variant entre 0.13 10^{-3} et 1.4 10^{-3} m²/s, avec des sols moyennement perméables à perméables, où le coefficient de perméabilité oscille entre 0.28 10^{-5} et 5 10^{-5} m/s.

L'examen des cartes piézométriques montre que la morphologie de la surface piézométrique suit celle de la topographie et son allure reste la même pendant toutes les campagnes. Le sens global de l'écoulement met en évidence deux types d'échanges entre les différents systèmes (lac, oueds, nappe), le premier montre une alimentation du lac par la nappe et les bordures ; quant au second, il montre le drainage du lac et de la nappe par l'oued Meboudja.

Les études pédologiques effectuées sur les sols du lac Fetzara, nous ont permis de ressortir quatre classes de sols, les sols peu évolués, les vertisols, les sols hydromorphes et les sols halomorphes. L'interprétation des données analytiques par les différentes méthodes, nous a amené au constat que les sols du lac Fetzara sont caractérisés par une porosité moyenne d'ordre de 12 %, un coefficient de perméabilité inférieur à 2 cm/h, un pH faiblement acide à alcalin (5.97 à 8.10) et une teneur en matière organique très variable (0.4 à 3.47 %).

Les analyses granulométriques montrent la dominance de la fraction limoneuse dans la plupart des échantillons, avec des valeurs moyennes de 69.34 % pour la première couche (0 - 25 cm) et 58.67 % pour la deuxième (25 - 50 cm). La majorité des sols sont classés

parmi les sols salins (ESP ≤ 15 %, CE > 4 mS/cm) avec une conductivité électrique très variable (6.52 à 24.3 mS/cm), le maximum enregistré au Nord-Est (Oued Zied) et au Sud-Est du lac (Cheurfa). Les solutions de sols sont caractérisées par l'abondance des ions (Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺ et Mg²⁺), avec la dominance d'un faciès chloruré sodique. L'étude statistique par l'analyse en composantes principales a montré que la salinité des sols du lac Fetzara semble être contrôlée essentiellement par deux processus, à savoir ; la forte évaporation des eaux qui caractérise la région d'étude et les phénomènes d'échange ioniques entre le complexe adsorbant et les solutions de sols.

L'étude hydrochimique a montré les eaux de surface et souterraines de la région du Fetzara ont des conductivités électriques élevées, dues à la présence de certains éléments chimiques en concentrations élevées. Elles ont une qualité dure à très dure et caractérisées par la dominance d'un faciès chloruré-sodique. La richesse des eaux en éléments Na⁺, Cl⁻, Ca²⁺ et SO_4^{2-} est liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées en sels et par dissolution des formations évaporitiques. Par contre, les éléments Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^{--} sont liés à la dissolution des cipolins de l'Edough et des formations carbonatées environnantes.

Les études statistiques montrent une forte corrélation entre les chlorures, sodium et conductivité électrique, ce qui confirme que les chlorures et le sodium sont à l'origine de la minéralisation élevée des eaux. La forte minéralisation est enregistrée dans la région de Cheurfa et celle de Oued Zied pour les eaux souterraines et à l'exutoire du lac au niveau du canal principal et oued Meboudja pour les eaux de surface.

L'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation, a révélé que les eaux de la majorité des puits et des affluents ont une qualité admissible avec 72.73 % et 64.71 % successivement pour les eaux souterraines et les eaux de surface. Ces eaux sont en général acceptables pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés, mais nécessitent un contrôle préalable de l'évolution de la salinité.

Recommandations

Afin de protéger le lac et de minimiser la dégradation de sols et des eaux de surface et souterraines de la région d'étude, nous proposons les recommandations suivantes;

- Le contrôle de la qualité des eaux d'irrigation et l'amélioration du réseau de drainage aux alentours du lac pour protéger les sols d'une forte salinisation.
- Eviter le pompage intensif au niveau des ouvrages situés aux alentours du lac, car cela produirait un abaissement du niveau piézométrique dans l'ouvrage et un écoulement des eaux du lac vers la nappe, ce qui amènerait une modification de la qualité de la nappe.
- Entretient du Pont vanne à l'exutoire du lac pour contrôler le volume d'eau dans le lac.
- Le contrôle qualitatif et quantitatif des apports d'eau vers le lac.
- Approfondir les études hydro géophysiques afin d'expliquer le phénomène de la salinisation ponctuelle des eaux souterraines (Ex. puits1 et 9).

Enfin, nous espérons que cette contribution à l'état géochimique des sols et des eaux de la région du lac Fetzara, qui sont affectés par le phénomène de salinisation, a apporté un certain nombre d'informations et de précision, qui pourront orienter de futurs travaux dans le domaine de l'hydrogéochimie dans le contexte de la protection des ressources naturelles (eau et sol).

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- Ahmed-Said Y & Leake B.E., 1992. The composition and origin of Kef Lakhal amphibolites and associated amphibolite and olivinerich enclaves, Edough, NE Algeria. *Mineralogical Magazine 56, pp 459–468.*
- Ahmed-Said Y & Leake B.E., 1993. The Cap de Garde pelites and gneisses, Edough, Annaba, NE Algeria: their petrology, geochemistry and origin. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie 4, pp 3–24.*
- Aissa D.E., Cheilletz A., Gasquet D & Marignac C., 1995. Alpine metamorphic core complexes and metallogenesis: The Edough case (NE Algeria). In: Pasava, J., Kribek, B., Zak, K. (Eds.), Mineral deposits: from their origin to their environmental impacts. *Balkema, Rotterdam, pp 23–26.*
- AJCI., 1985. Etude de la faisabilité du projet d'aménagement agricole de la région périphérique du lac Fetzara. *Agence Japonaise de Coopération Internationale (AJCI), Vol. 3, 56 p.*
- Athamena M., 2006. Etude des ressources thermales de l'ensemble allochtone Sud Setifien. Mémoire de Magister, option: Mobilisation des ressources hydriques. Université de Batna, 131 p.
- Aubert G., 1983. Observations sur les caractéristiques, la dénomination et la classification des sols salés ou salsodique. *Cahier ORSTOM, série Pédologique, Vol. XX, N°1, pp 73-78.*
- Auzende J.M., Bonnin J & Olivet J.L., 1975. La marge nord africaine considérée comme marge active. *Bulletin de la Société Géologique de France 7, pp 486–495.*
- Badraoui M., Soudi S & Farhat A., 1998. Variation de la qualité des sols : une base pour évaluer la durabilité de la mise en valeur agricole sous irrigation par pivot au Maroc. *Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc, pp 227-233.*
- Bagnouls F & Gaussen H., 1953. Saison sèche et indice xérothermique. Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse, 88, pp 193-240.
- Bagnouls F & Gaussen H., 1957. Les climats biologiques et leur classification. Annales de Géographie, 66^e année, N°335, pp193-220.
- **Baize D., 1988.** Guide des analyses courantes en pédologie : choix, expression, présentation et interprétation. *INRA, Paris, 172 p.*
- Belhamra A., 2001. Contrôle de la salinité des eaux du lac Fetzara jusqu'à la mer. Mémoire de Magister, option : Biologie et physiologie des organismes Marins. Université de Annaba, 110 p.
- Benlahcen A.M., 1996. Modélisation de saumures carbonatées par le traitement multivariable en hydrogéochimie à la mine Niobec de Saint-Honoré (Québec). *Mémoire de maîtrise en sciences de la terre, Université du Québec, Chicoutimi, 148p.*
- **BNEDER., 2004**. Etude agro-pédologique du lac Fetzara. *Bureau National d'Etude pour le Développement Rural (BNEDER)*.
- **Bolfa J., 1948.** Contribution à l'étude des gîtes métallifères de la Kabylie de Collo et de la région de Bône. *Bulletin du Service de la Carte Géologique de l'Algérie 6, 216p.*
- Bouchaib A., 2007. Etude géochimique et isotopique des principaux aquifères du bassin Crétacé d'Errachidia et de la plaine de Tafilalet. *Thèse de Doctorat d'état. Université Mohammed V. Rabat, Maroc, 134 p.*
- Bouillin J.P., 1979. La transversale de Collo et d'El-Milia (Petite Kabylie): une régionclef pour l'interprétation de la tectonique alpine de la chaîne littorale d'Algérie. *Mémoire de la Société Géologique de France 57, 135, 84p.*
- Bouillin J.P., 1986. Le''bassin maghrébin'': une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'ouest des Alpes. *Bulletin de la Société Géologique de France 8, pp 547–558.*
- Boutelli M.H., 2012. Salinité des eaux et des sols au niveau de la sebkha de Bamendil, caractérisation et conséquences sur l'environnement. *Mémoire de Magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla, 90p.*
- Brunel M., Hammor D., Misseri M., Gleizes G & Bouloton J., 1988. Cisaillements synmétamorphes avec transport vers le Nord-Ouest dans le massif cristallin de l'Edough (Wilaya de Annaba, Algérie) : Une faille normale ductilehercynienne, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 306, série II, pp 1039-1045.*
- Bustillo V., 2005. Biogéochimie et hydroclimatologie appliquées à l'aménagement des bassins fluviaux. Modèles de mélange. Diagnostic et prévision. Cas du Niger, de

l'Amazone et de la Garonne. *Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 235p.*

- Caby R & Hammor D., 1992. Le massif de l'Edough (Algérie): Un Metamorphic Core Complex d'âge miocène dans les Maghrébides. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris 314, pp 829–835.*
- Cheverry C., 1972. Exemple d'application des travaux de 1'«US Salinity Laboratory » (1963-1968) sur l'alcalinisation de sols soumis à l'action d'eaux bicarbonatées. *Cahier ORSTOM, série Pédologique, Vol. X, N°2, pp 193-203.*
- Cohen C.R., 1980. Plate tectonic model for the Oligo-Miocene evolution of the western Mediterranean. *Tectonophysics 68, pp 283-311.*
- Coutagne A., 1954. Quelques considérations sur le pouvoir évaporant de l'atmosphère, le déficit d'écoulement effectif et le déficit d'écoulement maximum. *La Houille blanche. pp* 360 369.
- CPCS., 1967. Classification française des sols. Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols, INRA, Paris, 87p.
- Daifallah T., 2008. Ressources en eau et gestion intégrée dans le bassin versant de l'Oued Kebir Ouest, Nord-Est algérien. *Mémoire de Magister, Université de Annaba, 177p.*
- Daoud Y., 1993. Contribution à l'étude des sols des plaines du Cheliff. Le phénomène de salinisation, Conséquences sur les propriétés physiques des sols argileux. *Thèse de Doctorat d'Etat, INA Alger, 233p.*
- Daoud Y., Cheverry C & Robert M., 1993. Rôle physico-chimique du magnésium dans les sols salés des plaines du Cheliff (Algérie). *Sciences du Sol, Vol. 31,4, pp 281-293*.
- Debièche T.H., 2002. Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse, Nord-Est algérien. *Thèse de Doctorat, Université Franche-Compte, France, 235 p.*
- Derradji F., Kherici N., Romeo M. & Caruba R., 2004. Aptitude des eaux de la vallée de la Seybouse à l'irrigation (Nord-Est algérien). *Sécheresse N° 4, Vol. 15, pp 353-360.*
- Derradji F., Kherici H & Caruba R., 2005. Etude de la drainance dans un système de nappes superposées. Exemple de la nappe d'Annaba (Nord-Est d'Algérie). La Houille Blanche, N°1, pp 65-72.

- DGF., 2003. Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar. Lac de Fetzara, Wilaya de Annaba, *Direction Générale des Forêts (DGF), 6p.*
- **DGF.**, **2007.** Carte des formations forestières, wilaya de Annaba (échelle 1/50 000). *Edition provisoire, Direction générale des Forêts (DGF).*
- Djabri L., Rouabhia A., Hani A., Lamouroux Ch & Pulido-Bosch A., 2008. Origin of water salinity in a lake and coastal aquifer system. *Environment Geology*, *54*, *pp* 565–573.
- Djamaï R., 1993. Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du lac Fetzara (Annaba). *Mémoire de Magister, option : Science Agronomiques. INA Alger, 78 p.*
- Djamaï R., 2007. Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du système endoréique du lac Fetzara (Nord-Est algérien). Approche géochimique et évolution spatio-temporelle des phénomènes. *Thèse de Doctorat d'Etat, Institut National Agronomique d'Alger, Algérie, 167p.*
- Djamaï R., Fadel D., Laïfa A., Benslama M., Daoud Y & Vallès V., 2011. Le concept d'alcalinité résiduelle et évolution géochimique des processus. Application aux sols salés du lac Fetzara (Nord-Est algérien). *Revue des Sciences et de la Technologie, Synthèse* N°23, pp 90-98.
- Douaoui A., Gascuel-Odoux C & Walter C., 2004. Infiltrabilité et érodibilité de sols salinisés de la plaine du Bas Chéliff (Algérie). Étude et Gestion des Sols (4), Vol. 11, pp 379-392.
- Duchaufour Ph., 1970 : Précis de Pédologie. 3^{ème} Edition Maçon et Cie. Paris, France, 488 p.
- Durand J., 1950. Premiers résultats de l'étude des sols du lac Fetzara. *Document Inédit ;* Service d'Etude des Sols, Alger, 112p.
- Fehdi Ch., Boudoukha A., Rouabhia A & Salameh E., 2009. Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott-Laouinet (Région Nord de Tébessa, Sud-Est algérien). *Afrique Science 05(2), pp 217- 231.*
- Frape S.K. & Fritz P., 1987. Saline Water and Gases in Cristalline Rocks. *Geological Association of Canada, special paper 33, 259p.*

- Ghebouli M.S & Bencheikh Elhocine M., 2008. Origine de la salinité des eaux souterraines, cas des hautes plaines sétifiennes (Nord-Est algérien). Sciences & Technologie A- N°28, pp 37-46.
- Gleizes G., Bouloton J., Bossiere G & Collomb P., 1988. Données lithologiques et pétrostructurales nouvelles sur le massif cristallophyyllien de l'Edough (Est Algérie). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 36, pp1001-1008.*
- Gobat J.M., Grosvernier Ph., Matthey y & Buttler A., 1991. Un triangle granulométrique pour les tourbes : analyse semi-automatique et représentation graphique. *Science du Sol, Vol. 29, (1), pp 23-35.*
- Gouaidia L., 2008. Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des parametres physico –chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana Nord-Est algérien. *Thèse de Doctorat, Université de Annaba, Algérie, 199p.*
- Guy A., 1978. Méthode d'analyse des sols. Centre régional de documentation pédagogique de Marseille. Service d'impression 55 une Sylvable 13006.
- Habes S., 2006 : Pollution saline d'un lac, cas du lac Fetzara, Est Algérien. Mémoire de Magister, option : Hydrogéologie. Université de Annaba, Algérie, 103 p.
- Hadj Saïd S., 2007. Contribution à l'étude hydrogéologique d'un aquifère en zone côtière. Cas de la nappe de Guerbes. *Thèse de Doctorat en hydrogéologie. Université de Annaba, Algérie, 188 p.*
- Halitim A., Robert M., Tessier D & Prost R., 1984. Influence de cations échangeables (Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) et de la concentration saline sur le comportement physique (rétention en eau et conductivité hydraulique) de la montmorillonite. *Agronomie, Vol.4, pp 451-459*.
- Hammor D., 1992. Du panafricain au miocène: 600 millions d'années d'évolution polycyclique dans le massif de l'Edough (Algérie nord orientale). Retracés par la pétrologie, la tectonique et la géochronologie (U/Pb, Rb/Sr, Sm/Nd et 39Ar/40Ar). *Thèse de Doctorat, l'UST Languedoc, Université de Montpellier II, France, 205 p.*
- Hammor D & Lancelot J., 1998. Métamorphisme miocène de granites panafricains dans le massif de l'Edough (Nord-est de l'Algérie). Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Vol. 327, pp 391-396.

- Hani A., 2003. Analyse méthodologique de la structure et des processus anthropiques : application aux ressources en eau d'un bassin côtier méditerranéen. *Thèse de Doctorat d'état en géologie appliquée, spécialité : Hydrogéologie, Université de Annaba, Algérie, 214 p.*
- Hilly J., 1962. Etude géologique du massif de l'Edough et du Cap de Fer (Est-Constantinois). *Publications du Service de la Carte Géologique de l'Algérie* (Nouvelles séries) 19, 408 pp.
- Ifagraria., 1967. Etude générale de la mise en valeur agricole des plaines côtières d'Annaba. *Société Ifagraria, Rome, Partie I, 169p.*
- Ilavsky J & Snopkova P., 1987. Découverte d'acritarches paléozoïques dans les terrains métamorphiques de l'Edough (Wilaya d'Annaba, Algérie). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 305(série II), pp 881-884.*
- Jalali M., 2007. Salinization of groundwater in arid and semi-arid zones: An example from Tajarak, Western Iran. *Environment Geology*, *52*, *pp 1133-1149*.
- Joleau L., 1936. Etude géologique de Bone (Annaba)- la calle (El Kala). Bulletin du Service Géologique de l'Algérie (2), N°12, Algérie, 199p.
- Laborde J.P., 2000. Eléments d'hydrologie de surface. *Edition 2000, Université de Nice, France, 192 p.*
- Laouar R., Boyce A.J., Ahmed-said Y., Ouabadi A., Fallick A.E & Toubal A., 2002. Stable isotope study of the igneous, metamorphic and mineralized rocks of the Edough complex, Annaba, North-East Algeria. *Journal of African Earth Sciences, Vol. 35 (2), pp 271-283.*
- Laouar R., Boyce A.J., Arafa M., Ouabadi A., & Fallick A.E. 2005. Petrological, geochemical, and stable isotope constraints on the genesis of the Miocene igneous rocks of Chetaibi and Cap de Fer (NE Algeria). *Journal of African Earth Sciences Vol. 41, pp 445–465.*
- Marignac C., 1976. Mise en évidence des successions paragénétiques dans les principaux filons minéralisés du district filonien polymétallique d'Ain-Barbar (Willaya d'Annaba, Algérie). *Sciences de la Terre XX 4, pp 333-401.*

- Marignac C & Zimmermann J.L., 1983. Ages K-Ar de l'évènement hydrothermal et des intrusions associées dans le district minéralisé Miocène d'Aïn-Barbar (Est Constantinois, Algérie). *Mineralium Deposita, 18, pp 457-467.*
- Marignac C., 1985. Les minéralisations filoniennes d'Ain Barbar (Algérie). Un exemple d'hydrothermalisme lié à l'activité géothermique alpine en Afrique du nord. *Thèse de Doctorat d'Etat (2 tomes), I.N.P. Lorraine, Nancy, France.*
- Marlet S & Job J.O., 2006. Processus et Gestion de la Salinité des sols. In : Tiercelin J.R. Traité d'irrigation, 2^{ème} édition. Technique & Documentation, Lavoisier, 1266 p.
- Marre A., 1992. Le Tell oriental Algérien de Collo à la frontière Tunisienne, Etude géomorphologique. *Vol. 1 & 2, Office des Publications Universitaires. Alger, Algérie.*
- Monie P., Montigny R & Maluski H., 1992. Age Burdigalien de la tectonique ductile extensive dans le massif de l'Edough (Kabylie, Algérie). Données radiométriques 39As-40Ar. Bulletin de la Société Géologique de France, N°5, pp 571-584.
- Maury R.C., Fourcade S., Coulon C., El Azzouzi M., Bellon H., Coutelle A., Ouabadi A., Semroud B., Megartsi M., Cotton M., Belanteur O., Louni-Hacini A., Piqué A., Capdevila R., Herandez J. & Réhault J.P., 2000. Post-collisional neogene magmatism of the Mediterranean Maghreb margin a consequence of slab breakoff. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris 331, pp 159-173.*
- Mc Neal B.L & Coleman N.T., 1968. Effect of solution composition on soil hydraulic conductivity. *Soil Science. Soc. Am. Proc.30, pp 308-312.*
- Ouardi J., 2005. Dégradation des sols et de la nappe des périmètres irrigués du Tadla marocain par salinisation et sodisation. *Thèse de Doctorat, option Géosciences de l'Environnement, Université Cadi Ayyad Marrakech, Maroc, 154p.*
- Rahoui M., Soudi B., Badraoui M., Marcoen J.M & Benzakour M., 2000. Situation actuelle de la qualité des sols et des eaux dans le périmètre irrigué des Doukkala. Séminaire 'Intensification agricole et qualité des sols et des eaux', Rabat, 2-3 Novembre 2000, pp 13-24.
- Rouabhia A & Djabri L., 2010. L'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux souterraines de l'aquifère miocène de la plaine d'El-Ma El-Abiod. *Larhyss Journal,* N° 08, pp 55-67.

- Rouabhia A., Djabri L., Hadji R., Baali F., Fehdi C & Hani A., 2012. Geochemical characterization of groundwater from shallow aquifer surrounding Fetzara lake North-East Algeria. *Arabian Journal of Geosciences, Vol. 5, pp 1-13.*
- Rodier. J., 1996. L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer.
 8^{ème} édition Dunod, Paris, France, 1383 p.
- Saidi D., Le Bissonnais Y., Duval O., Daoud Y & Tessier D., 2008. Estimation et signification de la capacité d'échange cationique des sols salés du Cheliff (Algérie). *Etude et Gestion des Sols, Vol. 15, N° 4, pp 241-253.*
- Schoeller H., 1962. Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources. *Masson, Paris, 642 p.*
- Seghir K & Khérici N., 2008. Contribution to the study of the origin of salinity in alluvial aquifer system in the Ain Chabro-Hammamet (North-East Algeria). *American Journal of Environmental Sciences, Vol. 4, N*° 6, pp 701-709.
- Thornthwaite, C.W., 1948. An approch towards a rational classification of climate. *Geographical Review 38, pp 55-94.*
- Todd K., 1980. Groundwater hydrology. Second Edition. John Wiley et Sons, New York, 510 p.
- Turc L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation; évapotranspiration potentielle. Ann. Agr. n° 12. pp 13 - 49.
- U.S. Salinity Laboratory., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA. Handbook, N° 60, Washington, 160 p.
- Vila J.M., 1970. Le Djebel Edough un massif externe du Nord-Est de la Berbèrie. Bulletin de la Société Géologique de France 7 (tome XII), pp 805–812.
- Vila J.M., 1980. La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens, Thèse de Doctorat Es-sciences Naturelles. Université Pierre et Marie - Curie, Parie VI, pp 282-296.
- Violette A., 2010. Processus et Bilans d'altération en milieu tropical (bassin versant de Mule Hole, Inde du Sud) : Sensibilité à la composition Minéralogique et au Climat. *Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, 374p.*

- Zahi F., 2008. La qualité des eaux et des sols de la région du lac Fetzara (Nord-Est Algérien). *Mémoire de Magister, Université de Annaba, Algérie, 150 p.*
- Zahi F., Djamai R., Drouiche A. & Medjani F., 2011. Contribution to study of soil salinity in the region of Fetzara Lake (Northeast of Algeria). *Journal of Materials and Environmental Science. Vol. 2 (S1), pp 439-444.*
- Zahi F., Djamai R., Chaab S., Djabri L., Drouiche A & Medjani F., 2012. Dynamique de la nappe et qualités physico-chimiques des eaux souterraines du lac Fetzara (Nord-Est algérien). *Revue des Sciences et de la Technologie. Synthèse N°26, pp 86-95.*
- Zenati N., 1999. Relation nappe-lac, Confirmation par l'hydrochimie, Cas de la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El Hadjar, lac Fetzara N-E algérien. *Mémoire de Magister, option : Chimie et Environnement, Université de Annaba, 151p.*
- Zenati N., 2010. Pollution de l'environnement aquatique : diagnostic et proposition « Région de Annaba ». *Thèse de Doctorat en géologie appliquée, Université de Annaba, Algérie, 289p.*
- Zenati N. & Messadi D., 2010. Utilisation de la géostatistique dans l'établissement de la carte de vulnérabilité intrinsèque d'une nappe superficielle à un polluant par infiltration verticale. Cas de la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El Hadjar, Annaba, Algerie. *Communication Science & technologie N° 8, pp 105-110.*

ANNEXES

Porosité totale en %	Appréciation qualitative	
< 25	Porosité très faible	
25 - 40	Porosité faible	
40 - 50	Porosité insatisfaisante	
50 - 55	Porosité satisfaisante	
55 - 70	Porosité excellente	
> 70	Porosité excessivement élevé	

Annexe 1 : Echelle de la porosité totale des sols proposée par *Katchinski* (in Djamai, 1993)

Annexe 2 : Echelle de la perméabilité des sols d'après Duchaufour,	1970
<i>(in Soltner, 1981)</i>	

Perméabilité en cm/h	Appréciation		
$10^{-3} - 3.6 \ 10^{-2}$	Sol imperméable		
$10^{-2} - 0.36$	Sol peu imperméable		
1 - 18	Sol moyennement perméable		
100 - 360	Sol très imperméable		

Annexe 3 : Gamme des pH des sols d'après Gaucher (in Soltner, 1981).

рН	Appréciation
3 - 4.5	Sols extrêmement acides
4.5 - 5	Sols très fortement acides
5 - 5.5	Sols très acides
5.5-6	Sols Acides
6-6.75	Sols faiblement acides
6.75 - 7.25	Sols neutres
7.25 - 8.5	Sols alcalins
> 8.5	Sols très alcalins

	Corrélation critique			Corrélation critique	
Individus	Au seuil de	Au seuil de	Individus	Au seuil de	Au seuil de
	5%	1%		5%	1%
5	0.992	0.997	25	0.684	0.750
6	0.979	0.991	30	0.638	0.705
7	0.961	0.981	35	0.600	0.667
8	0.943	0.969	40	0.568	0.643
9	0.926	0.955	45	0.541	0.606
10	0.903	0.941	50	0.518	0.580
11	0.883	0.926	60	0.477	0.539
12	0.864	0.912	70	0.445	0.505
13	0.846	0.889	80	0.419	0.476
14	0.828	0.883	90	0.397	0.449
15	0.811	0.869	100	0.378	0.429
16	0.797	0.854	125	0.341	0.391
17	0.782	0.843	150	0.313	0.359
18	0.766	0.828	200	0.272	0.314
19	0.754	0.818	250	0.244	0.290
20	0.741	0.804	300	0.223	0.258

Annexe 4 : Valeurs critiques du coefficient de corrélation selon *A. Mangin (in Atahamena. M, 2006).*

Annexe 5 : Analyses en composantes principales

- 1. Les eaux souterraines
- 1.1.1^{ère} campagne (février 2009)



Projection des variables sur le plan F1F3

1.2.2^{ème} campagne (Novembre 2009)





Projection des variables sur le plan F1F3

Projection des individus sur le plan F1F3

2. Les eaux de surface



2.1. 1^{ère} campagne (février 2009)

Projection des variables sur le plan F1F3

Projection des individus sur le plan F1F3



2.2. 2^{ème} campagne (novembre 2009)

Projection des variables sur le plan F1F3

Projection des individus sur le plan F1F3