

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année 2008

Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER

Option: Géosciences

THEME

**La qualité des eaux et des sols de la région du lac
Fetzara (Nord-Est d'Algérie).**

Présenté par : ZAHY Faouzi

Directeur de mémoire: Mr DJABRI Larbi

Pr. U.B.M d'Annaba

DEVANT LE JURY:

Président : Mr HANI Azzedine

Pr. U.B.M d'Annaba

Examineur : Mme ASSASSI Fella

M.C. U.B.M d'Annaba

Mr CHAFFAI Hicham

M.C. U.B.M d'Annaba

Mr DJAMAI Rachid

M.C. U.B.M d'Annaba

Invité : Mr BAALI Fethi

M.C. U. de Tebessa

خلاصة:

تقع بحيرة فذزارة في الشمال الشرقي للجزائر، على مسافة 18 كيلومتر جهة الجنوب الشرقي لمدينة عنابة. وتمتد على طول 17 كيلومتر من الشرق إلى الغرب و 13 كيلومترا من الشمال إلى الجنوب وتقدر مساحتها بحوالي 18600 هكتار، وقد تم تصنيفها رسميا كمنطقة محمية ضمن اتفاقية "رامسار"، مما يتعين حماية هذا الموقع .

دراسات عديدة أجريت على مياه وتربة منطقة فذزارة : *Durand* سنة 1950 ؛ *Ifagraria* سنة 1967؛ الوكالة اليابانية للتعاون الدولي (AJCI) سنة 1985؛ زناتي سنة 1999؛ بلحمره سنة 2001 ؛ *BNEDER* سنة 2004 ؛ حابس سنة 2006 و جمعي سنتي 1993 و 2007). هذه الدراسات أجريت لرصد درجة الملوحة وتسليط الضوء على مصدرها والعوامل التي تحكمها.

ويتمثل الهدف الرئيسي من هذا العمل في رصد الحالة الراهنة لكيمياء المياه السطحية والجوفية للمنطقة، تطورها مع الزمان والمكان، لتقييم الخصائص الفيزيائية والفيزيوكيميائية للتربة المهددة بخطر ظاهرة التملح ودراسة تأثيرها على نوعية المياه في المنطقة.

لهذا الغرض أجرينا متابعة ميدانية لمدة ستة أشهر (من كانون الأول "ديسمبر" 2006 إلى أيار "مايو" 2007). حيث قمنا بأخذ عينات من التربة خلال شهر كانون الأول 2006 و ثلاث حملات لأخذ عينات المياه (كانون الثاني / آذار و ايار 2007)، وأجريت التحاليل الكيميائية على المياه السطحية المتمثلة في واد المالح، واد الحوت، واد زياد (مداخل بحيرة فذزارة) ووادي مبعوجة (مخرج البحيرة) وأيضا على المياه الجوفية المحيطة بالبحيرة. إن دراسة نتائج التحاليل الكيميائية التي أجريت على التربة والمياه الجوفية، بينت وجود درجة ملوحة عالية للمياه والتربة، خاصة في الجنوب الشرقي (بلدية الشرفة) وكذلك الشمال الشرقي لبحيرة فذزارة (بلدية وادي زياد). أما بالنسبة للمياه السطحية فالملوحة عالية جدا في مخرج البحيرة (واد مبعوجة) خلافا لمداخلها (واد زياد، واد الحوت و واد المالح).

وفيما يتعلق بالعناصر المعدنية الثقيلة، كانت نسبة تركيزها في المياه الجوفية والسطحية منخفضة، خاصة عنصر الحديد، والكروم، والمنغنيز، والزنك والنحاس. أما عنصرا الرصاص والنيكل فموجودان بتركيز عال تجاوز المعايير المسموح بها، وهذا راجع ربما إلى صرف المياه القدرة في الأودية، وإلى طبيعة التكوينات الجيولوجية وظاهرة الرشح المتسببة في تحرير كمية كبيرة من هذه العناصر.

الكلمات المفتاح: بحيرة فذزارة، الملوحة، المياه الجوفية و السطحية، التربة، العناصر المعدنية الثقيلة.

Abstract:

The lake of Fetzara is located in the North-east of Algeria, it is situated at 18 km South-east of the city of Annaba. It lies down on 17 km from East to West and 13 km from North to South with an area of about 18600 ha, it was officially classified as an area "Ramsar", which involves protection of this location.

Several studies have been conducted on water and soil of the region Fetzara such as (*Durand, 1950; Ifagraria, 1967; JICA, 1985; Zenati, 1999; Belhamra, 2001; BNEDER, 2004; Habes, 2006 and Djamai, 1993 & 2007*). These studies carried out to monitor the salinity, to highlight its origins and factors governing it.

The main objective of this work is to monitor the current state of the chemistry of surface and groundwater in the region of Lake Fetzara, its evolution in time and space, to evaluate the physical and physicochemical properties of soil threatened by the phenomenon of salinization and study their impact on water quality in the region.

For this purpose, a practical follow-up of six months has been achieved (*from December 2006 to May 2007*). It conducted a campaign of soil sampling during the month of December 2006 and three campaigns of water sampling (January, March and May 2007), the analyses carried out are related to surface waters namely; oued Mellah, oued El Hout, oued Zied (entrances of the Lake Fetzara) and oued Meboudja (draining of the lake) and groundwater of the aquifers surrounding the lake.

The interpretation of the results of tests on soil and groundwater shows that salinity of water and soil is excessively high, it is more important particularly at the South-east (region of Cheurfa) and that of the North-east of the lake (region of Oued Zied). As for the surface waters, the salinity is higher in the outlet (oued Meboudja) than that of the entrances of the Lake (oued Zied, El Hout and Mellah).

Regarding the trace elements of metal, surface and groundwater have low concentrations of iron, chromium, manganese, zinc, copper, whereas the Lead and nickel are available with high concentrations that exceed the standards allowed by *OMS*, which is probably due to sewerage network in the oueds, the nature of geological formations and the phenomenon of leaching governing release of a large quantity of these elements.

Keywords: Fetzara Lake, salinization, groundwater, surface water, soils, trace elements of metal.

Résumé:

Située au Nord-est de l'Algérie, le lac Fetzara se trouve à 18 km au Sud-est de la ville d'Annaba. Il s'allonge sur 17 km d'Est en Ouest et sur 13 km du Nord au Sud avec une superficie d'environ 18600 ha, il a été officiellement classé comme étant une zone « Ramsar », ce qui implique une protection de ce site.

Plusieurs études ont été effectuées sur les eaux et les sols de la région du Fetzara (*Durand, 1950 ; Ifagraria, 1967 ; A.J.C.I, 1985 ; Zenati, 1999 ; Belhamra, 2001 ; B.N.E.D.E.R, 2004 ; Habes, 2006 et Djamai, 1993 & 2007*). Ces études effectuées afin de suivre l'évolution de la salinité, de mettre en évidence ses origines et les facteurs régissant celle-ci.

L'objectif principal de ce travail est de contrôler l'état actuel de la chimie des eaux superficielles et souterraines de la région du lac Fetzara, son évolution dans le temps et dans l'espace, d'évaluer les propriétés physiques et physico-chimiques des sols menacés par le phénomène de salinisation et d'étudier leur influence sur la qualité des eaux de la région.

Pour cet objectif, un suivi de six mois a été réalisé (Décembre 2006 au Mai 2007). On a effectué une campagne d'échantillonnage de sols durant le mois de Décembre 2006 et trois campagnes d'échantillonnages des eaux (Janvier, Mars et Mai 2007), les analyses effectuées se rapportent aux eaux de surface à savoir ; oued Mellah, oued El Hout, oued Zied (les entrées du lac Fetzara) et oued Meboudja (vidange du lac Fetzara) et aux eaux souterraines des nappes entourant le lac.

L'interprétation des résultats des analyses effectuées sur les sols et les eaux souterraines, montre que la salinité des eaux et des sols est excessivement élevée, elle est plus importante notamment au niveau de la région Sud-est (Commune de Cheurfa) et celle de la région Nord-est du lac (Commune de Oued Zied). Concernant les eaux superficielles, la salinité est très élevée à la sortie (oued Meboudja) qu'à l'entrée du lac (oued Zied, El Hout et Mellah).

En ce qui concerne les éléments traces métalliques, les eaux souterraines et superficielles ont des faibles concentrations en Fer, Chrome, Manganèse, Zinc, Cuivre. Par contre le Plomb et le Nickel se présentent avec des fortes concentrations qui dépassent les normes admises, ce qui est probablement dû aux rejets dans les oueds, à la nature des formations géologiques et le phénomène de lessivage qui régissent la libération en grandes quantité de ces éléments.

Mots clés : lac Fetzara, salinisation, eaux souterraines, eaux superficielles, sols, éléments traces métalliques.

REMERCIEMENTS

Au moment où je termine mon mémoire, je ne manque d'adresser mes sincères remerciements à notre Dieu le grand créateur qui m'a guidé dans mes pas pour arriver à ce niveau.

je souhaite aussi d'adresser un message de tendresse à toutes les personnes qui m'ont soutenu tout au long du travail de terrain.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance au Professeur Djabri Larbi pour son encadrement, ses nombreux conseils et son soutien tout au long de mon travail ainsi qu'au Mr Djamai Rachid qui m'a introduit dans le laboratoire de Biologie et pour sa précieuse aide lors des analyses chimiques des eaux et de sols.

J'adresse également mes vifs remerciements aux membres de jury, qui ont bien voulu me faire l'honneur de juger ce travail.

Mes remerciements à Mr Djaffar Rachid le responsable du Laboratoire de Toxicologie (Annaba) et au personnel du laboratoire surtout Nouredine Doghmane, à Mr Lounissi (responsable du Laboratoire de Biomarine), à Mr Bougataya (responsable du Laboratoire central d'El Hadjar) pour l'aide qu'ils m'ont apporté dans la réalisation des analyses chimiques.

Je tiens aussi à remercier tous les gens du service de l'ANRH à Annaba, pour toutes les facilités qu'ils m'ont donné pour acquérir les données nécessaires à la réalisation de ce travail.

Mes vifs remerciements à tous les amis qui m'ont aidé et encouragé pour réaliser ce mémoire, je cite spécialement : Sissaoui T, Drouiche A/M, Medjani F, Sekta H, Chaoui W, Remita A/R, Mecibah I, Zahi H & Djebablah S.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce travail.

Je termine par un grand remerciement à mes chers parents à qui je dédie mon mémoire.

Faouzi

Table de matières

- ملخص
- Résumé
- Abstract
- Remerciement
- Liste des Tableaux
- Liste des Figures

	Page
Introduction Générale	
Chapitre I : Cadre Géomorphologique	
1. Géomorphologie.....	03
1.1. Lac Fetzara.....	04
1.2. Les montagnes.....	07
1.3. La plaine d'Annaba.....	08
2. Le couvert végétal.....	08
3. Conclusion.....	11
Chapitre II : Aperçu Géologique	
1. Introduction.....	12
2. Massif de l'Edough.....	13
3. Description lithologique.....	14
3.1. Les Gneiss.....	14
3.2. Les micaschistes.....	15
3.3. Les roches métabasiques	16
3.4. La couverture sédimentaire	16
3.5. Le magmatisme tertiaire.....	16
4. Tectonique et structure du massif de l'Edough	17
4.1. Déformations synmétamorphiques	17
4.2. Déformations tardives	17
5. Minéralisation du massif de l'Edough	18
6. Plaines littorales.....	18
7. Conclusion	20
Chapitre III : Etude Pédologique	
1. Introduction.....	21
2. Etudes réalisées.....	21
3. Différentes classes de sols.....	21
3.1. Les sols peu évolués (SPE).....	21
3.2. Les sols vertisols (SV).....	22
3.3. Les sols hydromorphes (SH).....	22
3.4. Les sols halomorphes (SHA).....	22
4. Matériels et méthodes	23
4.1. Echantillonnage des sols.....	23
4.2. Préparation des échantillons	23
4.3. Méthodes d'analyses au laboratoire.....	23
4.4. Propriétés physico chimiques des sols.....	24

5. Résultats et discussions	24
5.1. Les caractéristiques physiques des sols	24
5.1.1. La densité	24
5.1.1.1. La densité apparente (Da).....	24
5.1.1.2. La densité réelle (Dr)	24
5.1.2. La porosité totale (P%)	25
5.1.3. La perméabilité	25
5.2. Les caractéristiques physico-chimiques des sols	27
5.2.1. Caractère acide ou alcalin du sol	27
5.2.2. Le carbone organique (% C)	28
5.2.3. La matière organique (% MO)	28
5.2.4. Etude de la salinité des sols.....	30
5.2.4.1. La conductivité électrique (CE).....	30
5.2.4.2. Les sels solubles	31
6. Etude statistique des données chimiques des solutions de sols	34
6.1. Analyses en composantes principales (A.C.P)	34
6.2. Matrice des corrélations	34
6.3. Etude des variables et des individus	35
7. Influence des sels sur les propriétés physiques des sols	35
8. Influence de l'eau salée sur les sols	37
8.1. L'effet de l'eau salée sur les caractéristiques physiques	37
8.2. L'effet de l'eau salée sur les caractéristiques chimiques et physico-chimiques.....	37
9. Conclusion	38

Chapitre IV : Hydroclimatologie

I. Climatologie

1. Introduction.....	39
2. Stations de mesure	39
3. Etude des facteurs climatiques	40
3.1. Précipitations	40
3.1.1. Précipitations moyennes mensuelles	40
3.1.2. Coefficient pluviométrique (H)	42
3.1.3. Répartition saisonnière des précipitations	43
3.2. La Température	45
3.3. L'humidité	45
3.4. Le Vent	46
3.5. Type de climat	46
4. Bilan hydrique	48
4.1. Evapotranspiration	48
4.1.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)	48
4.1.1.1. Formule de Serra	48
4.1.1.2. Formule de C.W. Thornthwaite	49
4.1.2. Evapotranspiration réelle (ETR).....	49
4.1.2.1. Formule de Coutagne.....	49
4.1.2.2. Formule de Turc	50
4.2. Ruissellement	50

4.3. Infiltration	51
5. Bilan hydrique selon C.W .Thorntwaite	52
5.1. Interprétation du bilan de Thorntwaite.....	55
6. Détermination de l'infiltration efficace mensuelle (Février 2007).....	57
7. Conclusion.....	59
II. Hydrologie	
1. Introduction	60
2. Réseau hydrographique.....	61
3. Régime hydrologique.....	62
3.1. Lac Fetzara	62
3.2. Régime des affluents du lac Fetzara	62
3.2.1. Oued El Hout	63
3.2.2. Oued Mellah.....	64
3.2.3. Oued Zied	64
3.2.4. Oued Meboudja	65
4. Conclusion	66
Chapitre V : Hydrogéologie	
1. Introduction	67
2. Description des différents aquifères	67
2.1. Les nappes superficielles	67
2.1.1. La nappe des gneiss altérés.....	67
2.1.2. La nappe superficielle	67
2.2. Les nappes profondes.....	68
2.2.1. La nappe des cipolins (formations métamorphiques)	68
2.2.2. La nappe des graviers.....	69
3. Caractéristiques de l'aquifère superficiel entourant le lac	69
3.1. Inventaire des points d'eau	69
3.2. Interprétation des cartes piézométriques.....	71
3.2.1. Carte piézométrique du mois de Décembre 2006.....	71
3.2.2. Carte piézométrique du mois de Janvier 2007.....	72
3.2.3. Carte piézométrique du mois de Février 2007.....	73
3.2.4. Carte piézométrique du mois de Mars 2007.....	74
3.2.5. Carte piézométrique du mois d'Avril 2007.....	75
3.2.6. Carte piézométrique du mois de Mai 2007.....	76
3.2.7. Variation du niveau piézométrique entre janvier 2007 et Mai 2007.....	77
3.3. Gradient Hydraulique	79
3.4. Les caractéristiques hydrodynamiques.....	79
4. Relations piézométrie, précipitations et recharge.....	81
5. Conclusion	83
Chapitre VI : Etude Hydrochimique	
1. Introduction.....	84
2. Les eaux souterraines.....	85
2.1. Eléments majeurs	85
2.1.1. Statistiques élémentaires.....	85
2.1.2. Analyse en composantes principales.....	86
2.1.2.1. Observation du cercle ACP.....	86

2.1.2.2. Matrice de corrélation.....	88
2.2. Eléments traces métalliques.....	89
2.2.1. Analyse en composantes principales.....	89
3. Les eaux de surface.....	90
3.1. Eléments majeurs.....	90
3.1.1. Statistiques élémentaires.....	90
3.1.2. Matrice de corrélation.....	91
3.1.3. Observation du cercle ACP.....	92
4. Evolution des concentrations- débits.....	93
4.1. Eléments majeurs.....	93
4.1.1. Oued Zied.....	93
4.1.2. Oued El Hout.....	97
4.1.3. Oued Mellah.....	100
4.2. Eléments traces métalliques.....	102
4.2.1. Oued Zied.....	102
4.2.2. Oued El Hout.....	104
4.2.3. Oued Mellah.....	106
5. Evolution des concentrations le long de oued Meboudja.....	108
6. Estimation des flux transitant par les Oueds.....	111
7. Conclusion.....	115
Conclusion Générale.....	116
Références Bibliographiques.....	119
Annexes.....	123

N°	Titre	Page
Chapitre III : Etude Pédologique		
<i>Tab.1</i>	: La densité apparente, la densité réelle et la porosité des sols.....	25
<i>Tab.2</i>	: Variation des pH des sols.....	27
<i>Tab.3</i>	: Le carbone (% C) et la matière organique (% MO) des sols.....	29
<i>Tab.4</i>	: Variation de la conductivité électrique des sols ($\mu\text{s}/\text{cm}$).....	30
<i>Tab.5</i>	: Résultats des analyses chimiques des solutions de sols du lac Fetzara.....	31
<i>Tab.6</i>	: Matrice des corrélations des paramètres physicochimiques.....	40
Chapitre IV : Hydroclimatologie		
<i>Tab.7</i>	: Coordonnées géographiques des stations de mesure.....	39
<i>Tab.8</i>	: Précipitations moyennes mensuelles (mm) aux stations des Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975-2006) et Berrahal (1981-2006).....	40
<i>Tab.9</i>	: Hauteurs moyennes annuelles des précipitations.....	42
<i>Tab.10</i>	: Répartition saisonnières des précipitations aux stations des Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975-2006) et Berrahal (1981-2006).....	43
<i>Tab.11</i>	: Températures moyennes mensuelles ($^{\circ}\text{C}$) à la station des Salines (1975-2006).....	45
<i>Tab.12</i>	: Humidité relative moyenne mensuelle (H %) à la station des Salines (1975 – 2006).....	46
<i>Tab.13</i>	: Vitesse moyenne mensuelle des vents (m/s) à la station des Salines (1975 – 2006).....	46
<i>Tab.14</i>	: Résultats de l'ETP selon la formule de Serra.....	49
<i>Tab.15</i>	: Résultats de l'ETP selon la formule de C.W Thornthwaite.....	49
<i>Tab.16</i>	: Résultats de l'ETR d'après la méthode de Coutagne.....	50
<i>Tab.17</i>	: Résultats de l'ETR d'après la méthode de Turc.....	50
<i>Tab.18</i>	: Résultats du ruissellement selon la formule de Tixeront-Berkaloff modifié par Romantchouk.....	51
<i>Tab.19</i>	: Résultats du bilan hydrologique.....	51
<i>Tab.20</i>	: Bilan hydrique d'après C.W Thornthwaite (Les Salines 1975-2006).....	53
<i>Tab.21</i>	: Bilan hydrique d'après C.W Thornthwaite (Pont Bouchet 1975-2006).....	53
<i>Tab.22</i>	: Bilan hydrique d'après C.W Thornthwaite (Ain Berda 1975-2006).....	54
<i>Tab.23</i>	: Bilan hydrique d'après C.W Thornthwaite (Berrahal 1981-2006).....	54
<i>Tab.24</i>	: Valeurs de l'évapotranspiration réelle selon les différentes méthodes.....	55
<i>Tab.25</i>	: Infiltration efficace mensuelle (Février 2007) selon la méthode de Scholler (1962).....	58
<i>Tab.26</i>	: Quelques caractéristiques de sous bassin versant du lac Fetzara.....	61
Chapitre V : Hydrogéologie		
<i>Tab.27</i>	: Variation du niveau piézométrique entre Janvier 2007 et Mai 2007.....	78
<i>Tab.28</i>	: Gradient hydraulique de la nappe superficielle.....	79
<i>Tab.29</i>	: Transmissivité obtenue dans la région du lac Fetzara.....	79
<i>Tab.30</i>	: Variation des profondeurs de la surface piézométrique (NS en m) (Décembre 2006 – Mai 2007).....	81

Chapitre VI : Etude Hydrochimique

Tab.31 : Variations des concentrations des éléments majeurs des eaux souterraines.....	86
Tab.32 : Variations du Potassium et des Sulfates entre les mois de Janvier et Mars 2007.....	87
Tab.33 : Matrice de corrélation des eaux souterraines.....	88
Tab.34 : Variations des concentrations des éléments majeurs des eaux de surface.....	91
Tab.35 : Matrice de corrélation des eaux de surface.....	91
Tab.36 : Flux des entrées et de la sortie du lac Fetzara (Janvier 2007).....	112
Tab.37 : Flux des entrées et de la sortie du lac Fetzara (Mars 2007).....	113
Tab.38 : Flux des entrées et de la sortie du lac Fetzara (Mai 2007).....	114

Listes des Figures

N° :	Titre	Page
Chapitre I : Cadre Géomorphologique		
<i>Fig. 1 :</i>	Carte Géomorphologique de la région de lac Fetzara.....	03
<i>Fig. 2 :</i>	Coupe sur le piémont de la bordure Sud du lac Fetzara (Marre, 1992).....	04
<i>Fig. 3 :</i>	Coupe sur le piémont de la bordure Nord du lac Fetzara (Marre, 1992).....	05
<i>Fig. 4 :</i>	Coupe du canal de drainage du lac Fetzara (Marre, 1992).....	07
<i>Fig. 5 :</i>	Le couvert végétal dans la région du lac Fetzara (DGF 2002).....	10
Chapitre II : Aperçu Géologique		
<i>Fig. 6 :</i>	Carte géologique et Géomorphologique de la plaine d' Annaba.....	12
<i>Fig. 7 :</i>	Carte géologique du massif de l'Edough (Laouar et al. 2002).....	13
<i>Fig. 8 :</i>	Coupes géologiques entre Ain Berda et l'Edough par le lac Fetzara.....	19
Chapitre III : Etude Pédologique		
<i>Fig. 9 :</i>	Répartition des classes des sols du lac Fetzara (A.J.C.I, 1985).....	22
<i>Fig.10:</i>	Carte d'inventaire des points de prélèvement.....	23
<i>Fig.11:</i>	Variations des densités réelles et apparentes au niveau de la couche supérieure (0-20cm).....	26
<i>Fig.12:</i>	Variations des densités réelles et apparentes au niveau de la couche inférieure (20-40cm).....	26
<i>Fig.13:</i>	Variations de la porosité des sols au niveau des couches (0-20cm) et (20-40cm).....	26
<i>Fig.14:</i>	Variation du pH au niveau de la couche (0 - 20 cm).....	28
<i>Fig.15:</i>	Variation du pH au niveau de la couche (20 - 40 cm).....	28
<i>Fig.16:</i>	Evolution du carbone organique dans les couches (0-20cm) et (20-40cm).....	29
<i>Fig.17:</i>	Evolution de la matière organique dans les couches (0-20cm) et (20-40cm).....	29
<i>Fig.18:</i>	Variation de la conductivité électrique (CE en $\mu\text{s}/\text{cm}$).....	30
<i>Fig.19:</i>	Evolution de la concentration des cations au niveau de la couche supérieure (0-20cm).....	32
<i>Fig.20:</i>	Evolution de la concentration des cations au niveau de la couche inférieure (20-40cm).....	32
<i>Fig.21:</i>	Evolution de la concentration des anions au niveau de la couche supérieure (0-20 cm).....	33
<i>Fig.22:</i>	Evolution de la concentration des anions au niveau de la couche inférieure (20-40 cm).....	33
<i>Fig.23:</i>	Cercle de corrélation selon le plan F1F2.....	36
<i>Fig.24:</i>	Répartition des individus selon le plan F1F2.....	36
Chapitre IV : Hydroclimatologie		
<i>Fig.25 :</i>	Précipitations moyennes mensuelles (mm) aux stations : des Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975 -2006) et Berrahal (1981-2006).....	41
<i>Fig.26:</i>	Les variations des coefficients pluviométriques pour les stations ; les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975/2006) et Berrahal (1981-2006).....	42
<i>Fig.27:</i>	Répartition saisonnières des précipitations (%) aux stations des Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975-2006) et Berrahal (1981-2006).....	44

Fig.28: Températures moyennes mensuelles (°C) à la station des Salines (1975 – 2006).....	45
Fig.29: Courbe pluviométrique aux Stations des Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975/2006) et Berrahal (1981-2006).....	47
Fig.33: Bilan d'eau selon la méthode de Thornthwaite pour les stations ; des Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal.....	56
Fig.31: Carte de l'infiltration efficace de la région du Fetzara (Février 2007).....	58
Fig.32: Les principaux sous bassins versants du lac Fetzara (in Zenati, 1999).....	60
Fig.33: Courbes d'évolutions de débits de l'oued El Hout pour les deux périodes (Déc 2004 – Mars 2005) et (Jan 2007 – Mai 2007).....	63
Fig.34: Courbes d'évolutions de débits de l'oued Mellah pour les deux périodes (Déc 2004 – Mars 2005) et (Jan 2007 – Mai 2007).....	46
Fig.35: Courbes d'évolutions de débits de l'oued Zied pour les deux périodes (Déc 2004 – Mars 2005) et (Jan 2007 – Mai 2007).....	65
Fig.36: Courbe d'évolution de débits de l'oued Meboudja pour les deux périodes (Déc 2004 – Mars 2005) et (Jan 2007 – Mai 2007).....	65

Chapitre V : Hydrogéologie

Fig.37: Situation géographique des nappes superficielles de la plaine de Annaba.	68
Fig.38: Coupe schématique du système aquifère d'Annaba.....	69
Fig.39: Carte d'inventaire des puits dans la région du lac Fetzara.....	70
Fig.40: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (Décembre 2006).....	71
Fig.41: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (Janvier 2007).....	72
Fig.42: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (Février 2007).....	73
Fig.43: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (Mars 2007).....	74
Fig.44: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (Avril 2007).....	75
Fig.45: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (Mai 2007).....	76
Fig.46: Carte de différence du niveau piézométrique entre Janvier 2007 et Mai 2007.....	77
Fig.47: Carte de la perméabilité verticale des sols de la région du lac Fetzara (Zenati, 1999; modifiée).....	80
Fig.48: Variation des profondeurs de la surface piézométrique NS (m) en fonction des précipitations P en mm (station des Salines).....	81
Fig.49: Variation du niveau piézométrique NP (m) en fonction de l'infiltration efficace Ie (mm).....	82

Chapitre VI : Etude Hydrochimique

Fig.50: Carte d'inventaire des points de prélèvement.....	85
Fig.51: Cercle ACP des eaux souterraines (Eléments majeurs).....	87
Fig.52: Faciès chimiques des eaux souterraines (Mars 2007).....	89
Fig.53: Cercle ACP des eaux souterraines (Eléments traces métalliques).....	90
Fig.54: Cercle ACP des eaux de surface (Eléments majeurs).....	92
Fig.55: Faciès chimiques des eaux de surface (Mars 2007).....	93
Fig.56: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de l'oued Zied (Janvier 2007).....	94
Fig.57: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Zied (Mars 2007).....	95
Fig.58: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Zied (Mai 2007).....	96

Fig.59: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de l'oued El Hout (Janvier 2007).....	97
Fig.60: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued El Hout (Mars 2007).....	98
Fig.61: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued El Hout (Mai 2007).....	99
Fig.62: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Mellah (Janvier 2007).....	100
Fig.63: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Mellah (Mars 2007).....	101
Fig.64: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Zied (Janvier 2007).....	102
Fig.65: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Zied (Mars 2007).....	103
Fig.66: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued El Hout (Janvier 2007).....	104
Fig.67: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued El Hout (Mars 2007).....	105
Fig.68: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Mellah (Janvier 2007).....	106
Fig.69: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Mellah (Mars 2007).....	107
Fig.70: Evolution des concentrations le long de oued Meboudja durant les trois campagnes (Janvier, Mars et Mai 2007).....	109
Fig.71: Evolution des concentrations le long de oued Meboudja durant les deux campagnes (Janvier, Mars 2007).....	110
Fig.72: Flux des entrées du lac Fetzara (Janvier 2007).....	112
Fig.73: Flux des entrées et de la sortie du lac Fetzara (Janvier 2007).....	112
Fig.74: Flux des entrées du lac Fetzara (Mars 2007).....	113
Fig.75: Flux des entrées et de la sortie du lac Fetzara (Mars 2007).....	113
Fig.76: Flux des entrées du lac Fetzara (Mai 2007).....	114
Fig.77: Flux des entrées et de la sortie du lac Fetzara (Mai 2007).....	114

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les dernières décennies ont vu émerger une prise de conscience des problèmes environnementaux aux échelles locales et régionales (pollution de l'air urbain et de l'environnement industriel, pollution des eaux et des sols).

La question relative à la qualité des eaux de toutes natures et des sols s'est trouvée posée bien avant celle du réchauffement climatique et reste une préoccupation constante.

Ces milieux sont des ressources essentielles à la vie en général (biodiversité) et aux sociétés humaines en particulier (alimentation en eau potable et autres usages, sols agricoles et urbains), dont il faut protéger la qualité en prévenant les pollutions de toutes natures et en restaurant si nécessaire les compartiments pollués, sans nuire de façon excessive au développement économique. Des substances susceptibles de contaminer les eaux et les sols sont extrêmement nombreuses et diverses en raison d'une part aux activités humaines multiples et d'autre part aux facteurs naturels qui peuvent en être la source, mais l'attention est plus particulièrement portée, selon qu'on s'intéresse aux sols et aux eaux, sur les substances d'origine géologique, industriel et agricole. Il n'y a guère de sens à établir une hiérarchie dans le caractère polluant de ces substances, tant elles diffèrent par leur comportement dans les milieux physiques, par leurs effets biologiques et par les quantités susceptibles de contaminer ces milieux sous forme diffuse ou localement massive. On connaît la phrase célèbre de Paracelse qui, au XVI^e siècle, affirmait : «*Tout est poison, rien n'est poison, seule la dose fait le poison* ». Si la toxicologie moderne est infiniment plus nuancée et plus fine, bien qu'encore loin de la perfection dans ses prévisions.

Le lac Fetzara est l'un des plus importants lacs de l'extrême Nord-est Algérien, il a été officiellement classé comme une zone « Ramsar », autrement dit une zone humide, donc sa protection s'impose. Plusieurs études ont été effectuées sur les eaux et les sols de la région du Fetzara (*Durand, 1950 ; Ifagraria, 1967 ; A.J.C.I, 1985 ; Zenati, 1999 ; Belhamra, 2001 ; B.N.E.D.E.R, 2004 ; Habes, 2006 et Djamai, 1993 & 2007*). Ces études effectuées afin de suivre l'évolution de la salinité, de mettre en évidence ses origines et les facteurs régissant celle-ci.

La présente étude a été menée afin de contrôler l'état actuel de la chimie des eaux superficielles et souterraines de la région du lac Fetzara, son évolution dans le temps et dans l'espace, d'évaluer les propriétés des sols menacés par le phénomène de salinisation et d'étudier leur influence sur la qualité des eaux.

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

- ✚ Le premier chapitre est consacré à l'étude géomorphologique, dans cette partie nous allons essayer de mettre en évidence les liens qui semblent exister entre les différentes formes géomorphologiques (relief, oueds, plaine..) de la région du Fetzara.
- ✚ Le deuxième chapitre a pour but principal d'étudier le contexte géologique, montrant l'affleurement de terrains métamorphiques et éruptifs au Nord et Nord-est du lac, et les terrains sédimentaires occupent le reste de la région d'étude.
- ✚ Le troisième chapitre représente une étude des propriétés physiques et physico-chimiques des sols du lac Fetzara qui sont très affectés par le phénomène de salinisation.
- ✚ Le quatrième chapitre est consacré à l'étude hydroclimatologique, cette étude effectuée à 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 cinquième chapitre, basé sur les relevés piézométriques, permettra d'envisager les processus d'alimentation des aquifères, la détermination du sens d'écoulement et les relations existantes entre les différents systèmes (nappe-lac-oueds).
- ✚ Enfin, le sixième chapitre représente une étude générale des caractéristiques physico-chimiques des eaux de la région du lac Fetzara. Cette étude a été menée afin de contrôler l'état actuel de la chimie des eaux, son évolution dans le temps, dans l'espace et en fonction de la variation des paramètres physico-chimique de l'eau.

Chapitre I

CADRE

GEOMORPHOLOGIQUE

Le lac Fetzara est une cuvette située entre le massif de l'Edough et la plaine de Annaba. La mise en place du lac est due aux différentes formes (relief, oueds, plaine..), caractérisant la région. Dans cette partie nous allons essayer de mettre en évidence les liens qui semblent exister entre ces différentes formes.

1. 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 djebels Edough et Belleleita au Nord et aux chaînes telliennes au Sud, et de la plaine d'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.

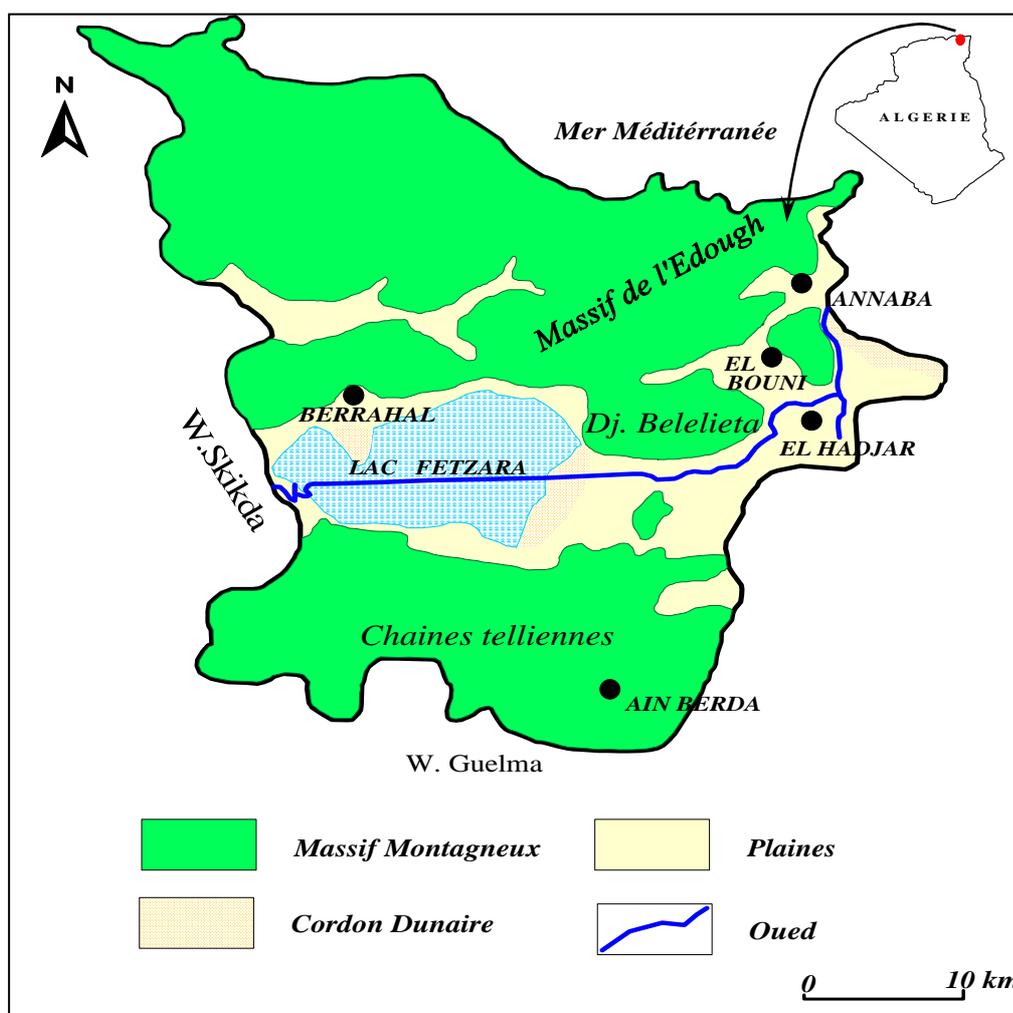
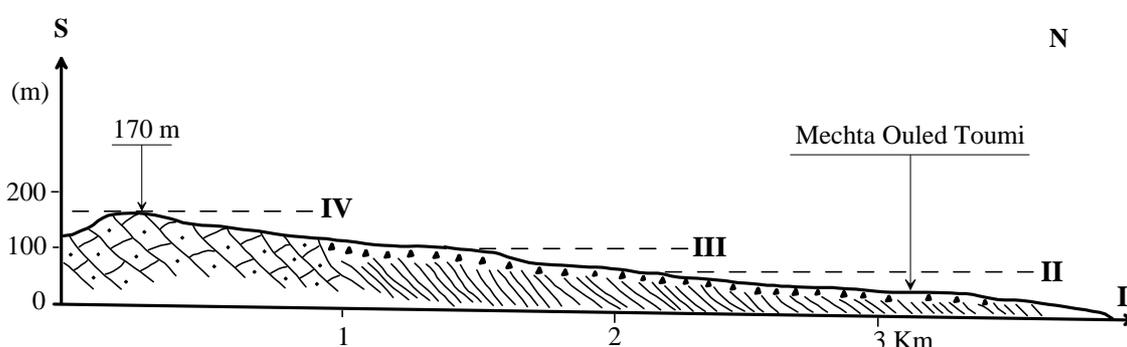


Figure 1 : Carte Géomorphologique de la région de lac Fetzara
(in Zenati, 1999. modifiée).

1.1. Lac Fetzara

La cuvette du lac Fetzara présente des bordures Nord et Sud nettement dissymétriques, elle est due à une tectonique active pendant le Quaternaire ayant causée une large dépression dont les dimensions sont approximativement de 17 km d'Ouest en Est et 13 km du Nord au Sud et constitue la partie basse d'un grand sous bassin versant endoréique de 515 km² de superficie.

Le Sud, est caractérisé par la présence d'un véritable piémont (fig.2) avec quatre niveaux de glacis quaternaires étagés sur les grès ou les marnes, s'est construit en aval du tell Nord Guelmien. La coupe fig.2, montre la présence sur ce piémont de quatre niveaux de glacis se répartissant comme suit :



Légende : I-II-III-IV : niveaux de glacis

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

- ❖ **Les restes de hauts niveaux énigmatiques (niveau IV) :** au dessus du ce niveau, en piémont 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, on peut voir, toujours des blocs gréseux avec une formation sablo-argileuse rouge et une croûte calcaire. Plus à l'Ouest et toujours à 200 m, on retrouve d'autres replats présentant les mêmes caractères. (in Marre, 1992)
- ❖ **Les formes encroûtées au Pléistocène moyen (niveau III) :** à plusieurs reprises, vers 150-170 m, le grès pseudo-numidiens sont tronqués par un niveau d'érosion incliné vers le Nord, il s'agit là 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 et longs de 50 m. Sur certains blocs calcaires on peut observer des formes de Karstification, mais souvent

dans une position qui n'est pas celle de leur genèse, il y a donc un transport des blocs après leur Karstification. (in 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. (in Marre, 1992)
- ❖ **Les grands glacis-cônes du pléistocène 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'Oued de l'oued El Hout où se construit un cône très aplati et qui progresse dans la cuvette du lac, il s'agit là de formations sablo-argileuses grises à noires lorsque l'hydromorphie est importante. (in Marre, 1992)

Au Nord, le massif de l'Edough pénètre brutalement dans la cuvette du lac Fetzara, et, 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).

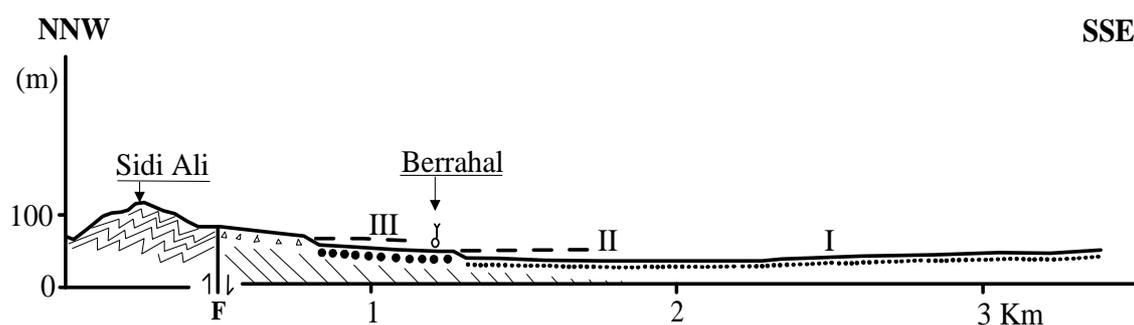


Figure 3: Coupe sur le piémont de la bordure Nord du lac Fetzara (Marre, 1992).

- ❖ **Les lambeaux de glacis (niveau III)** : comme sur le piémont 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. (in 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 qui, à la base présente des traces d'hydromorphie. A l'Est de Berrahal, ces formes plus petites, présentent un matériel constitué par des débris centimétriques et mal émoussés originaires du massif de l'Edough. (in Marre, 1992)
- ❖ **Les formations holocènes (niveau I) :** ces formations se raccordent au fond de la dépression du lac Fetzara. Le long de 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. (in 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, 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 selon une direction Ouest-Est et rejoint le cours d'eau de la Meboudja où il assure la vidange du lac.

Une coupe le long du canal (fig.4) permet d'observer ; des sables argileux jaunâtres avec, à la base des traces d'hydromorphie, des niveaux noirs et argileux qui se terminent en biseaux vers l'aval. Ceux-ci étant riches en matière organique. On a donc là, une alternance de phases rhéastatiques 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.

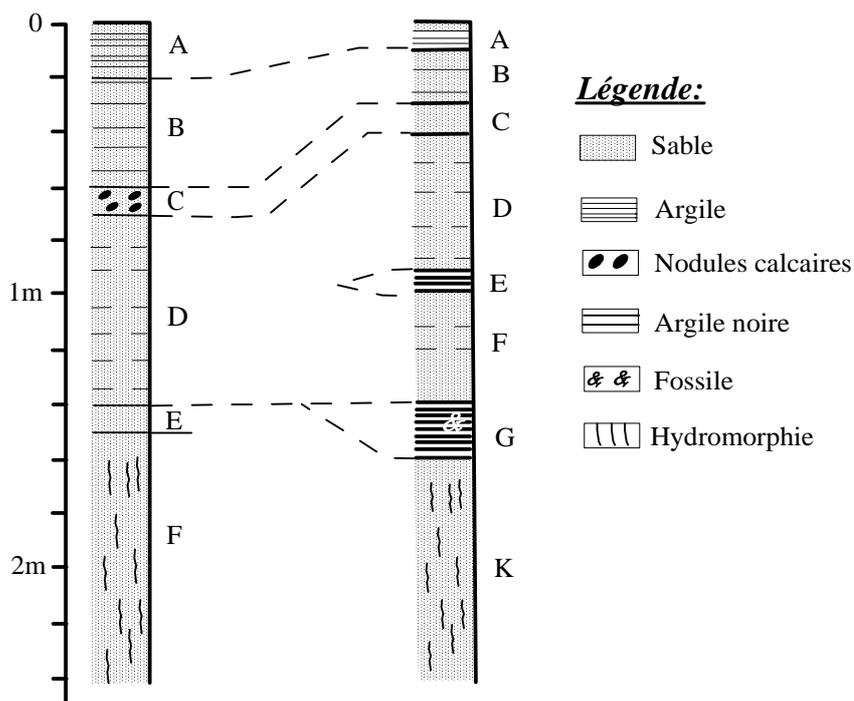


Figure 4: Coupe du canal de drainage du lac Fetzara (Marre, 1992).

En effet, les arrivées sont des espèces (faunes) qu'on retrouve à l'heure actuelle dans les estuaires ou 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, devenir 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.

1.2. 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 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). En fin 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.

1.3. 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 présentent chacun des formes différentes ; la basse plaine dans laquelle s'encaisse l'oued Seybouse, les bordures où on peut 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 (*in 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 de Annaba).

La Seybouse se jette dans la mer méditerranée à Sidi Salem par l'intermédiaire d'un chenal artificiel creusé pendant les années 1960.

2. 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 zones occupées par la végétation naturelle ou par les reboisements et des zones 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 péchier,

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 1/3 de la superficie forestière, cette forêt est exploitée en matière de bois et de liège. Elle fournit ce dernier à l'unité SNLB localisée à l'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 (les incendies, parcours du bétail), il serait donc nécessaire de préserver ces zones contre le pâturage pour rétablir l'équilibre naturel et lutter contre le phénomène de dégradation.

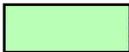
Les reboisements sont constitués de deux essences : l'une feuillue (Eucalyptus) et l'autre résineuse (pin maritime), ce qui a contribué à une régénération de la forêt et une stabilisation des versants.

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 la maraîchage, la tomate industrielle, la céréaliculture et la culture fourragère, ainsi que l'arboriculture fruitière en irriguée pour les agrumes et fruits à noyaux.



Légende :

- | | | | |
|---|-------------------------|---|------------|
|  | Les forets |  | Les maquis |
|  | La végétation pastorale |  | Oueds |
|  | Routes | | |

***Figure 5 : Le couvert végétal dans la région du lac Fetzara
(Direction générale des forets, 2002)***

3. Conclusion

L'étude géomorphologique du Fetzara et ses alentours a montré l'origine et la contribution de chaque forme 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.

Chapitre II

APERÇU

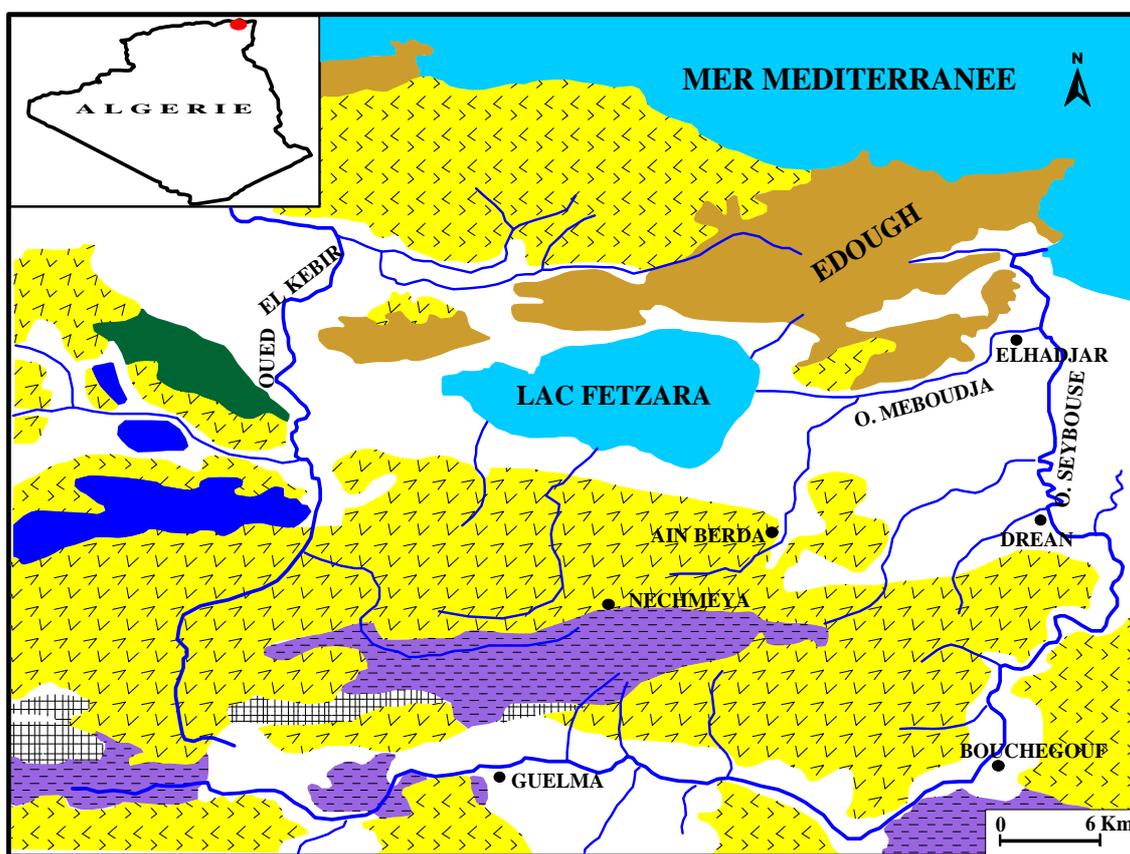
GEOLOGIQUE

L'examen du cadre géologique permet de situer l'objet d'étude centrée sur la qualité des eaux et de sols. A cet effet l'étude géologique est fondamentale, Parce qu'elle comprend le contenu lithologique et les différentes structures des formations, ainsi elle fournit les formations utiles à une étude hydrogéologique.

1. Introduction

L'analyse de l'environnement géologique est fondamentale à l'étude hydrogéologique. La géologie permet d'identifier les matériaux et les structures des formations susceptibles de conduire l'eau des précipitations en profondeur. Elle permet aussi de déterminer le type d'aquifère.

La région d'étude 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).



Légende:

- | | | | |
|---|------------------------|---|-------------------------------|
|  | Complexe métamorphique |  | Flyschs |
|  | Formation prè - Kabyle |  | Nappe tellienne |
|  | Dorsale Kabyle |  | Formation néritique (Crétacé) |
|  | Quaternaire | | |

Figure 6: Carte géologique et géomorphologique de la plaine d'Annaba.

2. Massif de l'Edough

Le massif de l'Edough (fig.7) constitue le complexe métamorphique le plus oriental du littoral Algérien. Il a fait l'objet de plusieurs études géologiques (*Hilly, 1962; Vila, 1970; Gleizes et al, 1988; Marignac et Zimmermann, 1983; Marignac, 1985; Monié et al, 1992; Hammor, 1992; Aissa et al, 1995; 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; Buillin, 1979; 1986; Cohen, 1980; Maurey et al, 2000; Laouar et al, 2005*).

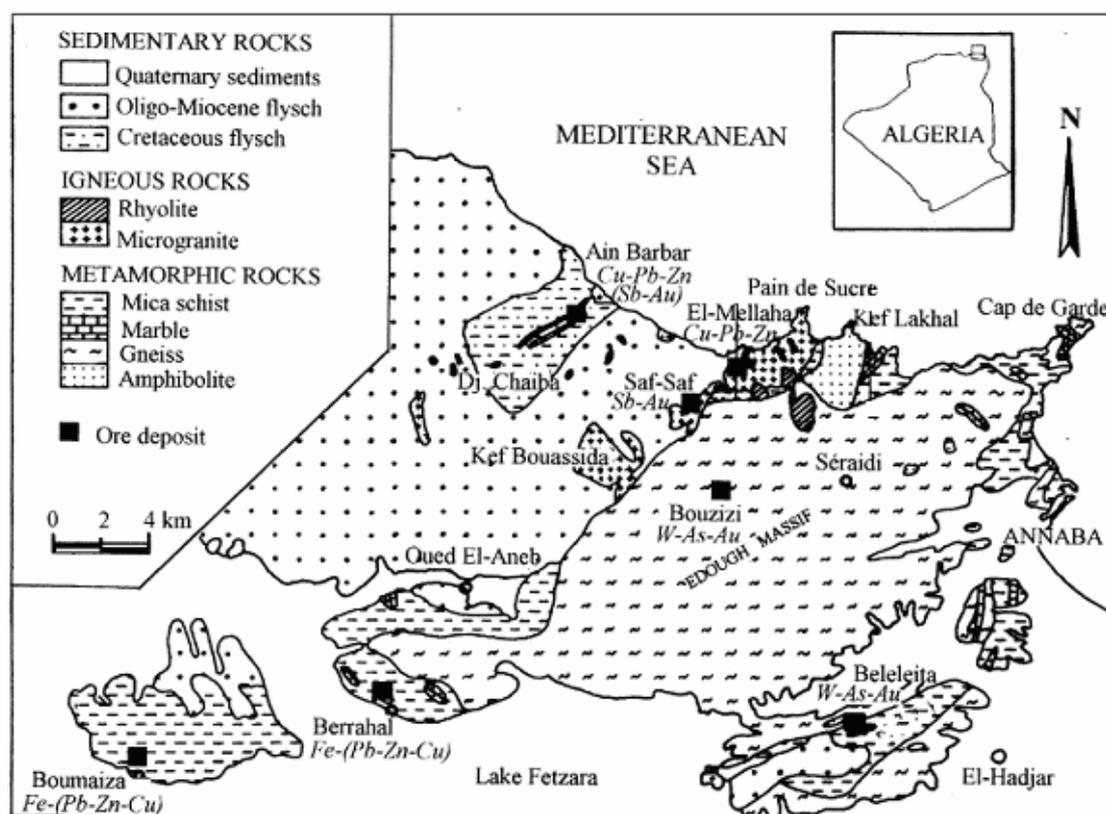


Figure 7: Carte géologique du massif de l'Edough (Laouar & al. 2002).

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 ± 51 Ma. Pour les orthogneiss de base et 606 ± 55 Ma. Pour les leucogranites supérieurs qui sont fortement déformés (*Hammor et Lancelot, 1998*), et donc 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 subi un trajet polycyclique de température et pression durant le métamorphisme ; depuis des conditions de haute température-haute pression (cycle 1) jusqu'à moyennes températures et pression (cycle 2) et finalement basse pression-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. Leurs 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 grande dans la région, actuellement fermée) et El-Mellaha (*Bolfa, 1948 ; Marignac, 1985*) ; les gîtes à W-Sn associés aux skarns de Bouzizi et Beleleita (*Aissa et al, 1995*) ; et les gîtes de Fe-Pb-Zn-Cu associés aux skarns et amphibolites de la région de Boumaiza 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, 1987*). 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 la cœur de l'antiforme sont des roches fortement foliées et plissées et sont composés principalement par une variété ocellée 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 donné les âges de 606 à 595 Ma. Pour les orthogneiss et de 1630 ± 50 Ma. Pour les paragneiss. Les orthogneiss 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 trace et isotopes de Rb-Sr) des orthogneiss (Ahmed-Said et Leake, 1993) indique que se 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 et Leake, 1993) indique que se sont d'anciens sédiments riches en illite avec quelques fragments ignés de composition intermédiaire et qui ont subi 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 d'acritrches (Ilavsky et Snopkova, 1987) précise que cette série est d'âge Paléozoïque (Ordovicien à Dévonien). L'unité épimétamorphique, quand à elle, est représentée par les métapélites de Bleleita, Boumaiza et de 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 supérieur 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 (An_{34}), 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 symmétamorphiques

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

Plissements synschisteux contemporains d'un métamorphisme de type barrovien (disthène-staurotide-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, 1989), 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 brachyantoclinal N50-60°E façonnant la forme actuelle du massif (fig.8).

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) :

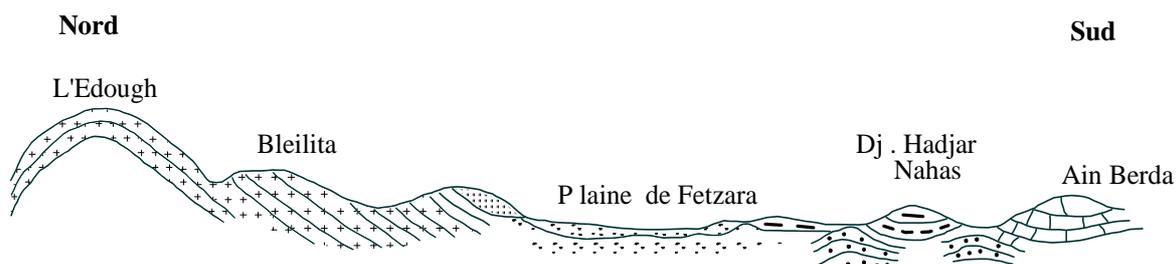
(1) gîtes à Fe-(Pb-Zn-Cu) liés aux marbres et skarns ; exemple : ceux de Berrahal et Boumaiza ; (2) filons à minéralisation polymétallique encaissés dans les flyschs crétacés ; exemple : Ain Barbar, El-Mellaha ; (3) gîtes à W-As-Au liés aux skarns et gneiss ; exemple : Belelieta, Bouzizi ; et (4) filons à Sb-Au situés à travers le complexe métamorphique ; exemple : Koudiat El-Ahrach, Saf-Saf, Ain Barbar.

6. Plaines littorales

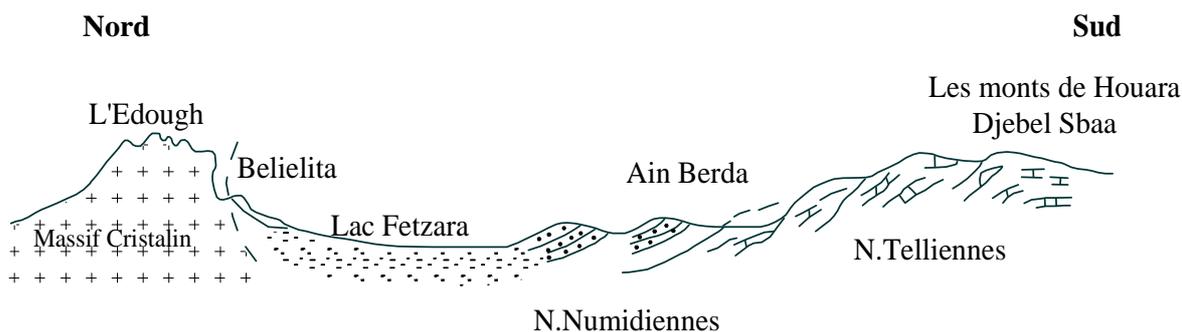
Ces plaines s'étendent de la vallée de la Seybouse jusqu'à la frontière Tunisienne, sur une largeur d'environ 15 km et une longueur de 110 km.

Elles ne constituent pas un ensemble homogène, car on y trouve des dunes sableuses des espaces marécageux, des plaines fertiles et petits reliefs.

De l'Ouest à 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. Les grès numidiens constituent les sommets, dont les plus importants se situent autour du village de Daghoussa.



a- J.M. VILA 1980



b- L. JOLEAUD 1936

Légende :

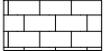
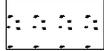
- | | |
|---|--|
|  | Gneiss et Micaschistes |
|  | Grés Numidien |
|  | N. Telliennes (Marnes, Marno Calcaire) |
|  | Quaternaire { <ul style="list-style-type: none"> Graviers-Galets Argiles - Sables Graviers - Sables |

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

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 formations des bordures sont constituées de gneiss, de schistes, de micaschistes, de cipolins, de marnes, de marno calcaires métamorphiques et de formations gréso-argileuses. Elle sont relativement de faible potentialité hydraulique mais constituent des zones d'alimentations pour les nappes (*Zenati, 1999*).

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

ETUDE

PEDOLOGIQUE

Au cours de son infiltration dans le sol et le sous-sol, l'eau se charge en ions et acquiert des propriétés physiques et chimiques qui caractérisent l'eau de la nappe qu'elle forme. Donc la minéralisation des eaux souterraines dépend à la nature des sols traversés et des minéraux rencontrés au cours de leur infiltration et leur vitesse de percolation dans le sous-sol. C'est pourquoi nous avons effectué cette étude pédologique.

1. Introduction

La qualité du sol a été définie comme étant la résultante de ses propriétés physiques, chimiques et biologiques permettant la croissance et le développement des cultures, la régulation et la partition des flux d'eau à travers l'environnement et jouant le rôle de filtre épurateur vis-à-vis des polluants. La qualité du sol traduit sa capacité à retenir et à libérer l'eau et les éléments fertilisants, à maintenir sa biodiversité et à résister aux effets des pratiques pouvant conduire à sa dégradation (*Badraoui, 1998*).

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, 1998*).

Notre 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. Etudes réalisées

Les sols du lac Fetzara ont fait l'objet de plusieurs études de mise en valeur agricole, qui ont toutes révélé toutes des contraintes non négligeables quant à leur utilisation telles que la salinisation et l'hydromorphie (*Durand, 1950 ; Ifagraria, 1967 ; A.J.C.I, 1985 ; B.N.E.D.E.R, 2004 et Djamai, 2007*). Ces études ont permis de classer les sols en quatre classes : les sols peu évolués, les vertisols, les sols hydromorphes et les sols halomorphes.

3. Différentes classes de sols

3.1. 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.9).

3.2. 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.9).

Les vertisols ont de mauvaises propriétés physiques (sols lourds). Ils possèdent une texture très fine et présentent un mauvais drainage.

3.3. 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.9).

Ces sols moyennement profonds, se caractérisent par la présence d'une nappe qui explique alors l'hydromorphie temporaire ou permanente.

3.4. 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. Ce sont des sols salins, caractérisés par la présence de sels solubles, une perméabilité moyenne, une texture lourde et riches en minéraux argileux gonflants.

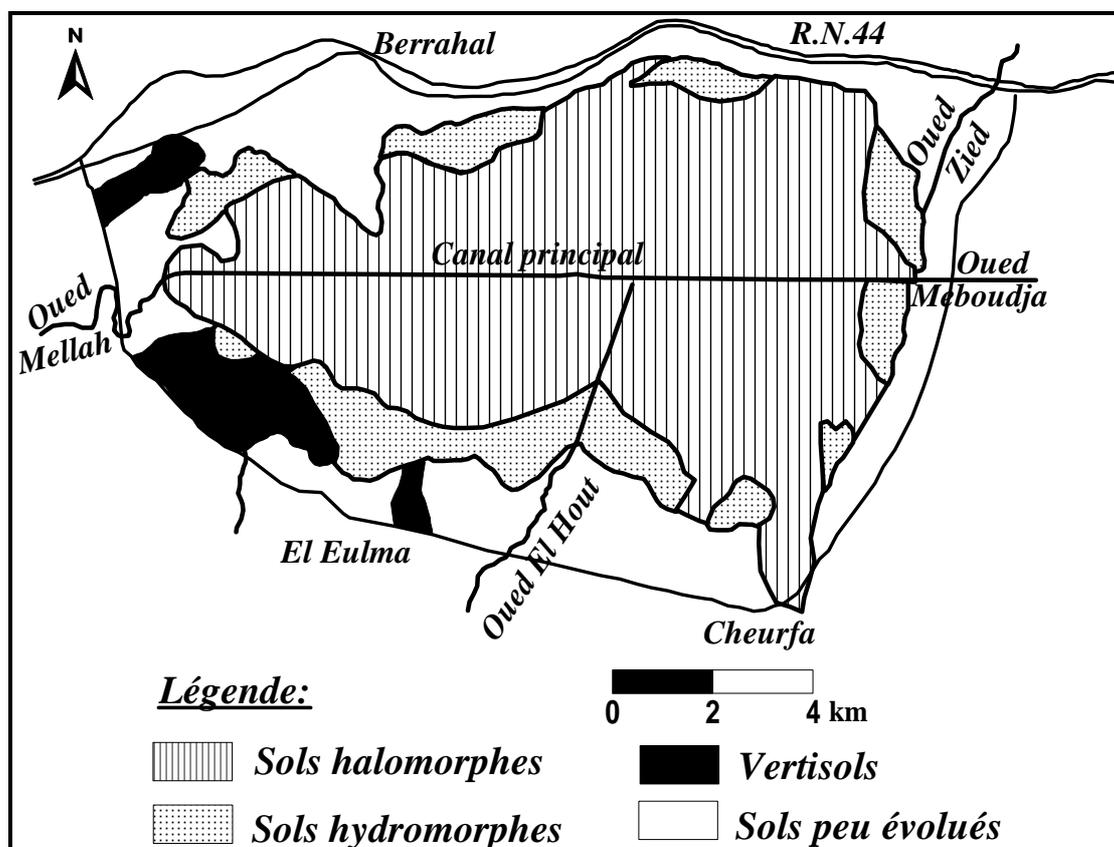


Figure 9 : Répartition des classes des sols du lac Fetzara (A.J.C.I, 1985).

4. Matériels et méthodes

4.1. Echantillonnage des sols

C'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 (0–20 cm et 20–40 cm) car c'est à ce niveau que s'effectuent les échanges ioniques les plus importants.

Les prélèvements ont été effectués au niveau de 8 points aux alentours du lac Fetzara, soit d'un total de 16 échantillons (fig.10).

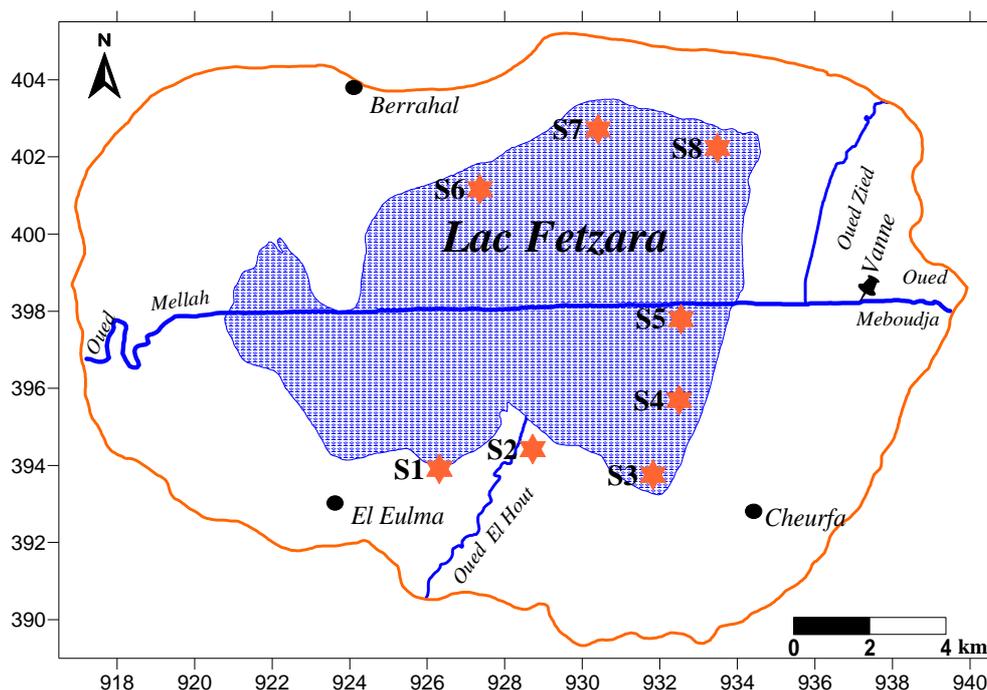


Figure 10 : Carte d'inventaire des points de prélèvement.

4.2. Préparation des échantillons

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.

4.3. Méthodes d'analyses au laboratoire

4.3.1. Bilan de salure

Il a été effectué par la méthode de la pâte saturée qui 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 déterminés dans cette solution sont :

- Le Calcium (Ca^{+2}) et le Magnésium (Mg^{+2}) dosés par complexométrie.
- Les Chlorures (Cl^-) dosés par méthode de Mohr au AgNO_3 .

- Les sulfates (SO_4^{-2}) dosés par gravimétrie au BaCl_2 .
- les bicarbonates (HCO_3^-) et les carbonates (CO_3^{-2}) dosés par l'acide sulfurique (H_2SO_4).
- Le Sodium (Na^+) et le Potassium (K^+) par spectrométrie d'émission à flamme.

4.4. Propriétés physico-chimiques des sols

❖ pH (pHeau et pHKCl)

Les mesures ont été réalisées 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 pHKCl.

❖ La conductivité électrique (CE)

Elle a été mesurée à l'aide d'un conductimètre (EC 215) selon un rapport sol/eau : 1/5. Elle est exprimée en ($\mu\text{s}/\text{cm}$ 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.A, 1978). Pour ce faire, une solution de bichromate de potassium ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) 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.

❖ 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 : $\% \text{ MO} = \% \text{ C} * 1.72$

5. Résultats et discussions

5.1. Les caractéristiques physiques des sols

5.1.1. La densité

5.1.1.1. La densité apparente (D_a)

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 1.09 et 2.31 g/cm^3 avec une moyenne de 1.58 g/cm^3 (tab.1 et fig.11, fig.12).

5.1.1.2. La densité réelle (D_r)

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 2.26 et 2.55 g/cm^3 dans la couche 0-20 cm, et 1.48 à 2.58 g/cm^3 dans la couche 20-40 cm, avec des moyennes successives d'ordre de 2.39 et 2.24 g/cm^3 (tab.1 et fig.11, fig.12).

5.1.2. 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 :

$$P (\%) = (1 - D_a / D_r) * 100$$

D'après les résultats (tab.1 et fig.5) la porosité totale des sols varie entre 19.61 % et 46.31 % avec une moyenne de 33.77 % pour la couche supérieure (0-20 cm), par contre, elle varie entre 10.47 % et 56.05 % avec une moyenne d'ordre de 33.65 % pour la couche inférieure (20-40 cm). Si l'on se réfère à l'échelle proposée par *Katchinski*, la porosité totale des sols varie entre les classes faibles et insatisfaisantes.

Tableau 1: La densité apparente, la densité réelle et la porosité des sols.

Couches	Paramètres	Max	Min	Moy
0 - 20 cm	Densité apparente (g/cm ³)	2.05	1.31	1.58
	Densité réelle (g/cm ³)	2.55	2.26	2.39
	Porosité (%)	46.31	19.61	33.77
20 - 40 cm	Densité apparente (g/cm ³)	2.31	1.09	1.57
	Densité réelle (g/cm ³)	2.58	1.48	2.24
	Porosité (%)	56.05	10.47	33.65

5.1.3. 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, elles ont une faible infiltration de l'eau car, ils ont une 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 de l'E.S.P. (Pourcentage de Sodium Exchangeable) (*Mc Neal, 1968 ; Halitim et al ; Daoud et Rwanika, 1991, in Djamaï, 1993*). Les sols du lac Fetzara ont un coefficient de perméabilité le plus souvent inférieur à 2 cm/h (*Zenati, 1999 ; Habes, 2006*). En comparant avec l'échelle de la perméabilité (*Duchaufour, 1970*), on constate que les sols du lac Fetzara sont moyennement perméables, avec un coefficient de perméabilité entre 1 à 18 cm/h.

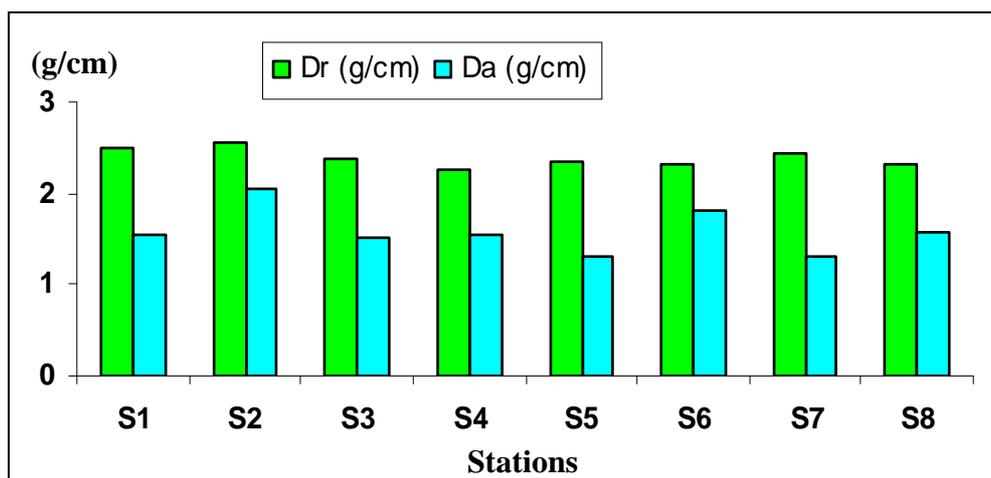


Figure 11 : Variations des densités réelles et apparentes au niveau de la couche supérieure (0-20cm).

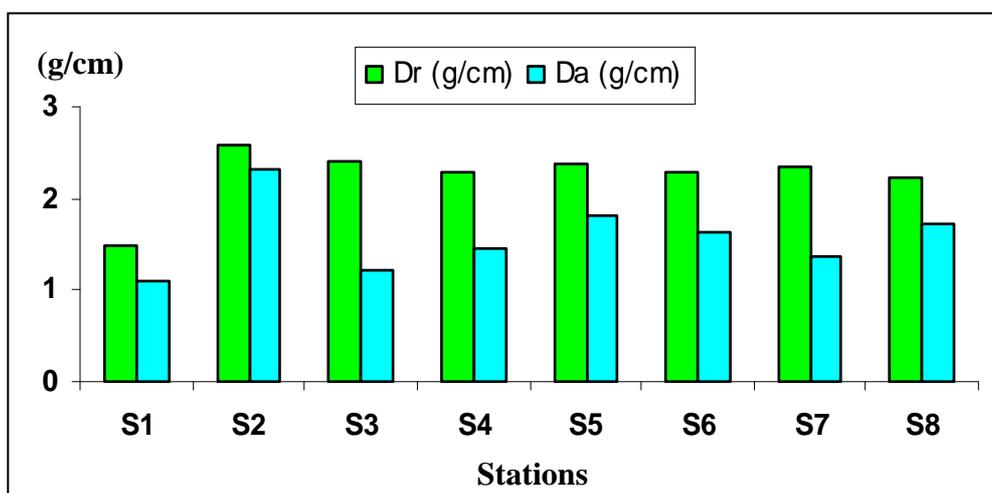


Figure 12 : Variations des densités réelles et apparentes au niveau de la couche inférieure (20-40cm)

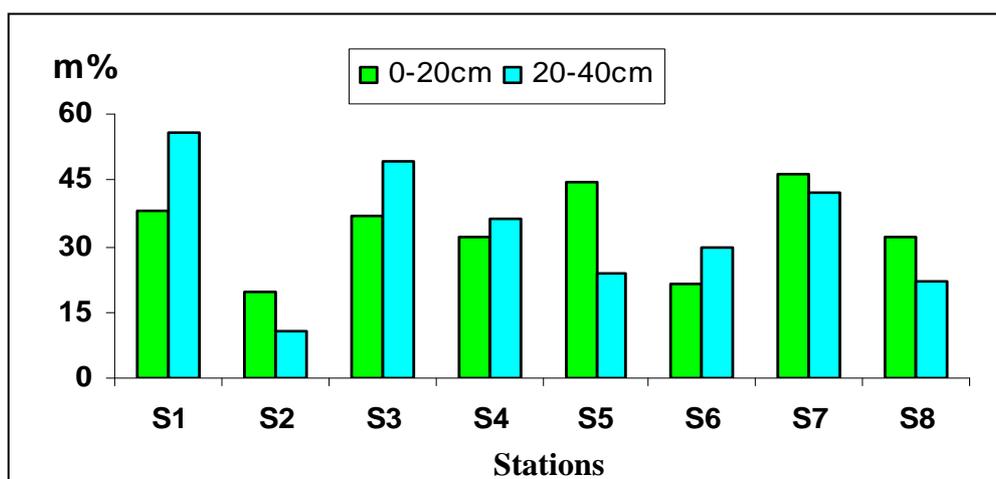


Figure 13: Variations de la porosité des sols au niveau des couches (0-20cm) et (20-40cm).

5.2. Les caractéristiques physico-chimiques des sols

5.2.1. 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 les premiers prédominent sur les secondes et elle est alcaline ou calcaire dans le cas contraire. La réaction est dite neutre lorsqu'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 acides 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 :

Tableau 2 : Variation des pH des sols.

Couches	pH	Max	Min	Moy
0 - 20 cm	pH eau	7.86	5.65	7.24
	pH KCl	7.57	4.79	6.7
	pHeau-pHKCl	0.94	0.29	0.61
20 - 40 cm	pH eau	7.93	5.67	7.32
	pH KCl	7.61	4.83	6.69
	pHeau-pHKCl	1	0.28	0.64

-Le **pH (eau)** : les valeurs du pHeau varient entre 5.65 et 7.86 pour la couche 0 -20 cm avec une moyenne de 7.24, par contre, elles oscillent entre 5.67 et 7.93 avec une moyenne de 7.32 pour la couche inférieure (20-40 cm) (fig.14). 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.

- **Le pH (KCl)** : les valeurs maximales du pHKCl sont d'ordre de 7.57 et 7.61, par contre les valeurs minimales restent inférieures à 5, successivement pour la couche de 0-20 cm et celle de 20-40 cm, avec une moyenne d'ordre de 6.7 (fig.15).

Le pHKCl est en effet toujours inférieur au pHeau et l'écart entre les deux dosages traduit indirectement l'état biologique du sol.

- Un écart faible, de 0,2 à 0,4, traduit un sol lourd où la faiblesse de l'activité microbienne.
- Un écart de 0,4 à 0,6 indique une activité microbienne normale.

- Un écart de 0,6 à 0,8 enfin est la preuve d'une excellente structure, propice à la transformation rapide des matières organiques.

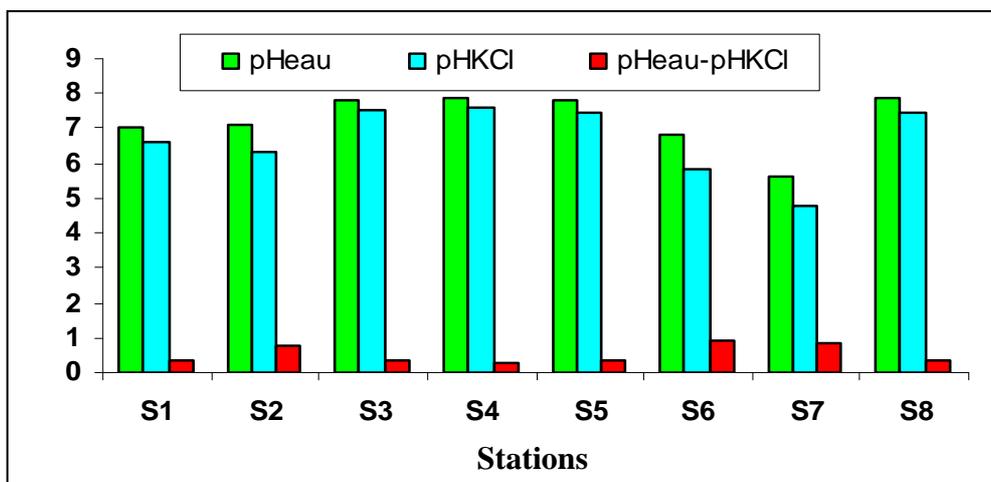


Figure 14 : Variation du pH au niveau de la couche (0 - 20 cm).

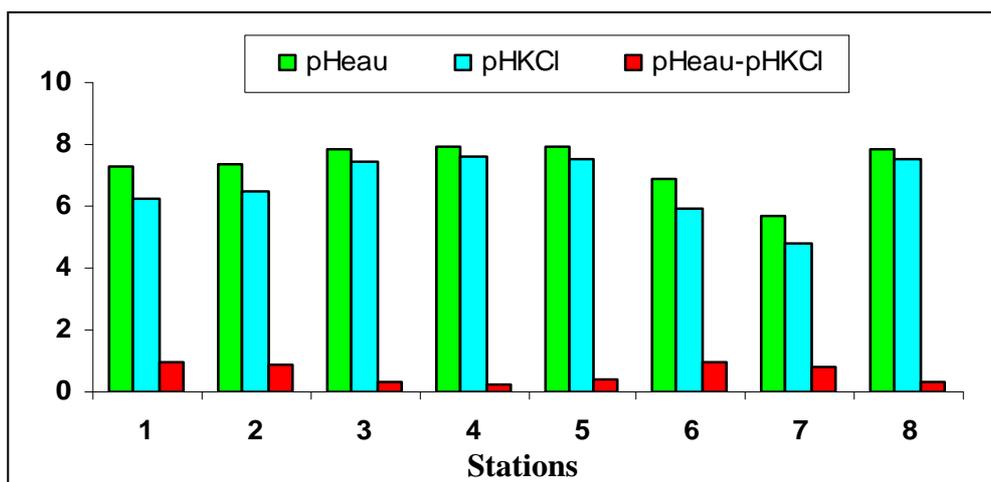


Figure 15: Variation du pH au niveau de la couche (20 - 40 cm).

5.2.2. 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.

Les résultats d'analyses montrent que les teneurs en carbone varient entre 0.15 % et 4.46 %, avec une légère diminution de la surface vers la profondeur, où les moyennes sont d'ordre de 1.46 % et 0.94 % successivement pour les deux couches (0-20 cm et 20-40 cm) (tab.3 et fig.16).

5.2.3. La matière organique (% MO)

La matière organique contenue dans le sol est formée essentiellement par de débris de végétaux se présentant à tous les stades de décomposition jusqu'à celui de matière noire intimement incorporée au sol qui constitue l'humus proprement dit. La teneur en matière organique dans les sols étudiés varie entre 0.26 et 7.67 % avec une moyenne de 2.51 % pour la couche de 0 -20 cm, et entre 0.26 et 3.7 % avec une moyenne d'ordre de 1.61% pour la couche de 20-40 cm (tab.3 et fig.17), ce qui indique une variation très large de la matière organique.

Tableau 3: Le carbone (% C) et la matière organique (% MO) des sols.

Couches		Max	Min	Moy
0 - 20 cm	% C	4.46	0.15	1.46
	% MO	7.67	0.26	2.51
20 - 40 cm	% C	2.15	0.15	0.94
	% MO	3.7	0.26	1.61

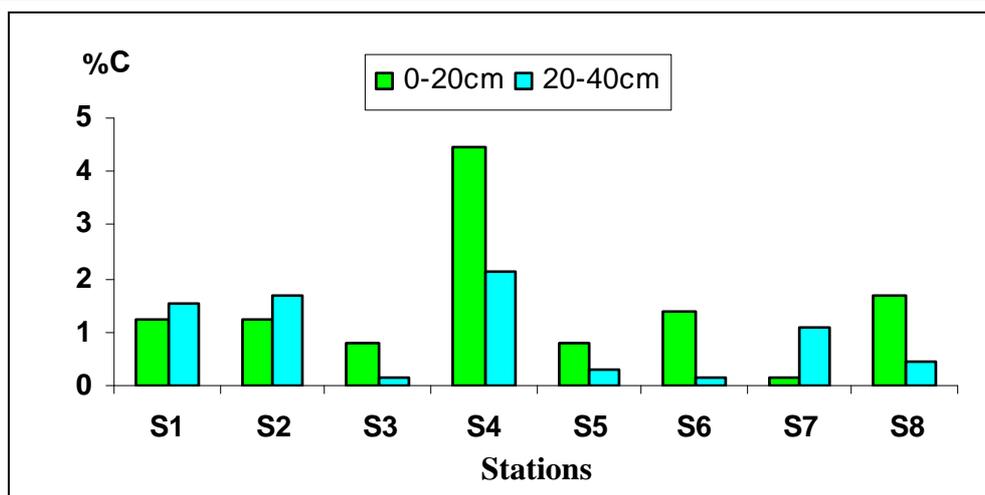


Figure 16: Evolution du carbone organique dans les couches (0-20cm) et (20-40cm).

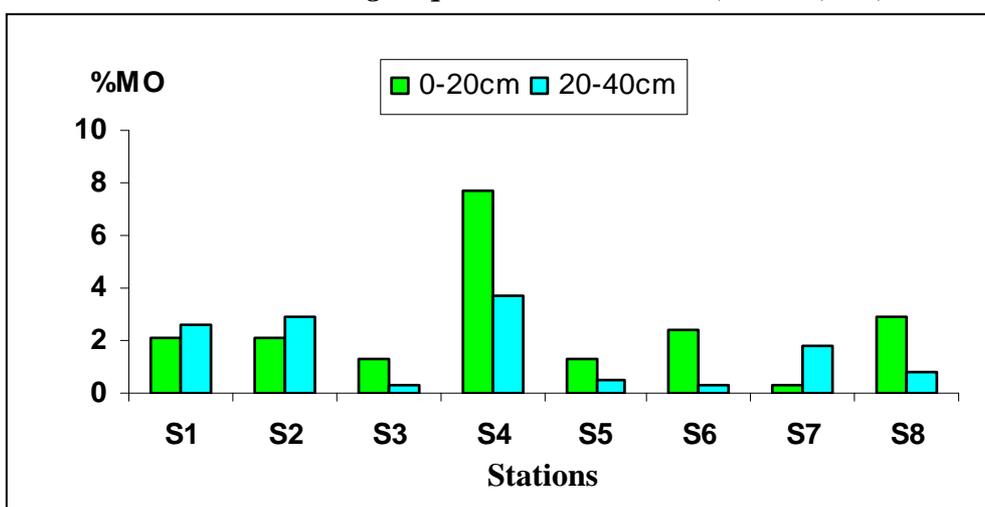


Figure17 : Evolution de la matière organique dans les couches (0-20cm) et (20-40cm).

5.2.4. 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 ; in Djamai, 1993).

5.2.4.1. La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique est importante à connaître, car elle nous donne une idée sur la salinité d'un sol. La conductivité électrique de la solution de sol du lac Fetzara varie entre 109 et 4690 $\mu\text{s}/\text{cm}$ avec une moyenne de 1534 $\mu\text{s}/\text{cm}$ pour la couche 0-20 cm, et de 76 à 7830 $\mu\text{s}/\text{cm}$ avec une moyenne de 2577 $\mu\text{s}/\text{cm}$ pour la couche 20-40 cm, ce qui indique une variation très importante entre les deux couches avec une concentration en sels solubles plus forte en profondeur (tab.4 et fig.18).

Tableau 4: Variation de la conductivité électrique des sols ($\mu\text{s}/\text{cm}$).

Couches	CE max	CE min	CE moy
0 - 20cm	4690	109	1534
20 - 40cm	7830	76	2577

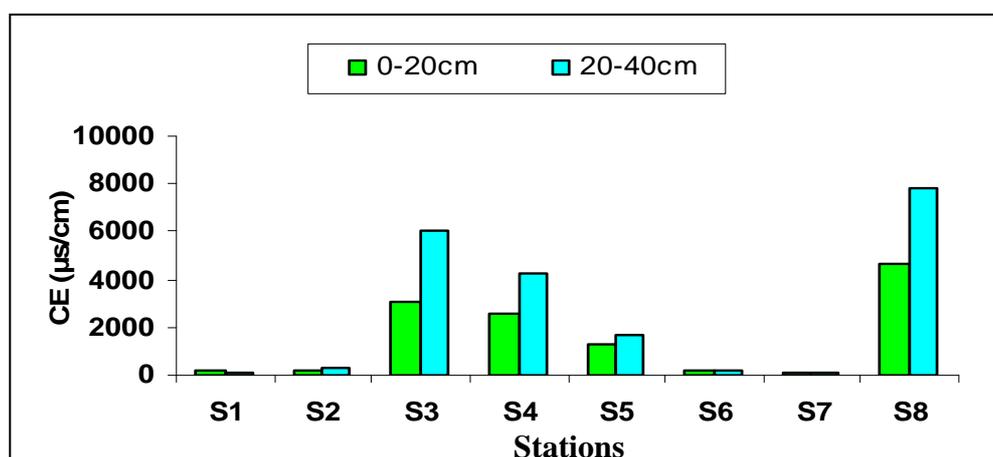


Figure 18 : Variation de la conductivité électrique (CE en $\mu\text{s}/\text{cm}$).

5.2.4.2. 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, en sodium ou les deux à la fois. Les sels solubles concernés sont essentiellement ; Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ , Na^+ , Cl^- , SO_4^{-2} et HCO_3^- (tab.5).

Tableau 5: Résultats des analyses chimiques des solutions de sols du lac Fetzara.

Couches	Sels solubles (meq/l)	Max	Min	Moy
0 - 20cm	Ca^{+2}	25.6	5.6	15.3
	Mg^{+2}	34.4	1.6	16.5
	Na^+	20.83	2.1	12.73
	K^+	0.39	0.02	0.18
	Cl^-	104	40	70.5
	SO_4^{-2}	5.44	1.08	3.11
	HCO_3^-	4.7	1.5	3.4
20 - 40cm	Ca^{+2}	30.4	3.2	16
	Mg^{+2}	66.4	1.6	26.6
	Na^+	36	1.51	17.79
	K^+	0.39	0.03	0.17
	Cl^-	208	28	100
	SO_4^{-2}	6.26	0.96	3.19
	HCO_3^-	6.3	1.5	2.97

a- La concentration des cations

La concentration en ions Magnésium (Mg^{+2}) est la plus élevée par rapport aux autres cations, avec une concentration moyenne d'ordre de 16.5 et 26.6 meq/l respectivement pour la couche supérieure (0-20 cm) et la couche inférieure (20-40 cm) (fig.19, fig.20).

Les teneurs les plus élevées sont enregistrées au Nord (S8) et au Sud-est du lac (S3 et S4).

Les ions Calcium (Ca^{+2}) et Sodium (Na^+) sont en quantités pratiquement équivalentes avec des moyennes respectivement de 15.3 et 12.73 meq/l au niveau de la couche supérieure (0-20 cm) et de 16 et 17.79 meq/l au niveau de la couche inférieure (20-40 cm). Les teneurs maximales pour ces deux ions sont enregistrées au niveau des mêmes points S3, S4 et S8.

L'ion Potassium (K^+) se trouve en quantités presque négligeables (inférieures à 1meq/l) par rapport aux autres cations avec des moyennes de 0.18 et 0.23 meq/l respectivement pour la couche supérieure et la couche inférieure.

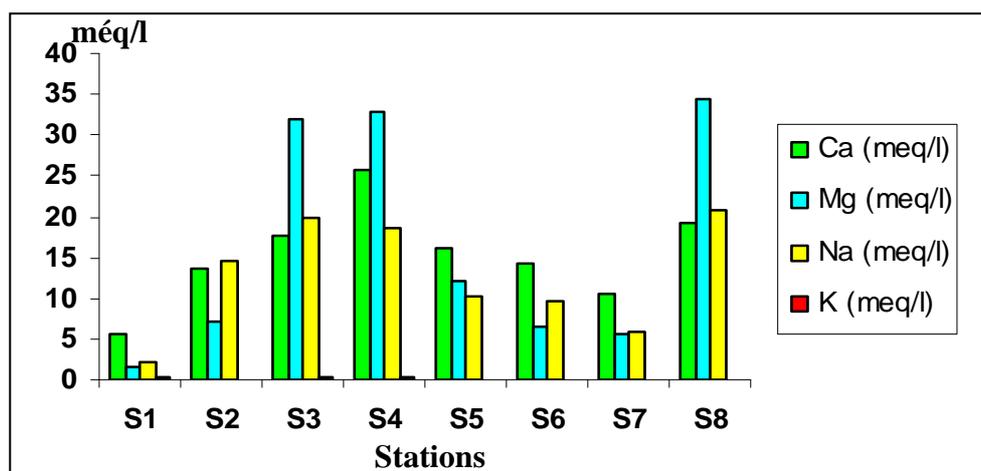


Figure 19: Evolution de la concentration des cations au niveau de la couche supérieure (0-20cm).

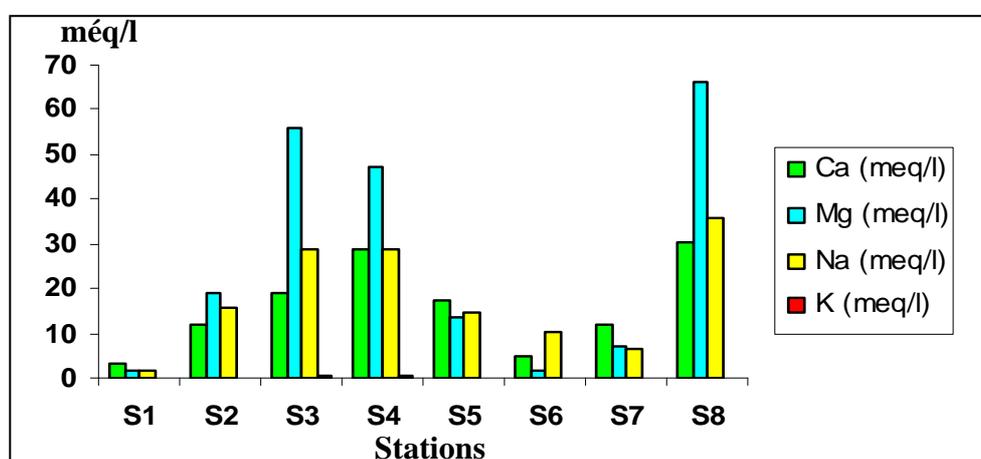


Figure 20: Evolution de la concentration des cations au niveau de la couche inférieure (20-40cm).

b- La concentration des anions

Les chlorures (Cl^-) représentent l'élément le plus important par rapport aux autres anions, avec des concentrations moyennes d'ordre de 70.5 et 100 meq/l respectivement pour les deux couches (0-20 cm et 20-40 cm) (fig.21, fig.22).

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées en S3 et S4 dans la partie Sud du lac (au Nord de Cheurfa), et en S8 au Nord du lac avec un maximum de 208 meq/l.

Les ions sulfates (SO_4^{-2}) et bicarbonates (HCO_3^-) sont en quantités pratiquement équivalentes.

Les sulfates (SO_4^{-2}) présentent des concentrations moyennes d'ordre de 3.11 et 3.19 meq/l, la valeur la plus élevée est enregistrée en S8 avec 6.26 meq/l.

Les concentrations en bicarbonates (HCO_3^-) varient entre 1.5 et 6.3 meq/l avec des moyennes d'ordre de 3.4 et 2.97 meq/l respectivement pour la couche supérieure (0-20 cm) et la couche inférieure (20-40cm).

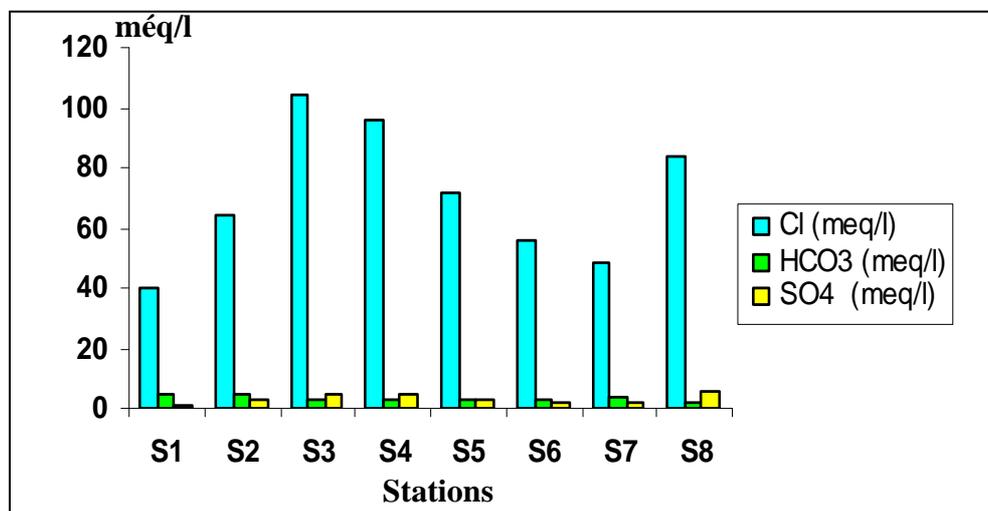


Figure 21 : Evolution de la concentration des anions au niveau de la couche supérieure (0-20 cm).

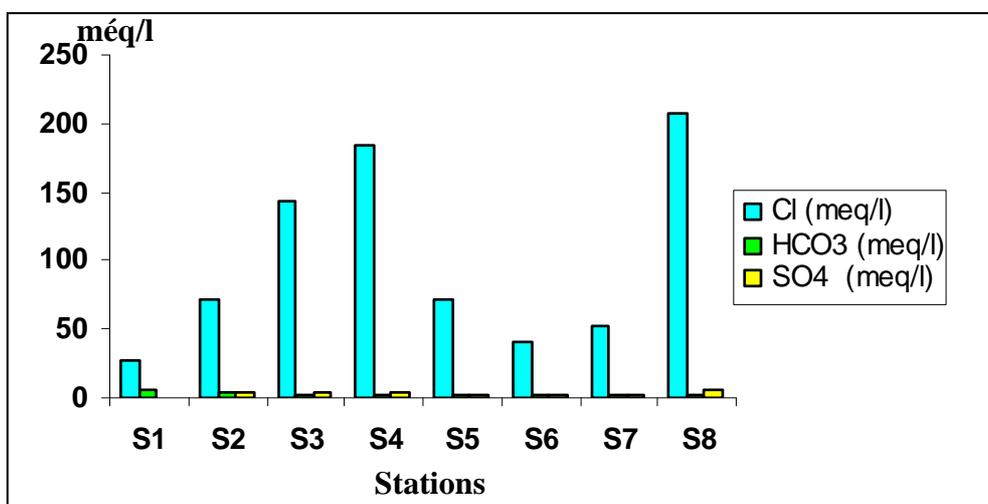


Figure 22: Evolution de la concentration des anions au niveau de la couche inférieure (20-40 cm).

6. Etude statistique des données chimiques des solutions de sols

6.1. Analyses en composantes principales (A.C.P)

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 les quels sont mesurées des «variables quantitatives» (Eléments 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 9 variables (CE, pH, Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{-2}) et à 16 échantillons (individus). L'interprétation de l'analyse se fera selon l'ordre des informations par le logiciel (SPAD).

6.2. Matrice des corrélations

La matrice montre qu'il existe des corrélations positives et négatives très significatives entre les éléments physicochimiques (tab.6). Le coefficient de corrélation accepté d'après Mangin est de 0.8 (Annexe 6), ce qui nous permet de dégager les associations suivantes :

CE – Ca ; $r = 0.80$	Ca – Mg ; $r = 0.86$	Mg – Cl ; $r = 0.95$
CE – Mg ; $r = 0.97$	Ca – Na ; $r = 0.84$	Mg – SO_4 ; $r = 0.85$
CE – Na ; $r = 0.91$	Ca – Cl ; $r = 0.89$	Na – Cl ; $r = 0.93$
CE – Cl ; $r = 0.90$	Ca – SO_4 ; $r = 0.82$	Na – SO_4 ; $r = 0.88$
CE – SO_4 ; $r = 0.82$	Mg – Na ; $r = 0.95$	Cl – SO_4 ; $r = 0.78$

Tableau 6: Matrice des corrélations des paramètres physicochimiques.

	CE	pHeau	Ca^{+2}	Mg^{+2}	Na^+	K^+	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{-2}
CE	1,00								
pHeau	0,62	1,00							
Ca^{+2}	0,80	0,57	1,00						
Mg^{+2}	0,97	0,61	0,86	1,00					
Na^+	0,91	0,63	0,84	0,95	1,00				
K^+	0,53	0,55	0,49	0,59	0,54	1,00			
HCO_3^-	-0,60	-0,19	-0,57	-0,53	-0,55	-0,02	1,00		
Cl^-	0,90	0,56	0,89	0,95	0,93	0,59	-0,51	1,00	
SO_4^{-2}	0,82	0,65	0,82	0,85	0,88	0,40	-0,51	0,78	1,00

6.3. Etude des variables et des individus

L'observation du cercle de corrélation formé par les deux axes F1 et F2, nous montre que le facteur F1 exprime 72.40 % de la variance (fig.23).

Dans cet axe, les sels solubles (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{-2} et CE) sont opposés à HCO_3^- qui représente l'alcalinité carbonatée. C'est un axe qui traduit probablement à la fois des phénomènes de salinisation affectant certains types de sols et d'alcalinisation se développant sur d'autres.

Le second axe F2, qui exprime 12.29 % de la variance, oppose les sels solubles à l'alcalinité, au pH et K^+ . Il pourrait traduire des processus de salinisation et d'alcalinisation. Mais également des phénomènes de fixation du K^+ par certains minéraux argileux ne sont pas à écarter.

La répartition des individus nous permet de visualiser trois groupes d'associations (fig.24).

Le groupe **G1** (S3, S4, S8, S11, S12 et S16) qui se caractérise par des solutions minéralisées, ce dernier s'oppose au groupe **G2** (S6, S7, S14 et S15) qui représente des solutions moins minéralisées.

Le troisième groupe **G3** (S1, S2, S9 et S10) englobe les solutions chargées en bicarbonates.

7. Influence des sels sur les propriétés physiques des sols

Les propriétés physiques des sols affectés par les sels solubles se traduisent par des modifications notables. La structure des sols du lac Fetzara est du type prismatique à tendance colonnaire, ces caractéristiques sont celles des sols affectés par la salinité.

Le Na^+ est l'élément responsable de la détérioration de la structure et ceci même en faibles quantités, 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 Na^+ 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 ; in Djamai. 1993*).

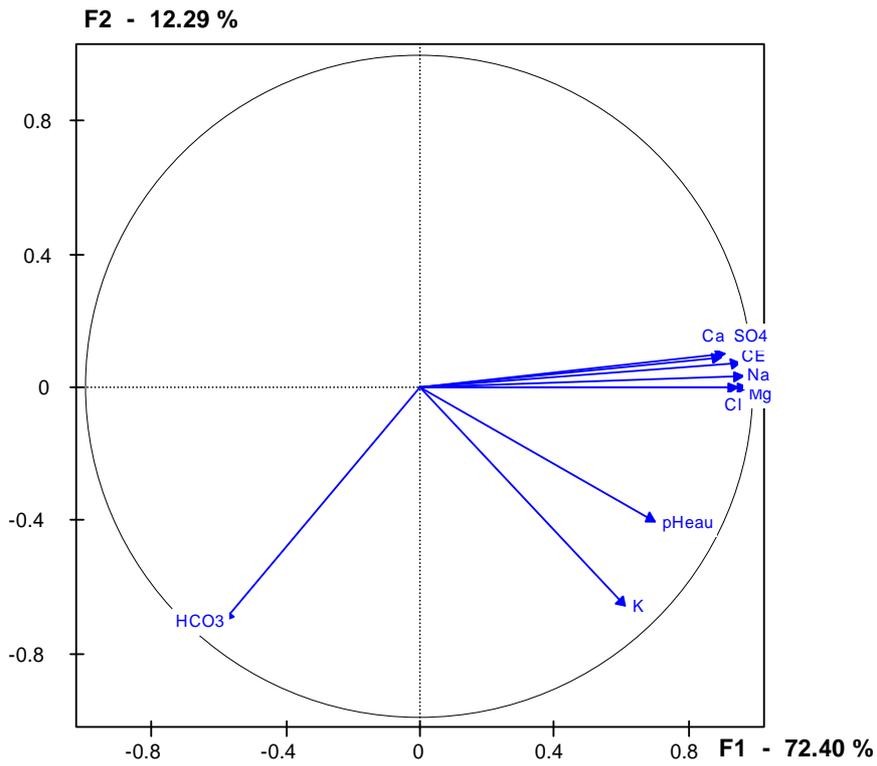


Figure 23: Cercle de corrélation selon le plan F1F2.

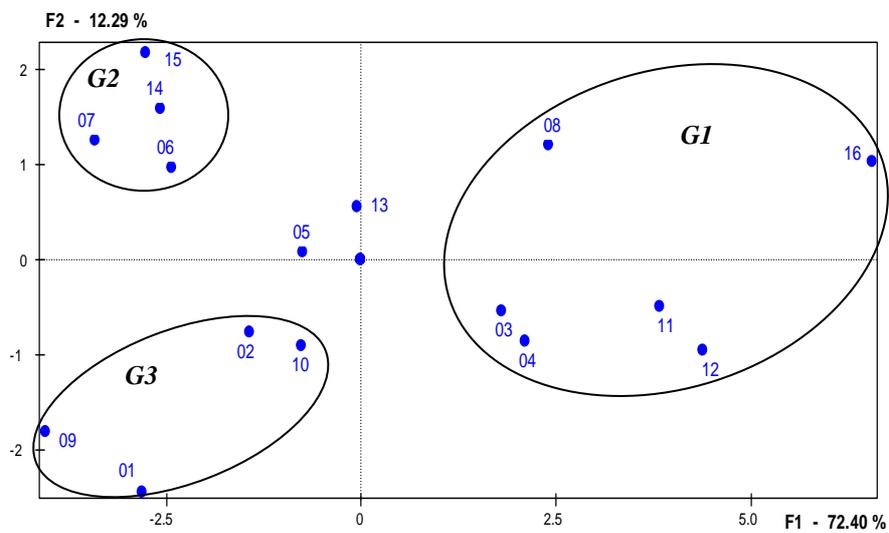


Figure 24: Répartition des individus selon le plan F1F2.

8. 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 l'inondation d'hiver et l'exondation estivale.

8.1. L'effet de l'eau salée sur les caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques les plus couramment étudiées sont la granulométrie, la porosité, la stabilité structurale et la perméabilité.... 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 horizons supérieurs 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,
- Une ralentissement du drainage interne (principalement dans les sols hydromorphes formés sur nappe peu profonde).

8.2. L'effet de l'eau salée sur les caractéristiques chimiques et physico-chimiques

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 leur 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 au lessivage de ces derniers au niveau des couches de surface.

9. Conclusion

Les études pédologiques de la région du lac Fetzara ont permis de ressortir quatre classes de sols à savoir : les sols peu évolués, les vertisols, les sols hydromorphes et les sols halomorphes.

Les résultats analytiques révèlent que les sols de notre zone d'étude sont caractérisés par une porosité moyenne d'ordre de 33 %, un pH faiblement acide à alcalin (5.65 à 7.93), et une teneur en matière organique très variable (0.26 à 7.67 %).

La conductivité électrique des sols de la région du lac Fetzara est caractérisée par une variation très large (0.073 à 7.83 ms/cm), la salinité des sols a atteint son maximum dans les parties Nord-est et au Sud-est du lac (Commune de Cheurfa). Les concentrations des sels solubles varient dans le même sens que la conductivité électrique avec une dominance du faciès chimique chloruré-sodique.

Chapitre IV

CARACTERISTIQUES

HYDROCLIMATOLOGIQUES

Le climat par le biais de ses changements constitue la préoccupation actuelle des chercheurs à l'échelle mondiale. Beaucoup d'approches ont été tentées mais les résultats obtenus sont toujours au stade hypothétique, ce qui laisse planer le doute quand à une solution radicale de ce phénomène. Les changements climatiques qui affectent le globe tendent vers une redistribution des éléments du climat.

1. Introduction

Le travail réalisé porte sur la région du lac Fetzara caractérisée par l'absence de station au niveau du lac. Pour mener notre travail 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.

La détermination des caractéristiques hydroclimatologiques est nécessaire pour l'évaluation et la compréhension des mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux superficielles et souterraines. Elle permet également d'approcher les termes du bilan hydrique, qui sont les précipitations, la température et l'évapotranspiration.

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

Tableau 7: Coordonnées géographiques des stations de mesure.

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

Source : ANRH

3. Etude des facteurs climatiques

3.1. Précipitations

3.1.1. Précipitations moyennes mensuelles

Les moyennes mensuelles des précipitations pour les quatre stations sont résumées dans le tableau suivant ;

Tableau 8: Précipitations moyennes mensuelles (mm) aux stations des Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975-2006) et Berrahal (1981-2006).

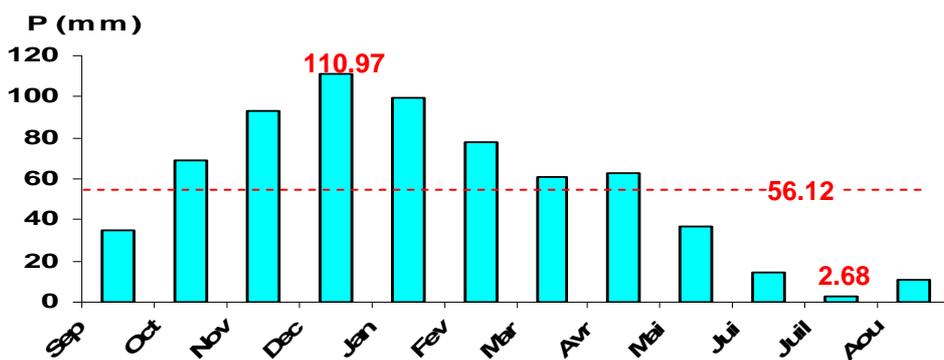
Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou
Les Salines	34.47	69.33	93.58	110.97	99.32	77.84	61.13	62.47	37.05	14.09	2.68	10.51
Pont Bouchet	37.05	53.96	95.70	107.94	89.76	68.27	56.54	57.82	34.96	11.32.	3.6	8.30
Ain Berda	36.59	49.83	88.64	96.05	96.28	69.8	61.95	61.44	43.24	12..2	3.43	8
Berrahal	30.1	58	94.5	133.9	111.4	80.7	58.2	60.3	38.8	12	3.5	6.3

Le tableau ci-dessus (tab.8) donne un aperçu sur la répartition des précipitations moyennes mensuelles au niveau des quatre stations (Les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal) le long des périodes considérées.

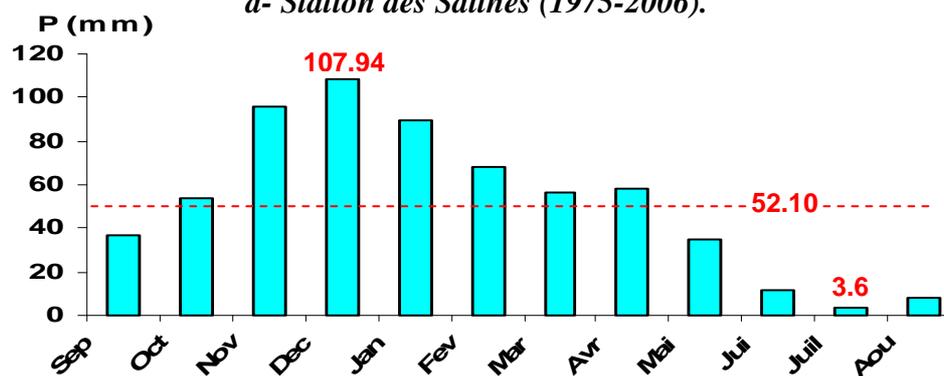
On remarque que les mois les plus pluvieux sont novembre, décembre, janvier, février, mars et avril. Par contre, les mois de juin, juillet et août sont les moins pluvieux.

Les histogrammes des précipitations moyennes mensuelles montrent la variation des précipitations d'un mois à un autre (fig.25).

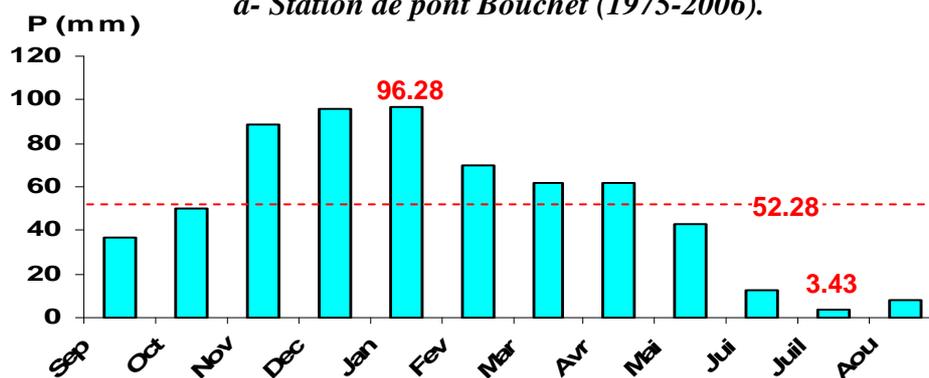
Le maximum des précipitations est enregistré au mois de Décembre pour les quatre stations ; les Salines (110.97 mm), Pont Bouchet (107.94 mm), Ain Berda (96.28 mm) et Berrahal (133.9 mm). Par contre le minimum est enregistré au mois de Juillet avec des valeurs de 2.68 mm, 3.6 mm, 3.43 mm et 3.5 mm respectivement aux stations des Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal.



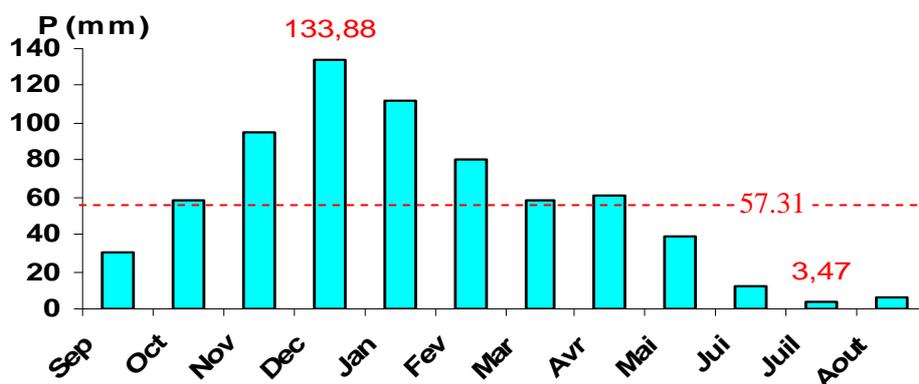
a- Station des Salines (1975-2006).



a- Station de pont Bouchet (1975-2006).



a- Station de Ain Berda (1975-2006).



d- Station de Berrahal (1981-2006).

Figure 25 : (a, b, c, d): Précipitations moyennes mensuelles (mm) aux stations : des Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975 -2006) et Berrahal (1981-2006).

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 défini par le rapport de la pluviométrie P d'une année à la pluviométrie moyenne \bar{p} d'une période d'observation. $H = P / \bar{p}$

Avec : H : Coefficient pluviométrique,

P : Pluviométrie d'une année (mm).

\bar{p} : Pluviométrie moyenne (mm).

Les hauteurs moyennes annuelles des précipitations (\bar{p}) enregistrées durant la période d'observation sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 9: Hauteurs moyennes annuelles des précipitations (\bar{p} en mm).

Stations	Salines	Pont Bouchet	Ain Berda	Berrahal
Précipitations moyennes annuelles (mm)	673.46	625.22	627.45	687.77

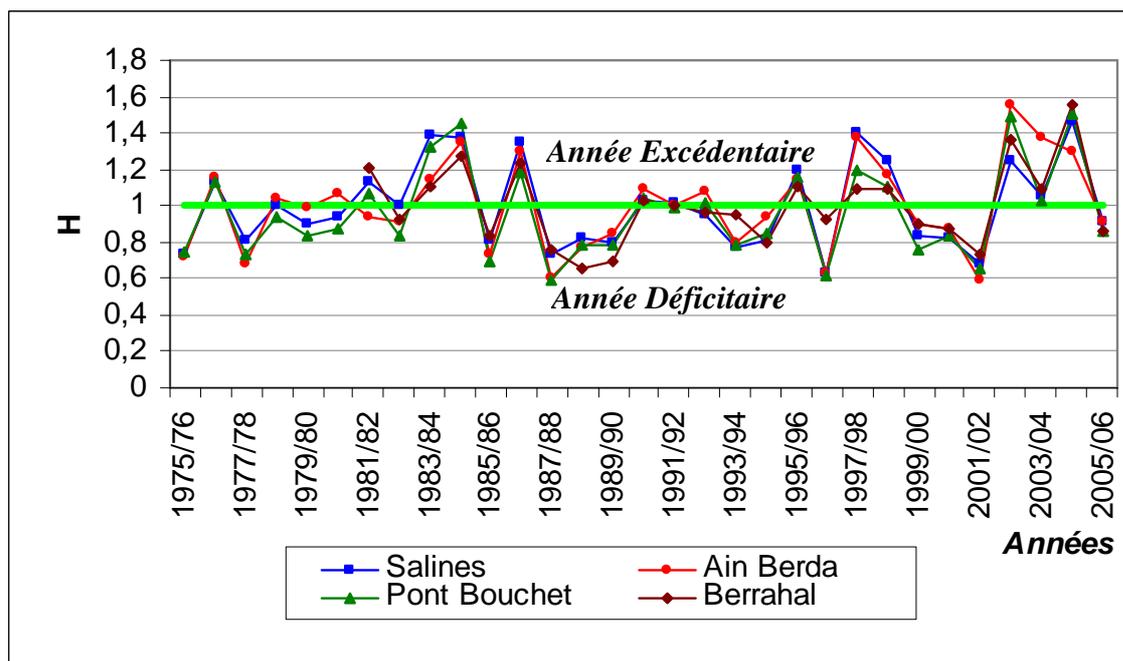


Figure 26: Les variations des coefficients pluviométriques pour les stations ; les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975/2006) et Berrahal (1981-2006).

L'analyse des courbes des variations du coefficient pluviométrique (fig.2) 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, 85/86, 86/87, 95/96, 97/98, 98/99, 2002/03, 2003/04 et 2004/05, 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 850 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 :

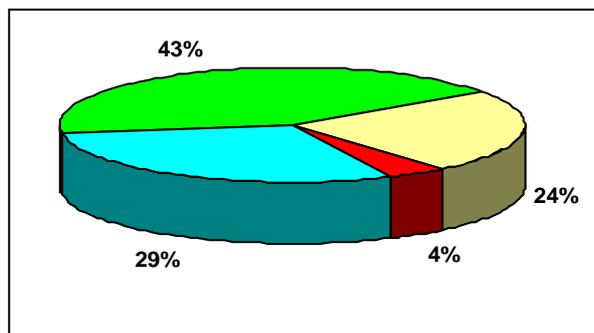
- L'automne (septembre, octobre, novembre)
- L'hiver (décembre, janvier, février).
- Le printemps : mars, avril, mai).
- L'été (Juin, juillet, août).

Tableau 10: Répartition saisonnières des précipitations aux stations des Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975-2006) et Berrahal (1981-2006).

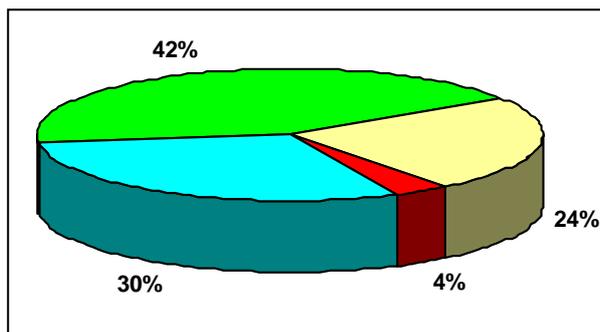
Stations	Les salines		Pont Bouchet		Ain Berda		Berrahal	
	P (mm)	P %	P (mm)	P %	P (mm)	P %	P (mm)	P %
Automne (A)	197.4	29.31	186.71	29.86	175.06	27.90	182.6	26.55
Hiver (H)	288.13	42.78	265.97	42.54	262.13	41.78	326	47.4
Printemps (P)	160.65	23.85	149.32	23.88	166.63	26.56	157.3	22.87
Été (E)	27.28	4.05	23.22	3.71	23.63	3.77	21.8	3.16
Indices saisonniers	HAPE		HAPE		HAPE		HAPE	
Type de Climat	Hivernal		Hivernal		Hivernal		Hivernal	

L'examen des résultats du tableau ci-dessus montre que la saison hivernale est la plus pluvieuse pour les quatre stations. Au total, il tombe 288.13 mm, 265.97 mm, 262.13 mm et 326 mm soit 42.78 %, 42.54 %, 41.78 % et 47.4 % des pluies annuelles, respectivement pour les stations : Les Salines, pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal (tab.10, fig. 27).

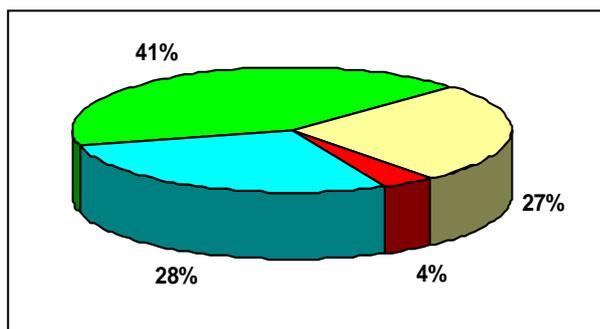
En printemps, le total des précipitations est de l'ordre de 160.65 mm soit 23.85 % au station des Salines, 149.32 mm soit 23.88 % à Pont Bouchet, 166.63 mm soit 26.56 % au station de Ain Berda et 157.3 mm soit 22.87 % à Berrahal.



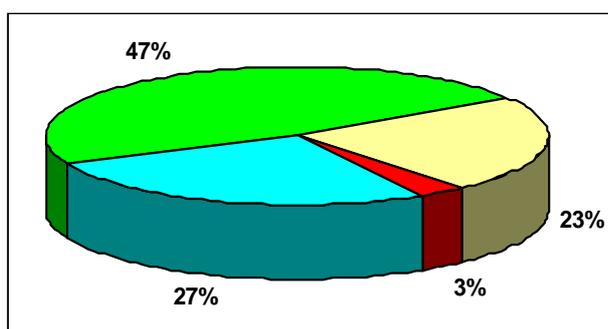
a – Station des Salines



b – Station de Pont Bouchet



c – Station de Ain Berda



d – Station de Berrahal



Figure 27:(a,b,c,d) : Répartition saisonnières des précipitations (%) aux stations des Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975-2006) et Berrahal (1981-2006).

La saison estivale et automnale sont les plus sèche, la pluviométrie enregistrée est la plus faible de l'ordre de 33.36 %, 33.57 %, 31.67 % et 293.71 % de la totalité des pluies, respectivement pour la station des Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et celle de Berrahal.

3.2. La Température

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

Tableau 11: Températures moyennes mensuelles (°C) à la station des Salines (1975-2006).

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
Les salines	22.97	19.65	15.42	13.01	11.57	11.80	13.21	15.14	18.15	21.81	25.16	25.55

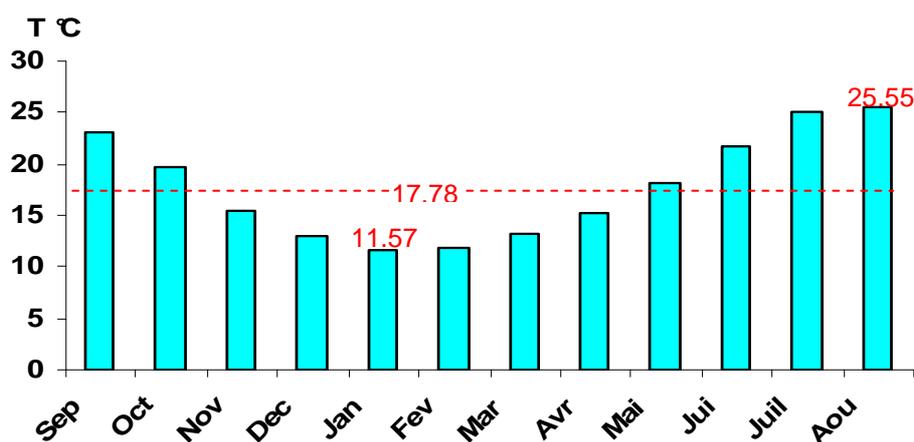


Figure 28: Températures moyennes mensuelles (°C) à la station des Salines (1975 – 2006).

D'après l'histogramme des températures moyennes mensuelles (fig.28), le mois de Janvier est le mois le plus froid (11.5°C), alors que le mois d'Août est le plus chaud (25.5 °C).

3.3. L'humidité

Nous disposons des valeurs mensuelles et annuelles de l'humidité relative au station des Salines avec une moyenne annuelle de l'ordre de 74.66 % sur une période d'observation de 31 ans (1975-2006) (tab.12).

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 12: Humidité relative moyenne mensuelle (H %) à la station des 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 déterminant des régimes pluvieux, de l'évaporation et par conséquent du climat.

D'après la station météorologique des Salines, les vents dominants sont de direction Nord et Nord-ouest, avec des vitesses moyennes varient entre 2.9 et 3.45 m/s (tab.13). Ces vents en contact avec le massif de l'Edough et la barrière montagneuse du Sud, déversent des pluies au passage.

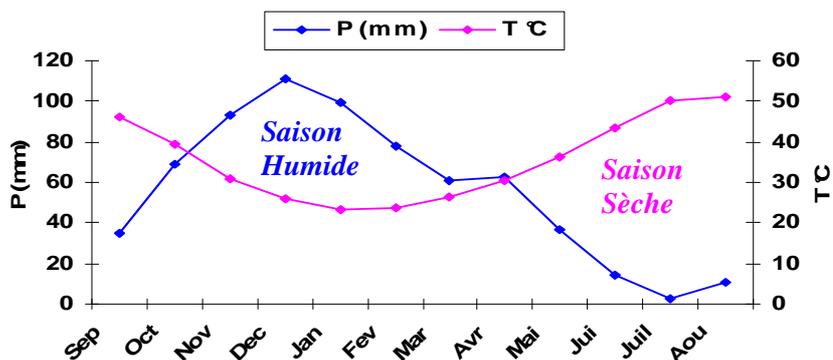
Tableau 13: Vitesse moyenne mensuelle des vents (m/s) à la station des Salines (1975 – 2006).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Moy
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

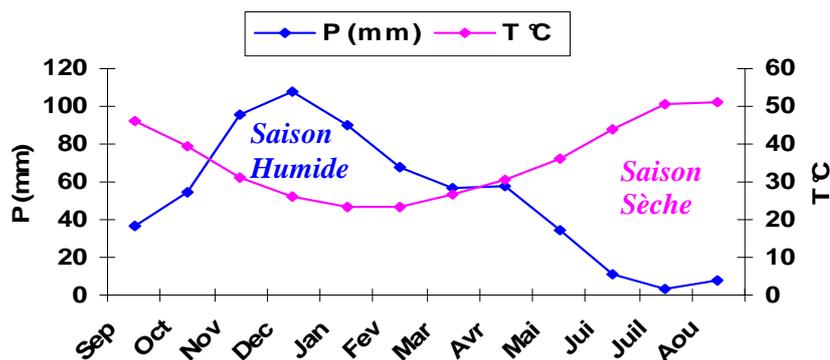
3.5. Type de climat

La courbe pluviométrique (combinaison de deux paramètres climatique ; la température et les précipitations), permet la détermination du type du climat régnant dans la région. Appliquée pour les quatre stations (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 mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai, au cours de cette période les précipitations sont importantes atteignant leurs maximum aux mois de Décembre et Janvier avec 110.97 mm à la station des Salines, 107.94 mm à Pont Bouchet, 96.28 mm à Ain Berda et 133.9 mm à Berrahal.

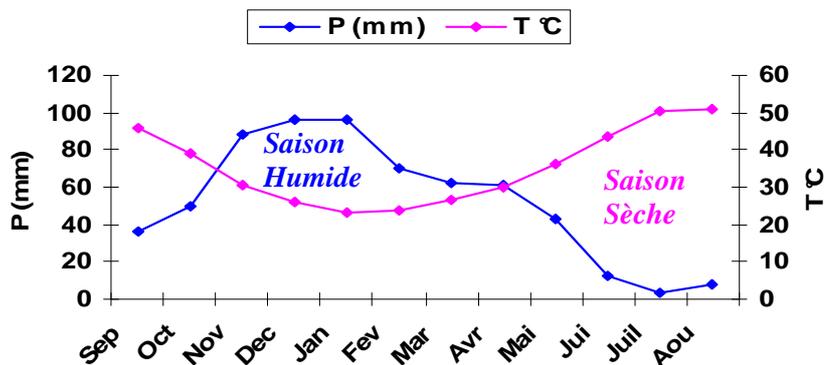
La saison sèche occupe le reste des mois, c'est-à-dire du mois de Mai jusqu'au mois de septembre. Au cours de cette période les température maximales sont atteintes et sont de l'ordre de 25.55 °C (fig.29).



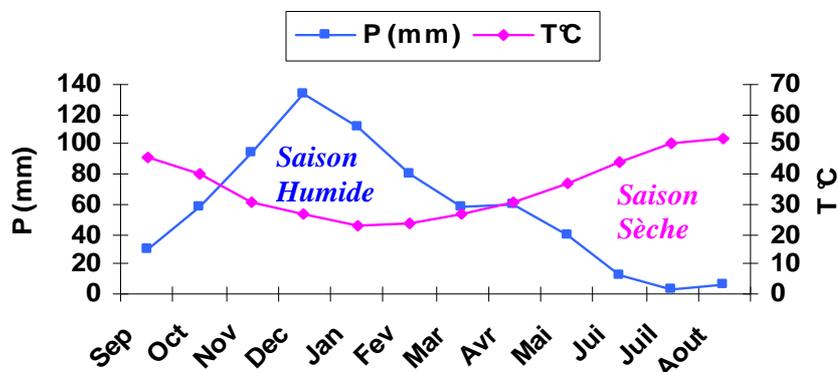
a- Station des Salines (1975/2006).



b- Station de pont Bouchet (1975/2006).



c- Station de Ain Berda (1975/2006).



d- Station de Berrahal (1981/2006).

Figure 29: Courbe pluviométrique aux Stations des Salines, Pont Bouchet, Ain Berda (1975/2006) et Berrahal (1981-2006).

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).

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 ; d'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'Evapotranspiration 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 14: Résultats de l'ETP selon la formule de Serra.

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
i	9.91	7.84	5.45	4.22	3.54	3.65	4.32	5.30	6.96	9.17	11.36	11.62	83.34
ETP	102.3	76.88	49.33	36.15	29.16	30.23	37.17	47.71	66.48	93.05	120.85	124.30	813.61

4.1.1.2. Formule de C.W. Thornthwaite

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

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 de calcul de l'ETP sont représentés dans le tableau suivant ;

Tableau 15: Résultats de l'ETP selon la formule de C.W Thornthwaite.

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Total
ETP	108.61	70.74	37.41	25.58	21.53	23.84	38.33	55.47	88.73	125.12	162.51	155.84	913.71

4.1.2. Evapotranspiration réelle (ETR)

Par définition, on appelle 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'ETR on utilise les formules suivantes :

4.1.2.1. Formule de Coutagne

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 ci-dessous ;

Tableau 16: Résultats de l'ETR d'après la méthode de Coutagne.

Stations	T °C	λ	$1/2\lambda$	P(m)	$1/8\lambda$	ETR(m)	ETR(mm)
Les salines	17.79	0.30	1.67	0.67346	0.42	0.53740	573.40
Pont Bouchet				0.62522		0.50795	507.95
Ain Berda				0.62745		0.50934	509.34
Berrahal	17.88			0.68777		0.54586	545.86

4.1.2.2. Formule de Turc

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

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

Où ; P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

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

T : Température moyenne annuelle (°C).

ETR : évapotranspiration réelle (mm).

Les résultats sont récapitulés dans le tableau ci-dessous ;

Tableau 17: Résultats de l'ETR d'après la méthode de Turc.

Stations	P (mm)	T (°C)	L	ETR (mm)
Les Salines	673.46	17.79	1021.92	583.02
Pont Bouchet	625.22			553.85
Ain Berda	627.45			555.24
Berrahal	687.77	17.88	1032.81	593.38

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 ;

$$R = P^3 / 3 * ETP^2, \text{ si : } P < 600 \text{ mm}$$

- Formule de Tixeront-Berkaloff modifiée par Romantchouk ;

$$R = P^3 / 3, \text{ si : } P > 600 \text{ mm}$$

Avec : P : Précipitations moyennes annuelles (mm),

ETP : Evapotranspiration potentielle annuelle (mm),

R : Ruissellement (mm).

Les résultats sont représentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 18: Résultats du ruissellement selon la formule de Tixeront-Berkaloff modifié par Romantchouk

Stations	P (mm)	R (mm)
Les Salines	673.46	101.81
Pont Bouchet	625.22	81.47
Ain Berda	627.45	82.34
Berrahal	687.77	108.44

4.3. Infiltration

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

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

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

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

Tableau 19: Résultats du bilan hydrologique.

Stations	P (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
Les Salines	673.46	470.31	101.81	101.34
Pont Bouchet	625.22	451.35	81.47	92.40
Ain Berda	627.45	455.45	82.34	89.66
Berrahal	687.77	449.78	108.44	129.55

5. Bilan hydrique selon 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 (l'écoulement, l'infiltration et l'évapotranspiration). Et 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 : $P \geq ETP \Rightarrow ETR = ETP$

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 : $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$

Dans ce cas, on puisera dans les réserves du sol jusqu'à satisfaction de l'ETP.

3^{eme} Cas : $P < ETP$ et $RFU = 0 \Rightarrow ETR = P$

Dans ce cas on aura un déficit qui représentera la quantité d'eau à apporter pour l'irrigation (déficit agricole).

Les tableaux (20, 21, 22, 23), résument les calculs du bilan hydrologique pour les quatre stations ; des Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et celle de Berrahal.

Tableau 20: Bilan hydrique d'après C.W Thornthwaite (Les Salines 1975-2006).

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Total
P(mm)	34.49	69.33	93.58	110.97	99.32	77.84	61.13	62.47	37.05	14.09	2.68	10.51	673.46
T(°C)	22.97	19.65	15.42	13.01	11.57	11.80	13.21	15.14	18.15	21.81	25.16	25.55	17.79
I	9.85	7.79	5.42	4.20	3.52	3.63	4.29	5.27	6.92	9.11	11.29	11.55	I=82.84
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)	108.61	70.74	37.41	25.58	21.53	23.84	38.33	55.47	88.73	125.12	162.51	155.84	913.71
ETR(mm)	34.49	69.33	37.41	25.58	21.53	23.84	38.33	55.47	88.73	62.41	2.68	10.51	470.31
RFU(mm)	0	0	56.17	100	100	100	100	100	48.32	0	0	0	/
EXC(mm)	0	0	0	41.56	77.79	54.00	22.80	7.00	0	0	0	0	203.15
DA(mm)	74.12	1.41	0	0	0	0	0	0	0	62.71	159.83	145.33	443.40

Tableau 21: Bilan hydrique d'après C.W Thornthwaite (Pont Bouchet 1975-2006).

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Total
P(mm)	37.05	53.96	95.70	107.94	89.76	68.27	56.54	57.82	34.96	11.32	3 . 6 0	8 . 3 0	625.22
T(°C)	22.97	19.65	15.42	13.01	11.57	11.80	13.21	15.14	18.15	21.81	2 5 . 1 6	25.55	17 . 7 9
I	9.85	7 . 7 9	5 . 4 2	4.20	3.52	3.63	4.29	5.27	6.92	9 . 1 1	1 1 . 2 9	11.55	I=82.84
K	1.05	0 . 9 1	0 . 7 5	0.70	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1 . 3 3	1 . 3 3	1 . 2 4	/
ETP(mm)	108.61	70.74	37.41	25.58	21.53	23.84	38.33	55.47	88.73	125.12	1 6 2 . 5 1	155.84	913.71
ETR(mm)	37.05	53.96	37.41	25.58	21.53	23.84	38.33	55.47	88.73	57.55	3 . 6 0	8 . 3 0	451.35
RFU(mm)	0	0	58.29	1 0 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0	1 0 0	46.23	0	0	0	/
EXC(mm)	0	0	0	40.65	68.23	44.43	18.21	2.35	0	0	0	0	173.87
DA(mm)	71.56	16.72	0	0	0	0	0	0	0	67.57	1 5 8 . 9 1	147.54	462.36

Tableau 22: Bilan hydrique d'après C.W Thornthwaite (Ain Berda 1975-2006).

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Total
P (mm)	36.59	49.83	88.64	96.05	96.28	69.8	61.95	61.44	43.24	12.2	3.43	8	627.45
T (°C)	22.97	19.65	15.42	13.01	11.57	11.80	13.21	15.14	18.15	21.81	25.16	25.55	17.79
I	9.85	7.79	5.42	4.20	3.52	3.63	4.29	5.27	6.92	9.11	11.29	11.55	I=82.84
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)	108.61	70.74	37.41	25.58	21.53	23.84	38.33	55.47	88.73	125.12	162.51	155.84	913.71
ETR (mm)	36.59	49.83	37.41	25.58	21.53	23.84	38.33	55.47	88.73	66.71	3.43	8	455.45
RFU (mm)	0	0	51.23	100	100	100	100	100	54.51	0	0	0	/
EXC (mm)	0	0	0	21.70	74.75	45.96	23.62	5.97	0	0	0	0	172
DA (mm)	72.02	20.91	0	0	0	0	0	0	0	58.39	159.08	147.84	458.24

Tableau 23: Bilan hydrique d'après C.W Thornthwaite (Berrahal 1981-2006).

	Sep	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	11.57	3.47	6.30	687.77
T (°C)	22.80	20.11	15.50	13.33	11.28	11.62	13.21	15.27	18.31	21.99	25.18	25.90	17.88
I	9.74	8.07	5.46	4.35	3.39	3.54	4.29	5.34	7.01	9.22	11.30	11.79	I=83.5
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)	106.66	73.37	37.45	26.49	20.31	22.92	37.96	55.87	89.56	126.4	162.19	159.26	918.48
ETR(mm)	30.11	58.04	37.49	26.49	20.31	22.92	37.96	55.87	89.56	61.26	3.47	6.3	449.78
RFU(mm)	0	0	57.02	100	100	100	100	100	49.29	0	0	0	/
EXC(mm)	0	0	0	64.41	91.10	57.83	20.26	4.39	0	0	0	0	237.99
DA (mm)	76.55	15.33	0	0	0	0	0	0	0	65.14	158.72	152.96	468.70

5.1. Interprétation du bilan de Thornthwaite (fig.30)

On constate qu'il y a deux périodes :

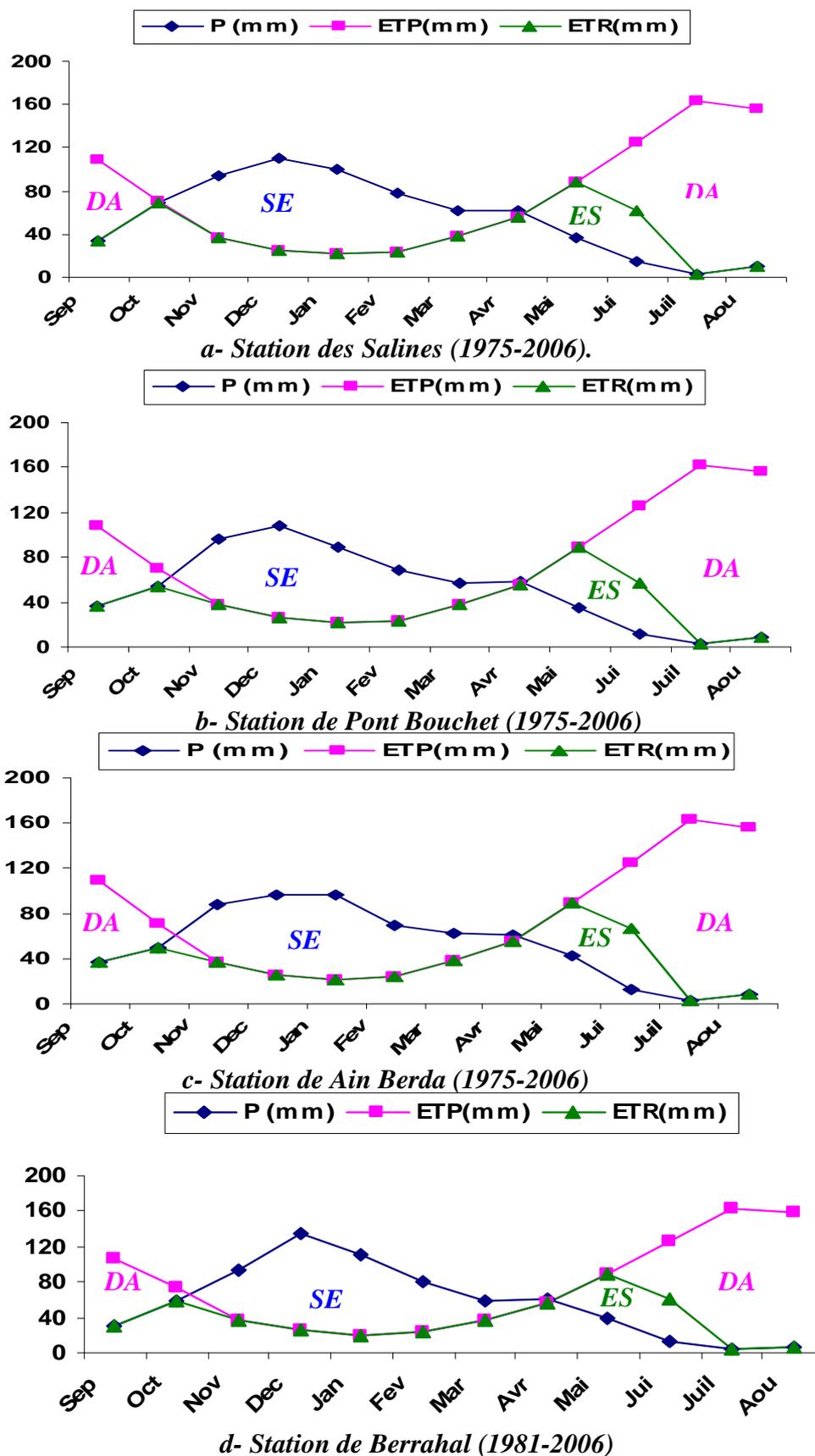
- Une période hivernale qui s'étale du mois d'octobre à avril, caractérisée par des précipitations importantes de 574.64 mm aux Salines, 529.99 mm à Pont Bouchet, 523.99 mm à Ain Berda et 597.07 mm à Berrahal, tandis que l'évapotranspiration est réduite avec une valeur de 272.9 mm. La reconstitution du stock se fait à partir du mois d'Octobre et l'écoulement se manifeste à partir de décembre et se poursuit jusqu'au mois d'Avril. Durant cette période, la quantité coulée est égale à 203.15 mm aux Salines, 173.87 mm à Pont Bouchet, 172 mm à Ain Berda et 237.99 mm à Berrahal.
- Une période estivale qui s'étale du mois de Mai à Septembre où l'ETP est nettement supérieure aux précipitations. Le stock commence à épuiser pour vider complètement au mois de Juin accompagné d'un déficit agricole, qui atteint son maximum au mois de 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 montrent une différence entre les résultats des différentes méthodes de mesure, mais la méthode de Thornthwaite est la plus appropriée pour de tels calculs car elle contient un facteur de correction K qui intègre la durée d'insolation.

Reste toujours que les valeurs de l'ETR de la station « les Salines » sont supérieures à celles des stations de Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal.

Tableau 24: Valeurs de l'évapotranspiration réelle selon les différentes méthodes.

Stations Méthode	ETR (mm/an) les Salines	ETR (mm/an) Pont Bouchet	ETR (mm/an) Ain Berda	ETR (mm/an) Berrahal
Thornthwaite	470.31	451.35	455.45	449.78
Coutagne	573.40	507.95	509.34	545.86
Turc	583.02	553.85	555.24	593.38



DA : déficit agricole, SE : surplus d'eau, ES : Epuisement du stock

Figure 30: Bilan d'eau selon la méthode de Thornthwaite pour les stations ; des Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal.

6. Détermination de l'infiltration efficace mensuelle (Février 2007)

En vue d'estimer l'infiltration efficace, on a fait recours à la méthode des chlorures mise au point 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 (*in Hadj Saïd, 2007*).

Pour déterminer l'infiltration efficace, *Scholler* 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 :

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

Si le coefficient de ruissellement est faible :

$$\frac{Ie}{P} \times 100 = \frac{Clp}{Cln} \times 100$$

Avec :

P : Pluie (mm).

r : Coefficient de ruissellement (mm).

Ie : Infiltration efficace (mm).

Clp : Concentration en chlorure de l'eau de pluie (Meq.l⁻¹).

Cln : Concentration en chlorure de l'eau souterraine (Meq.l⁻¹).

Le dosage des chlorures a été effectué sur les eaux de pluie et les eaux souterraines au niveau de 18 points bien répartis sur la plaine de Fetzara au mois de février 2007, où on enregistre une quantité de précipitations d'ordre de 70 mm.

Etant donnée qu'on est en zone de plaine, ce qui se traduit par un ruissellement négligeable, on a appliqué la deuxième équation, les résultats sont récapitulés dans le tableau ci-après.

Tableau 25 : Infiltration efficace mensuelle (Février 2007) selon la méthode de Scholler (1962).

Puits	Cl _n meq/l	Cl _p meq/l	I _e (mm)
P1	9,20	2,40	18,50
P3	4,60	1,88	29,00
P5	5,80	2,10	25,67
P7	37,40	2,63	4,98
P9	32,80	2,42	5,23
P11	7,00	2,20	22,28
P14	7,40	2,14	20,47
P15	5,60	2,00	25,32
P19	8,81	2,30	18,51
P22	9,23	2,20	16,91
P26	10,93	2,40	15,57
P27	8,69	1,80	14,69
P30	9,80	2,30	16,64
P31	7,60	2,00	18,66
P34	5,60	2,40	30,39
P36	5,80	2,20	26,89
P38	12,80	2,00	11,08
P41	12,20	1,90	11,04

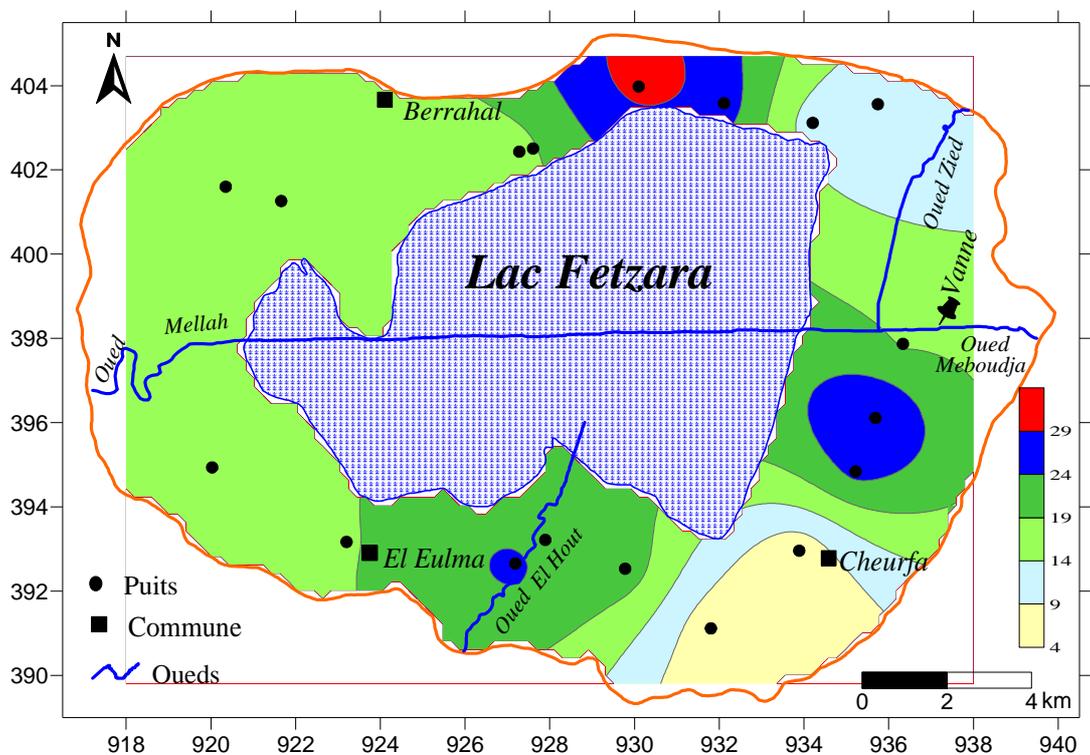


Figure. 31 : Carte de l'infiltration efficace de la région du Fetzara (Février 2007).

D'après la carte (fig.31), on observe que l'infiltration est variée entre 14 et 31 mm au niveau de la majorité des points, avec une moyenne de 18.44 mm. Elle est inférieure à 10 mm au Sud-est du lac Fetzara (commune de Cheurfa), due probablement aux fortes concentrations des chlorures au niveau des eaux souterraines.

7. Conclusion

L'analyse des données climatiques a permis d'attribuer à la région d'étude un climat méditerranéen à deux saisons ;

- Une saison chaude et sèche.
- Une saison froide et humide.

La région d'étude reçoit des précipitations annuelles moyennes de l'ordre de : 673.46 mm (Salines), 625.22 mm (pont Bouchet), 627.45 mm (Ain Berda), 687.77 mm (Berrahal) et une température moyenne annuelle de l'ordre de 17.79 °C enregistrée au station des Salines.

La reconstitution du stock commence au mois de Novembre et s'achève au mois d'Avril.

L'épuisement du stock du sol s'observe au mois de Mai, ce qui provoque un déficit agricole (DA) nécessitant une irrigation s'impose surtout pour la période allant de Juin jusqu'au mois d'Octobre.

II. Hydrologie

1. Introduction

Le lac Fetzara est alimenté par trois principaux oueds qui sont : oued El Hout au Sud, c'est le plus important cour 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 Bou Kantas, 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). Il s'écoule de l'Ouest vers le canal d'assèchement du lac, avec une longueur à peu près de 8 km.

Ces cours d'eau 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 inexistantes en période de sèche. Les eaux des trois oueds à leur sortie du lac sont évacuées par l'oued Meboudja, ce dernier est un affluent de l'oued Seybouse, qui reçoit ces eaux avant de jeter en mer (fig.32).

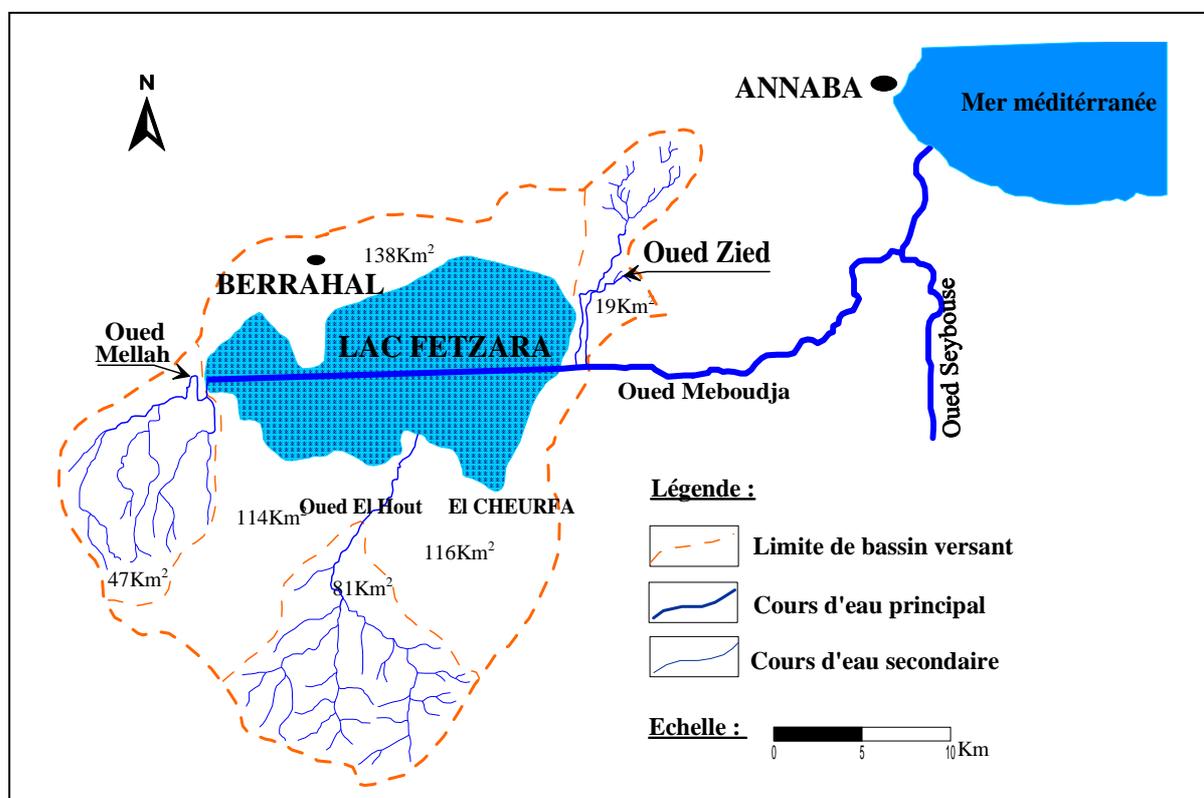


Figure 32: Les principaux sous bassins versants du lac Fetzara (in Zenati, 1999. modifié).

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.

Le lac est alimenté par les eaux des principaux oueds ; Zied, El Hout et Mellah. 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).

Tous ces cours d'eaux qui entourent le lac tarissent en saisons sèches à l'exception de oued El Hout. Le drainage de ces eaux est assuré par le canal principal qui traverse le centre du lac ; mais l'évacuation des eaux reste insuffisante, provoquant ainsi des phénomènes d'hydromorphie à cause des effets d'inondation, et aussi une grande salinisation (*in Habes, 2006*).

Le bassin versant du lac Fetzara est constitué de 30 sous bassins versants petits et moyen avec une superficie totale de l'ordre de 515 Km² (A..J.C.I, 1985).

Parmi les principaux sous bassins on note ceux des oueds Zied, El Hout et Mellah, dont les superficies sont 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.32 et tab.26).

Tableau 26: Quelques caractéristiques de sous bassin versant du lac Fetzara.

Bassin versant du lac Fetzara : 515 km²			
Principaux sous bassins versants	Oued EL Hout	Oued Mellah	Oued Zied
Situation par rapport au lac	au Sud	à l'Ouest	au Nord-Est
Longueur	10 Km	8 Km	10.5 Km
Superficie	81 Km ²	47 Km ²	19 Km ²
	15.73 %	9.13 %	3.69 %

3. Régime hydrologique

3.1. Lac Fetzara

La dépression du lac Fetzara a une superficie d'environ 23000 ha, situé à 18 km au Sud-ouest de Annaba ; 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 et à l'Ouest (*in 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 (*D.G.F, 2003*).

La superficie submergée en hiver est de l'ordre de 5800 hectares (*A.J.C.I 1985*). La partie la plus profonde du lac est formée par sédimentation à une altitude d'environ 10 mètres.

Durant la saison pluvieuse, l'eau remonte jusqu'à la cote 12 mètres environ, soit à 2 mètres du niveau centre du lac. Cet aspect temporaire, la succession de périodes d'assèchement et de mise en eau rend particulièrement intéressant le lac au vu 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.

Durant la saison sèche, les précipitations étant presque nulles, peu d'eau arrive au lac. 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, le lac est donc complètement sec, ceci est du principalement à la détérioration de l'écluse du canal principal d'évacuation situé à El Guantra, 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 du 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 on a essayé de comparer les débits mesurés durant la période de janvier jusqu'au mai 2007 avec les débits mesurés par Habes durant la période de décembre 2004 jusqu'au 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 traduisant par des forts débits, surtout pour 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 le mois de février et mars 2007, dont la forte quantité traduite par la crue de 12 mars qui a engendré une montée des eaux de ruissellement, avec débordement.

3.2.1. Oued El Hout

❖ 1^{ère} période (Déc 2004 – Mars 2005)

Les courbes établies (fig.33) montrent que les débits durant cette période varient de 0.37 à 2.69 m³/s, ces forts débits résultent aux grandes quantités des précipitations, avec 185 mm à décembre 2004, 135 mm à janvier 2005 et 179 mm au mois de février.

❖ 2^{ème} période (Jan 2007– Mai 2007)

L'allure des courbes (fig.33) montrent que les forts débits sont enregistrés durant la période qui s'étale entre le 12 et le 25 mars, un pic observé le 12 mars avec un débit de 10.23 m³/s, à l'exception de cette période, la variation des débits oscille entre 0.0005 et 0.551 m³/s.

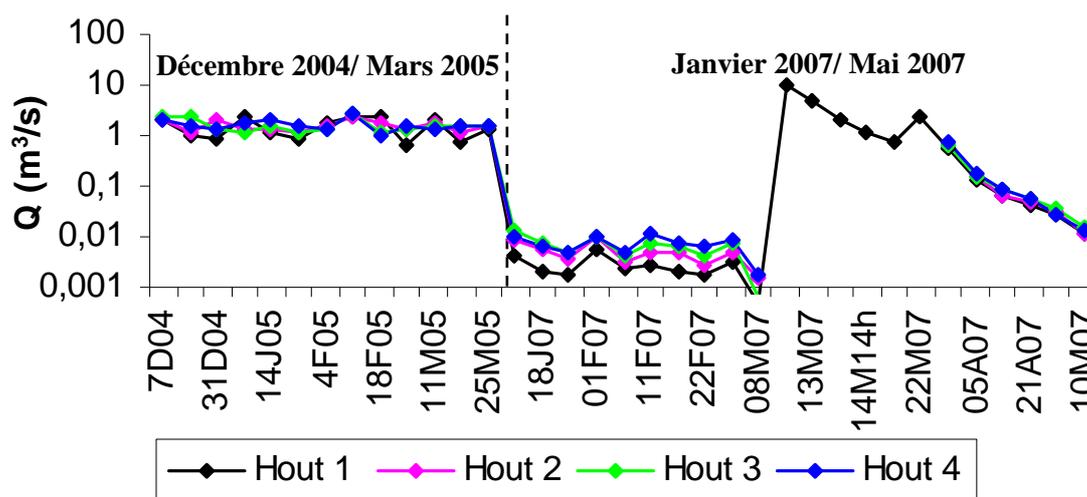


Figure 33: Courbes d'évolutions de débits de l'oued El Hout pour les deux périodes (Déc 2004 – Mars 2005) et (Jan 2007 – Mai 2007).

3.2.2. Oued Mellah

❖ 1^{ère} période (Déc 2004 – Mars 2005)

L'allure des courbes des débits (fig.34) montre des valeurs oscillent entre 0.46 et 2.68 m³/s, avec trois pics assez important enregistrés pendant les mois ; décembre (2.19 m³/s), janvier (1.49 m³/s) et février (2.27 m³/s).

❖ 2^{ème} période (Jan 2007– Mai 2007)

Les forts débits sont enregistrés pendant la même période que celle de l'oued El Hout (fig.10) où la plus forte valeur de débit est enregistrée le 12 mars avec un débit d'ordre de 16 m³/s, alors que la plus faible valeur est enregistrée le 22 février avec un débit de 0.00115 m³/s. Le tarissement de l'oued débute à partir du 10 mai 2007.

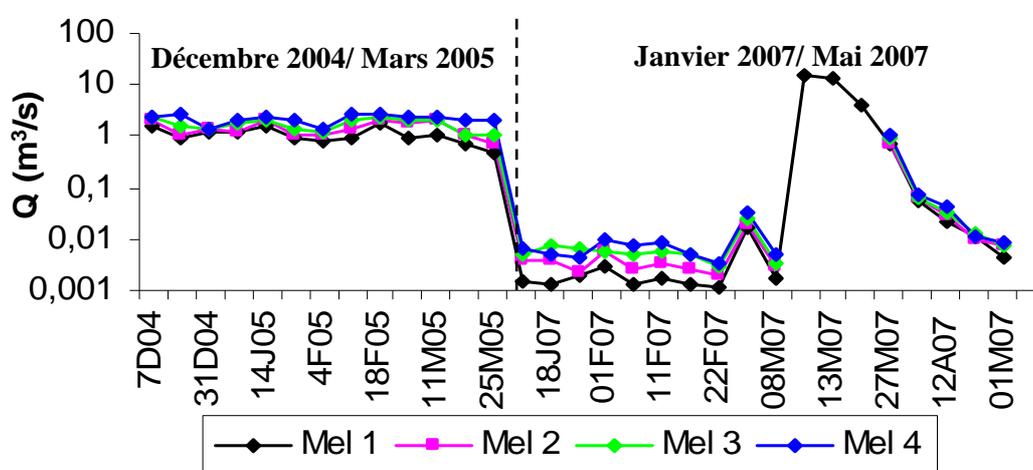


Figure 34: Courbes d'évolutions de débits de l'oued Mellah pour les deux périodes (Déc 2004 – Mars 2005) et (Jan 2007 – Mai 2007).

3.2.3. Oued Zied

❖ 1^{ère} période (Déc 2004 – Mars 2005)

Durant cette période et d'après l'allure des courbes (fig.35), on observe un pic enregistré lors du mois de février 2005 avec une valeur de 3.21 m³/s, le reste du tracé reflète des débits variants entre 0.47 et 3.21 m³/s.

❖ 2^{ème} période (Jan 2007– Mai 2007)

L'allure des courbes des débits (fig.35) correspond à celles des oueds ; Mellah et El Hout, fait montré que le fort débit enregistré le 12 mars avec une valeur de 2.92 m³/s. le reste des débits variants entre 0.01284 et 2.37 m³/s.

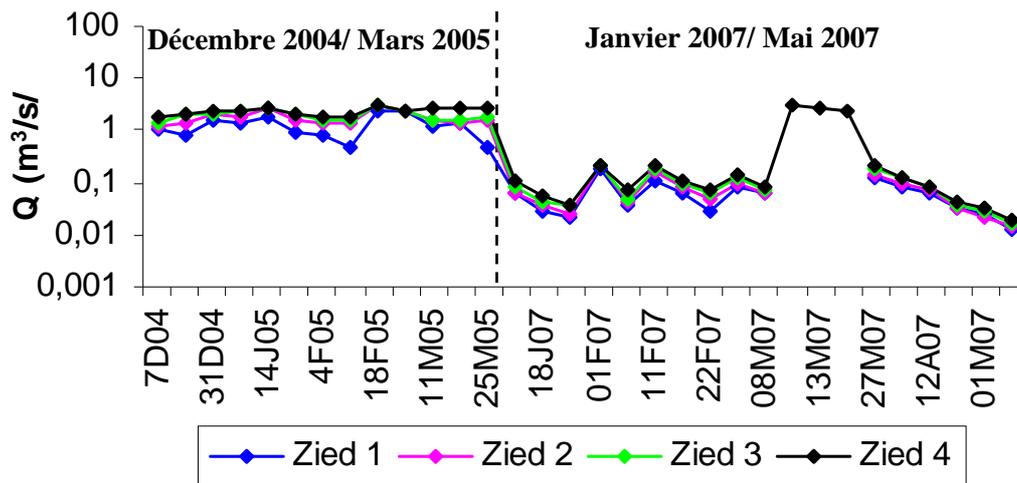


Figure 35: Courbes d'évolutions de débits de l'oued Zied pour les deux périodes (Déc 2004 – Mars 2005) et (Jan 2007 – Mai 2007).

3.2.4. Oued Meboudja

❖ 1^{ère} période (Déc 2004 – Mars 2005)

L'évolution des débits au niveau de l'oued Meboudja dépend de l'ouverture de la vanne (fig.36), ils varient entre 6.95 et 13.75 m³/s. les valeurs maximales (>13 m³/s) sont enregistrées durant le 7 et le 14 janvier et le 4 février 2005.

❖ 2^{ème} période (Jan 2007– Mai 2007)

Durant cette période, les fortes valeurs enregistrées le 12, le 13 et le 22 mars avec des débits respectivement 2.35 m³/s, 2.02 m³/s, 3.68 m³/s, le reste des valeurs oscillent entre 0.4159 et 1.23 m³/s.

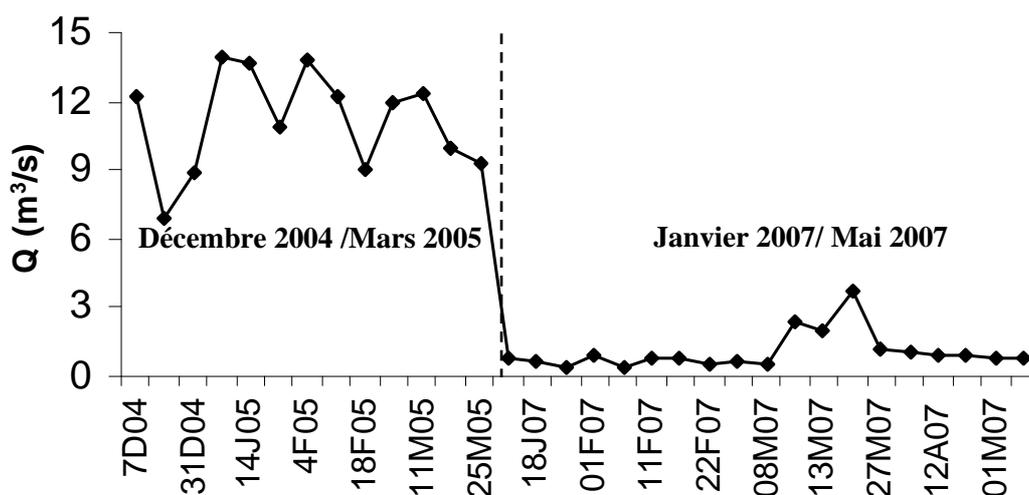


Figure 36: Courbe d'évolution de débits de l'oued Meboudja pour les deux périodes (Déc 2004 – Mars 2005) et (Jan 2007 – Mai 2007).

4. Conclusion

Les eaux du lac Fetzara proviennent des montagnes environnantes, ces eaux sont collectées à partir de trois principaux oueds, à savoir : oued El Hout au sud, oued Mellah à l'ouest et oued Zied au nord-est, les trois sont canalisés, leurs eaux sont évacuées par l'oued Medjouba.

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 ses maximums durant les mois de janvier et février 2005, où les précipitations dépassent les 130 mm pour la première période d'observation. Et durant la crue du 12 Mars de la deuxième période, 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 oued El Hout, Mellah et Zied, par contre l'évolution des débits de oued Meboudja dépend de l'ouverture de la vanne.

Chapitre V

ETUDE

HYDROGEOLOGIQUE

L'étude hydrogéologique reste un moyen important pour la compréhension du fonctionnement des nappes et de leurs régimes. Cette approche permet l'estimation des paramètres hydrodynamiques selon le contexte de l'aquifère.

1. Introduction

La connaissance de l'hydrogéologie de la région est très intéressante, car elle permet d'envisager les processus d'alimentation des aquifères, la détermination du sens d'écoulement et les relations existantes nappe-lac-oueds. En se basant sur les travaux déjà effectués, la description géologique des terrains de la région d'étude et des caractéristiques hydrogéologiques de chaque formation, on peut distinguer un ensemble de nappes se répartissant de manière hétérogène au niveau de la région de Annaba.

2. Description des différents aquifères

Les études menées ont montrées la présence de divers aquifères que nous allons détailler :

2.1. Les nappes superficielles

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 de Belelieta (fig.37). La nappe est alimentée par les eaux de pluie, son épaisseur est de 15 m. elle est exploitée par des puits et des forages. La perméabilité varie entre 10^{-6} et 10^{-5} m/s.

2.1.2. La nappe superficielle

Cette nappe est répandue sur la majorité de la plaine d'Annaba (fig.37). D'après la géomorphologie de la région, on peut diviser la nappe en deux régions communiquent entre elles à travers le cordon dunaire (Guantra), dont la texture 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.
- La région Ouest est une nappe superficielle discontinue qui entoure le lac Fetzara. La lithologie de la nappe entourant le lac est constituée par des alluvions récentes (sables, limons, argiles) avec une texture argilo-sableuse et argilo-limoneuse, 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 les puits surtout et quelques forages. L'alimentation de cette nappe se fait par les précipitations et par les crues des oueds (*in Belhamra A, 2001, Zenati N. 1999*).

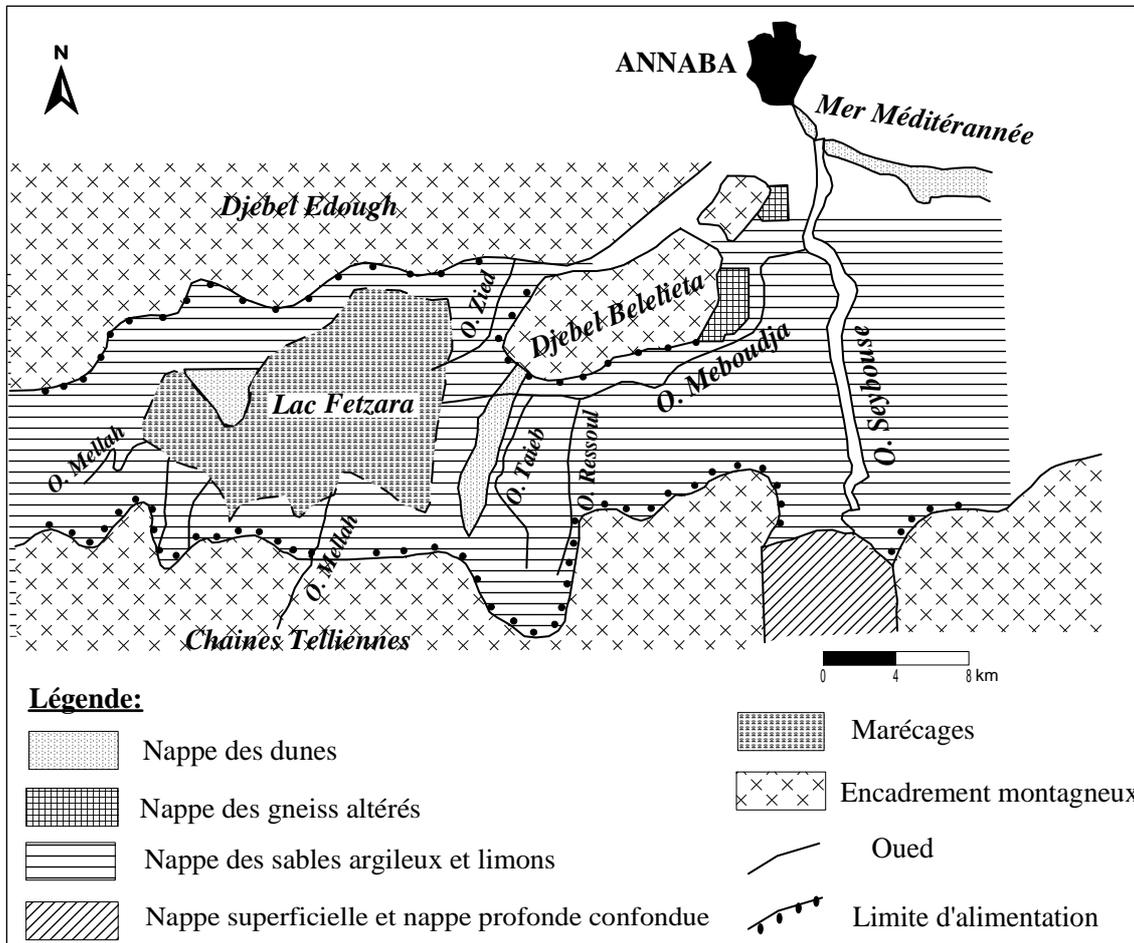


Figure 37: Situation géographique des nappes superficielles de la plaine de Annaba
(*in Habes, 2006*).

2.2. Les nappes profondes

Au nombre de deux et sont d'inégales extensions. Nous distinguons :

2.2.1. La nappe des cipolins (formations métamorphiques)

Elle est contenue dans les lentilles des calcaires métamorphiques fissurés des massifs de Bouhamra et Belleilita, profonde de 12 à 80 m. Les débits d'exploitation des forages sont de l'ordre de 15 l/s et les transmissivités varient entre $5 \cdot 10^{-5}$ et $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (*in Derradji & al, 2005*).

2.2.2. La nappe des graviers

Cette nappe est tantôt libre tantôt captive (fig.38), elle est captive dans la région de Annaba, au-dessous de la nappe superficielle. Elle devient libre dans la région de Dréan. Elle est contenue dans les graviers dans sa partie captive, par contre elle constituée de sables et de galets du Plio-Quaternaire dans sa partie libre.

La transmissivité est de $3.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Le coefficient d'emmagasinement (S) calculé au niveau de cette nappe est parfois très faible de l'ordre de 10^{-4} . L'épaisseur de la nappe ne dépasse pas les 70 m.

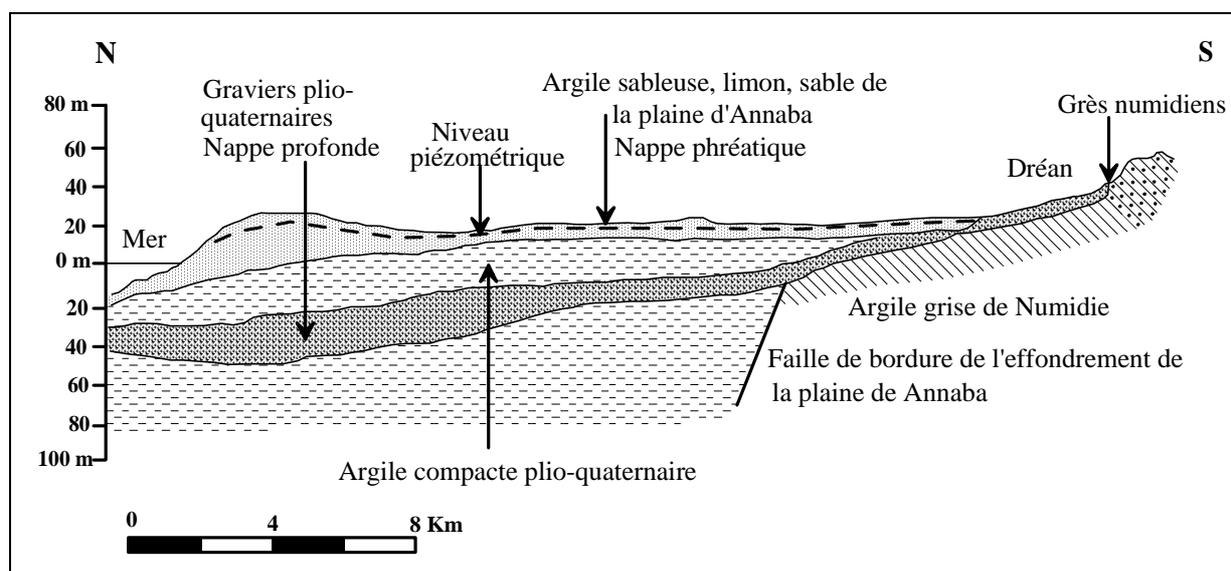


Figure 38: Coupe schématique du système aquifère d'Annaba (in Derradji & al, 2005).

3. Caractéristiques de l'aquifère superficiel entourant le lac

3.1. Inventaire des points d'eau

Quarante et un puits ont été inventoriés et reportés sur la carte topographique de la zone d'étude (fig.39). Les coordonnées lamberts ainsi que l'altitude de chaque point ont été déterminés. Notons par ailleurs que quelques puits sont équipés de pompe ce qui nous a permis de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de ces ouvrages. En général les eaux pompées sont destinées à l' AEP et à l'irrigation.

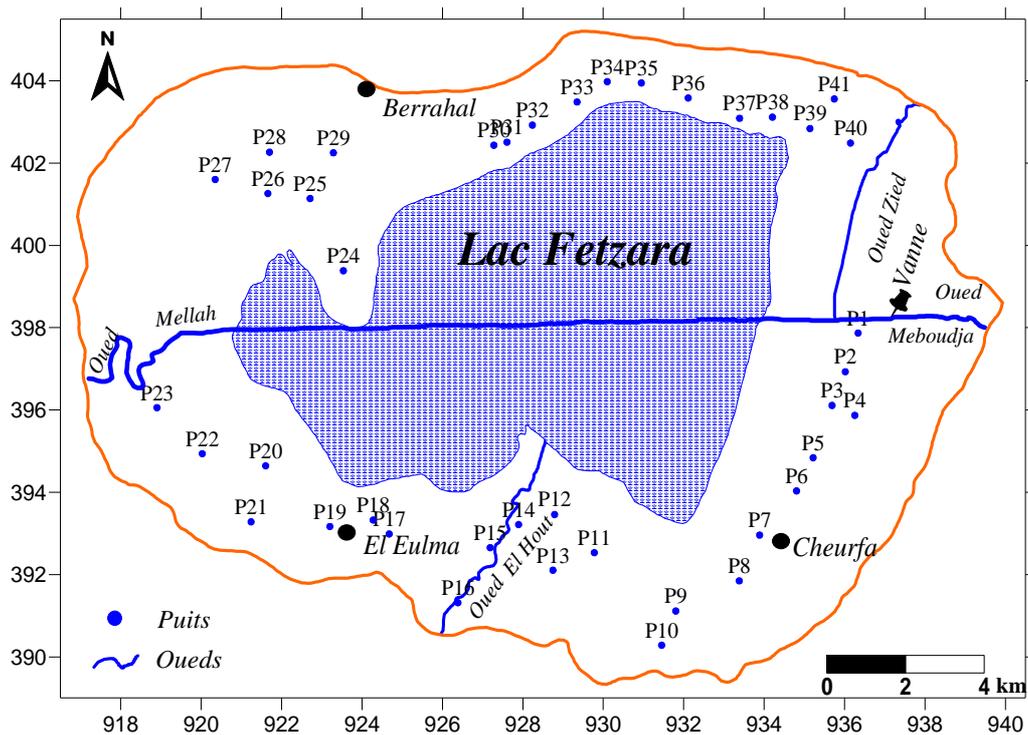


Figure 39: Carte d'inventaire des puits dans la région du lac Fetzara.

Afin de suivre les variations piézométriques, nous avons effectué six campagnes de mesures s'étalant du mois de décembre 2006 jusqu'au mois de mai 2007. Ce suivi nous permettra de comprendre les fonctionnements du système aquifère et ses relations avec son environnement. Les cartes piézométriques sont issues d'un traitement automatique par utilisation du logiciel Surfer sous Windows.

3.2. Interprétation des cartes piézométriques

3.2.1. Carte piézométrique du mois de Décembre 2006

L'allure générale des courbes isopièses montre que l'écoulement suit parfaitement la topographie de la plaine, il se caractérise par des lignes de courant dirigées vers le lac Fetzara (fig.40) dans sa partie centrale, par contre au niveau de la zone Est l'écoulement est dirigé vers l'oued Meboudja.

Les courbes isopièses sont serrées au niveau des bordures Nord et au Nord-ouest du lac, ce qui traduit un fort gradient hydraulique de l'ordre de $0.66 \cdot 10^{-2}$, à l'approche du lac l'espacement des courbes devient important, ce qui signifie une baisse du gradient, à ce niveau il est de $0.25 \cdot 10^{-2}$. Ce changement dans la vitesse d'écoulement traduit un changement de la perméabilité, cette dernière faible au début devient importante caractérisant ainsi un changement de faciès. Au niveau des 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 $0.042 \cdot 10^{-2}$, 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 des sols hydromorphes à texture très fine.

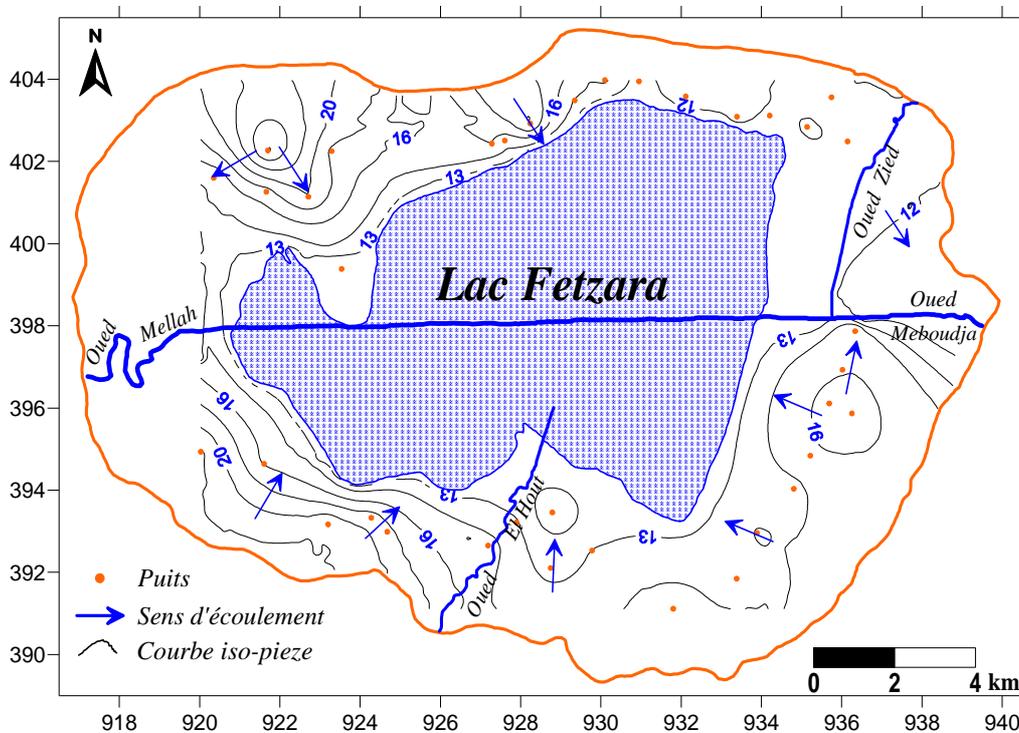


Figure 40: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (Décembre 2006).

3.2.2. Carte piézométrique du mois de Janvier 2007

L'allure générale de la carte montre une situation analogue à la précédente (fig.41), l'observation dans le détail montre que l'oued Meboudja est alimenté par les eaux de la nappe (au niveau du cordon dunaire du Gantra). Le lac reste alimenté par les eaux des nappes. Les courbes isopièzes sont serrées au Nord et Nord-ouest du lac, ce qui signifie que le gradient est fort de l'ordre de $0.71 \cdot 10^{-2}$. Par contre, elles sont espacées au Sud et Sud-est du lac Fetzara, avec un gradient hydraulique faible d'ordre de $0.083 \cdot 10^{-2}$.

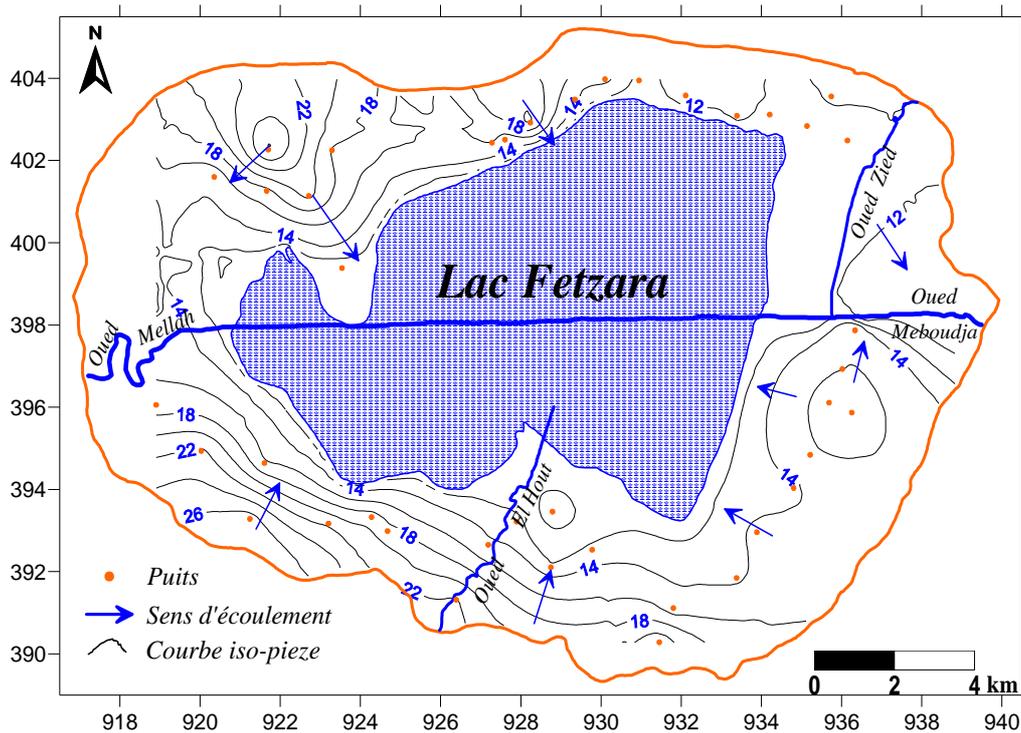


Figure 41: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (Janvier 2007)

Cette répartition montre que les formations à l'affleurement et par conséquent les perméabilités ne sont pas les mêmes de part et d'autres du lac.

3.2.3. Carte piézométrique du mois de Février 2007

La carte montre des lignes de courant dirigées en général vers le lac Fetzara avec un gradient hydraulique variant entre $0.4 \cdot 10^{-2}$ et $0.5 \cdot 10^{-2}$. 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 $0.11 \cdot 10^{-2}$, indiquant l'existence d'une forte perméabilité (cordon dunaire du Guantra). Au Nord-est l'écoulement se fait vers l'Est, indiquant l'alimentation de la nappe par oued Zied (fig.42).

On observe aussi une dépression avec des courbes isopièzes fermées autour du puits 12, due au pompage intensif au niveau de ce puits destiné à l'irrigation. Ce qui provoque un drainage de l'oued El Hout.

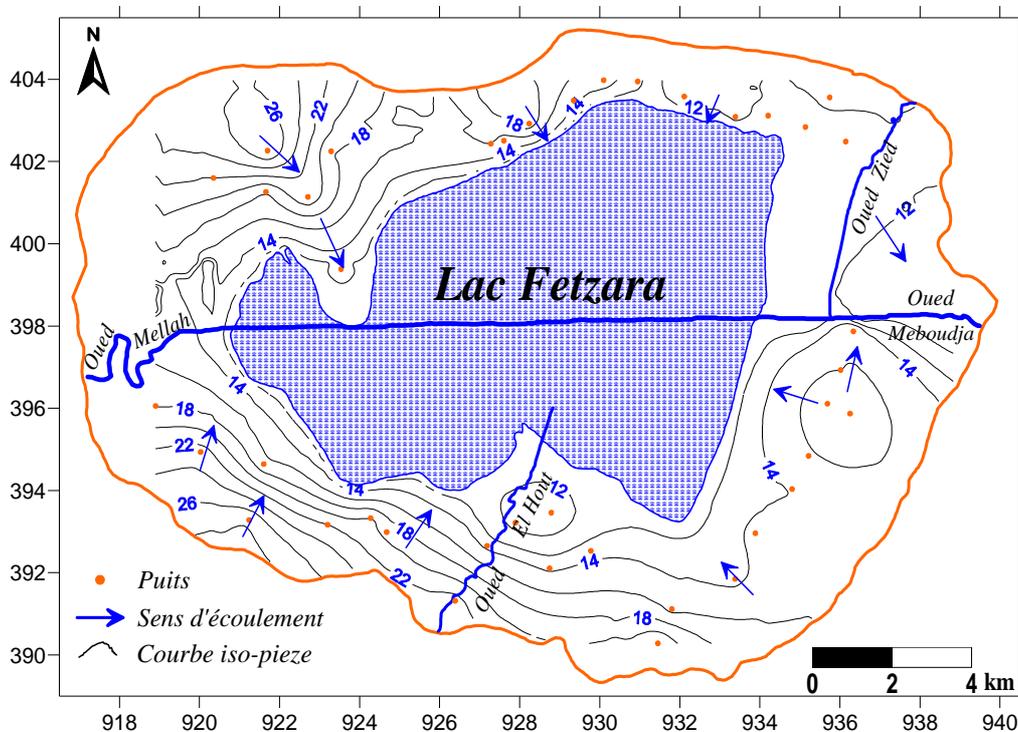


Figure 42: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (Février 2007).

3.2.4. Carte piézométrique du mois de 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 au niveau de la partie Nord de la carte et Sud-nord, au niveau de la zone Sud de la carte, indiquant le mode d'alimentation du lac (fig.43).

Les parties Sud et Sud-est du lac Fetzara, se caractérisent par un gradient hydraulique variant entre $0.13 \cdot 10^{-2}$ et $0.5 \cdot 10^{-2}$, par contre au niveau de la zone Nord et Nord-ouest le gradient est de $0.83 \cdot 10^{-2}$, traduisant ainsi une faible perméabilité ou une pente importante des terrains (piétement du massif de l'Edough). Au niveau de la partie Sud et contrairement aux cartes précédentes on note 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 provoquée un affleurement de la nappe.

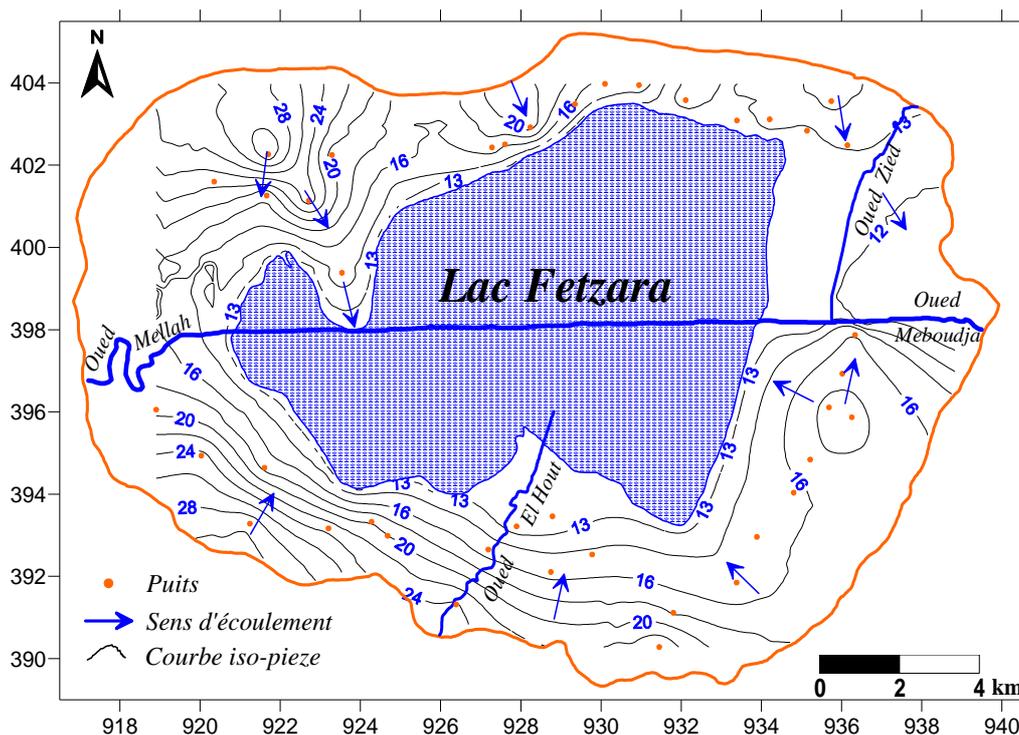


Figure 43: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (Mars 2007).

3.2.5. Carte piézométrique du mois d'Avril 2007

Les courbes isopièzes sont toujours serrées au Nord du lac (piémet de l'Edough), avec un fort gradient hydraulique d'ordre de $0.91 \cdot 10^{-2}$. Elles sont espacées au Sud (El Eulma), avec un gradient d'ordre de $0.5 \cdot 10^{-2}$, et très espacées au Sud-est (Cheurfa) (fig.44), où le gradient hydraulique diminue et devient $0.13 \cdot 10^{-2}$. 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 les vertisols (sols lourds), un autre faciès et une autre perméabilité, ce type de sols possède une texture très fine et présente un mauvais drainage.

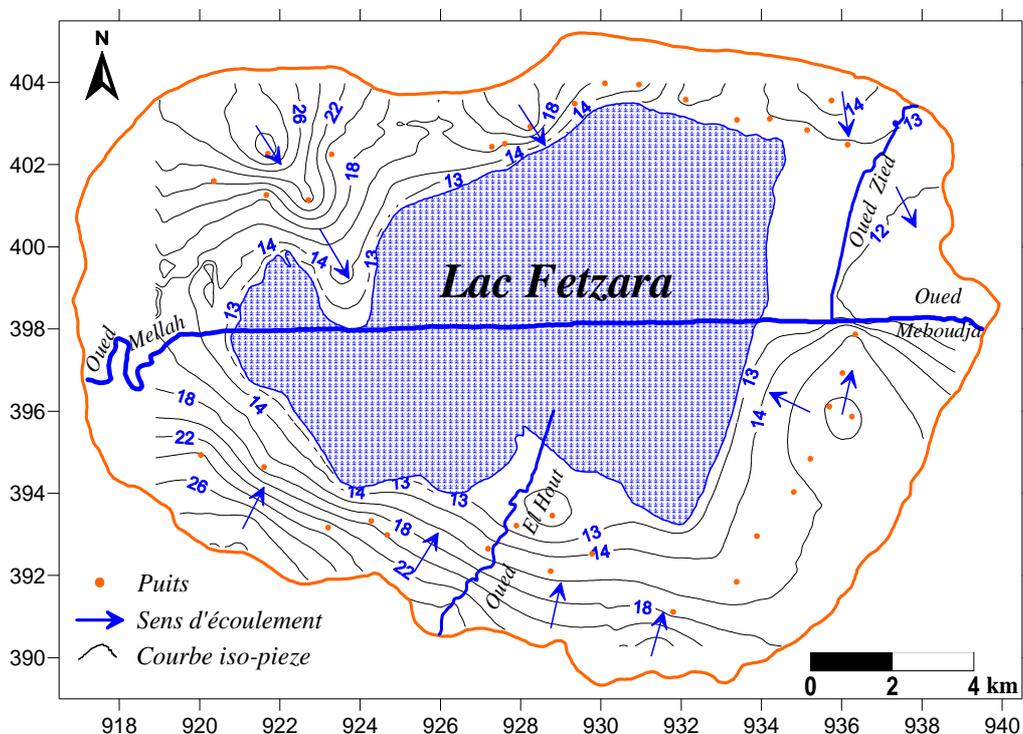


Figure 44: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (Avril 2007).

3.2.6. Carte piézométrique du mois de Mai 2007

L'allure de la carte reste la même que la précédente, l'écoulement reste convergent vers le lac dans ses parties nord et sud (fig.45). Le gradient hydraulique est toujours élevé au piémont de l'Edough avec une valeur d'ordre de $0.83 \cdot 10^{-2}$, mais en allant vers le lac, l'espacement des courbes isopièzes devient important et se traduit par un gradient de l'ordre de $0.25 \cdot 10^{-2}$. Il est de 10^{-3} au Sud, et de $0.47 \cdot 10^{-2}$ au Sud-est du lac Fetzara (El Eulma), cette variation du gradient est lié à la topographie et à la perméabilité des terrains traversés. La région Ouest reste une zone d'accumulation des eaux, caractérisée par une évolution irrégulière du gradient hydraulique.

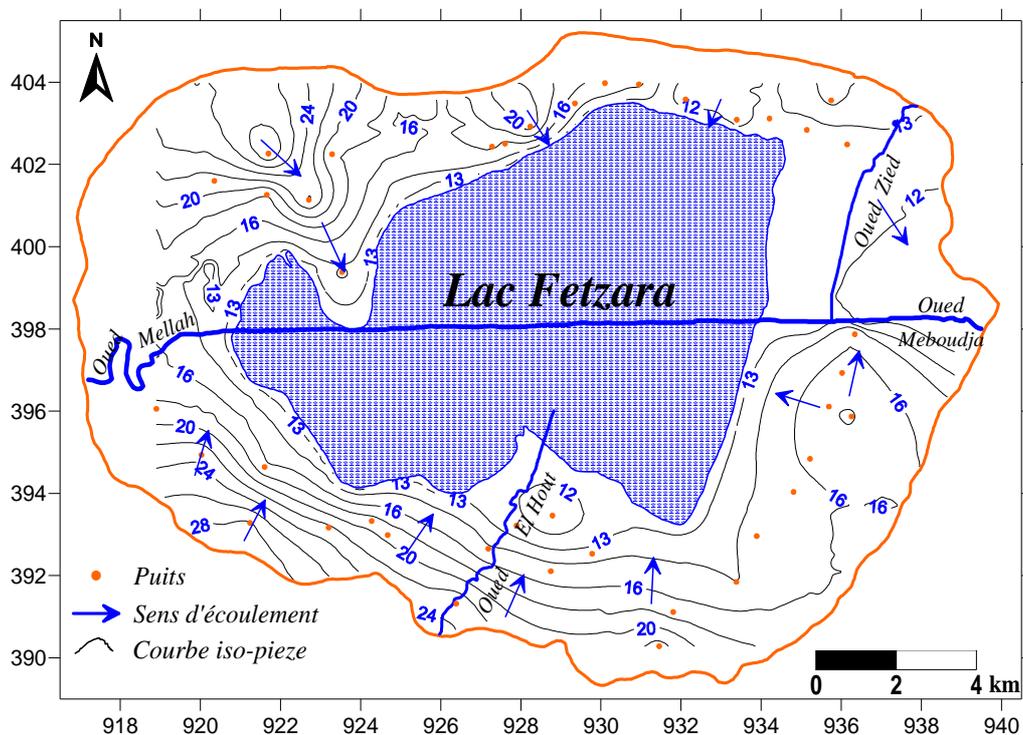


Figure 45: Carte piézométrique de la région du lac Fetzara (Mai 2007).

3.2.7. Variation du niveau piézométrique entre Janvier 2007 et Mai 2007

Afin d'étudier l'évolution du niveau piézométrique, nous avons considéré les cartes piézométriques se rapportant au mois de Janvier 2007 et au mois de Mai 2007, considérées comme les mois extrêmes, les précipitations enregistrées au cours de ces mois sont de 35.4 mm pour le mois Janvier et de 17 mm pour le mois de Mai. La carte de battement obtenue (fig.46), est analogue aux cartes piézométriques, d'après son allure, on peut déterminer deux zones avec des tendances différentes :

- La zone à fort battement, se localisant au Nord-ouest de la région, les variations sont importantes et atteignent six (06) mètres.
- La zone à faible battement, allant jusqu'à deux (2) mètres, située tout autour du lac.

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), mais en saison sèche on note une baisse significative du niveau, correspondant à un manque d'apports. A titre indicatif les précipitations enregistrées au mois de Janvier 2007, sont de 35.4 mm et elles sont d'ordre de 17 mm pour le mois de Mai 2007.

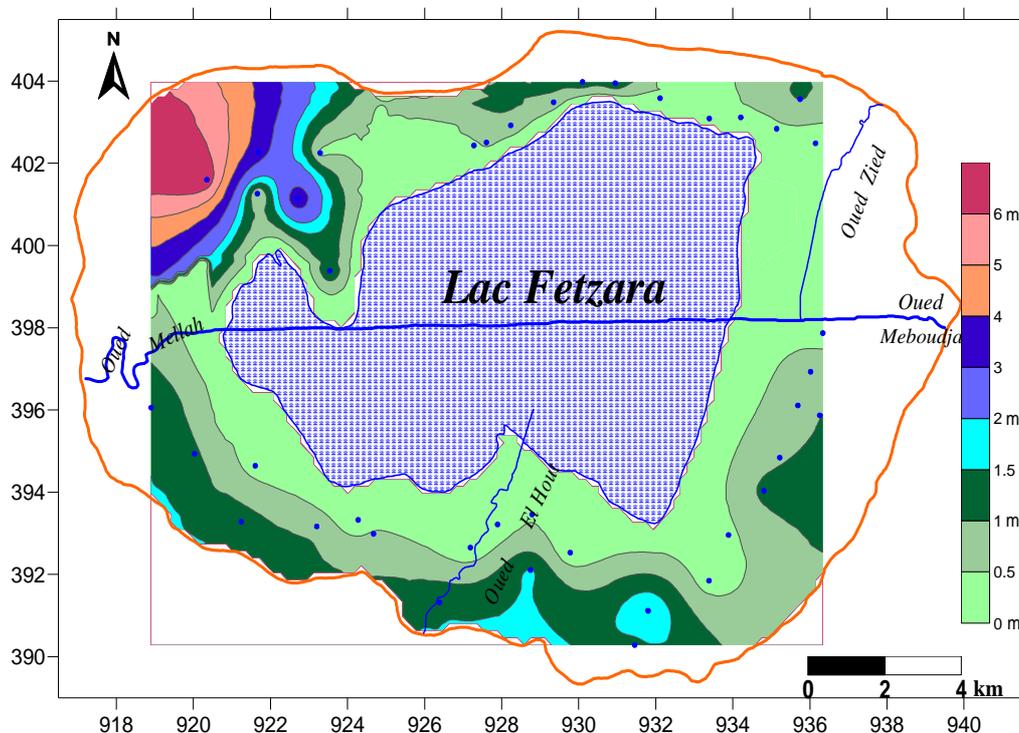


Figure 46: Carte de différence du niveau piézométrique entre Janvier 2007 et Mai 2007.

Le tableau ci-dessous (tab.27) récapitule les variations du niveau piézométrique entre le mois de Janvier 2007 et le mois de Mai 2007.

Tableau 27: Variation du niveau piézométrique entre Janvier 2007 et Mai 2007.

Puits	Janvier	Mai	Variation (m)	Puits	Janvier	Mai	Variation (m)
P1	16,03	16,25	0,22	P22	22,47	23,55	1,08
P2	15,98	16,9	0,92	P23	16,95	18,42	1,47
P3	17	17,8	0,8	P24	12,83	14,35	1,52
P4	17,15	18,15	1	P25	20,51	24,35	3,84
P5	15,7	16,65	0,95	P26	17,29	17,64	0,35
P6	13,62	14,75	1,13	P27	14,41	21,15	6,74
P7	14,37	14,75	0,38	P28	26,48	29,95	3,47
P8	13,72	13,95	0,23	P29	17,67	18,05	0,38
P9	14,91	17	2,09	P30	16,22	16,58	0,36
P10	21,6	22,95	1,35	P31	14,79	15,45	0,66
P11	13,27	13,35	0,08	P32	20,71	21,55	0,84
P12	11,44	11,9	0,46	P33	14	14,8	0,8
P13	13,1	14,7	1,6	P34	14,37	15,75	1,38
P14	13,38	13,5	0,12	P35	12,73	14,2	1,47
P15	14,25	14,35	0,1	P36	10,84	11,2	0,36
P16	22,23	23,65	1,42	P37	11,32	11,4	0,08
P17	18,67	19,25	0,58	P38	12,57	12,9	0,33
P18	19,16	19,25	0,09	P39	12,06	12,45	0,39
P19	21,75	22,6	0,85	P40	12,33	12,45	0,12
P20	16,08	16,35	0,27	P41	13,25	14,3	1,05
P21	27,08	28,35	1,27				

L'examen 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 à partir de toutes les bordures au niveau de la région Sud, c'est le Tell Guelmien, alors que pour de la région Nord, c'est le massif de l'Edough et de Belélieta qui assure 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. Idem pour les eaux en provenances des bordures Sud.
- * Deux types d'échanges semblent exister 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 un 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. 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.28).

Tableau 28: Gradient hydraulique de la nappe superficielle (* 10^{-3}).

Région Mois	Nord	Nord-ouest	Sud	Sud-est
Déc 2006	6.67	3.30	2.50	0.42
Jan 2007	7.14	4.54	3.57	0.83
Fev 2007	5.00	4.76	4.00	1.11
Mar 2007	8.33	5.00	5.00	1.25
Avr 2007	9.09	6.67	5.00	1.25
Mai 2007	8.33	5.55	4.76	1.00

D'après les résultats obtenus tableau 2, le gradient hydraulique reste directement lié au niveau piézométrique de la nappe, les faibles valeurs du gradient hydrauliques sont enregistrées au mois de Décembre caractérisé par une faiblesse des précipitations (142,7 mm), par contre, les valeurs maximales du gradient hydrauliques correspondent aux mois de Mars et de Mai caractérisés par une pluviosité importante d'ordre de 203,7 mm.

3.4. Les caractéristiques hydrodynamiques

Plusieurs essais par pompage ont été réalisés au niveau des captant la nappe superficielle, ce qui a aboutit à la détermination des paramètres hydrodynamiques, transmissivité et perméabilité (Zenati. N, 1999).

- **La transmissivité** : les résultats montrent que la transmissivité de la nappe superficielle qui entoure le lac Fetzara varie entre $0.13 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

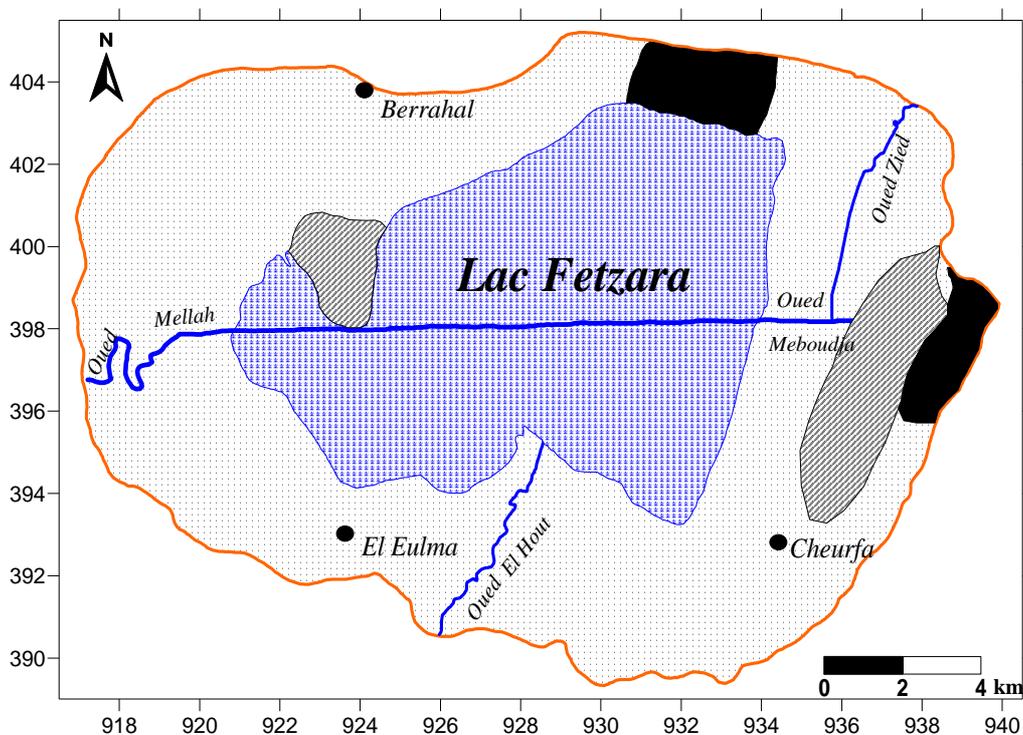
Tableau 29: Transmissivité obtenue dans la région du lac Fetzara.

Points	X (km)	Y (km)	T * $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
1	935.600	395.400	1.4
2	929.600	392.700	0.13
3	930.200	403.650	0.17

- **La perméabilité:** les mesures de la perméabilité verticale selon la méthode de Henin montrent que les valeurs de la perméabilité variant entre $0.11 \cdot 10^{-5}$ m/s et $5 \cdot 10^{-5}$ m/s (Zenati. N, 1999).

L'examen de la carte de la perméabilité verticale fait apparaître trois types de sols (fig.10).

- Les sols peu perméables dont la valeur de la perméabilité verticale est de $0.11 \cdot 10^{-5}$ m/s, ils occupent la partie Nord-est du lac Fetzara.
- Les sols moyennement perméables avec des valeurs de la perméabilité verticale qui oscillent entre $0.11 \cdot 10^{-5}$ et $5 \cdot 10^{-5}$ m/s, caractérisent la majorité de la plaine.
- Les sols perméables dont la valeur de la perméabilité verticale est supérieure à $5 \cdot 10^{-5}$ m/s, caractérisent les régions sableuses (Berrahal et Guantra) (fig.47).



Légende:

-  Sols peu perméables ($0.03 \cdot 10^{-5}$ m/s à $0.11 \cdot 10^{-5}$ m/s)
-  Sols moyennement perméables ($0.11 \cdot 10^{-5}$ m/s à $5 \cdot 10^{-5}$ m/s)
-  Sols perméables (supérieure à $5 \cdot 10^{-5}$ m/s)

Figure 47: Carte de la perméabilité verticale des sols de la région du lac Fetzara
(Zenati, 1999; modifiée)

4. Relations piézométrie, précipitations et recharge

Les mesures piézométriques réalisées nous permettent de déterminer la réponse de la nappe aux précipitations tombées. A cet effet nous nous avons comparé l'évolution du niveau piézométrique au niveau de quelques puits avec les précipitations mensuelles enregistrées au niveau de station des Salines durant la période des mesures piézométrique (Décembre 2006 - Mai 2007) (fig.48).

D'après les résultats du tableau 30, la profondeur de la surface piézométrique varie entre 1.09 et 8.8 m en période des basses eaux, correspondant au mois de décembre 2006, et entre 0.15 et 2.85 m en période des hautes eaux (mars 2007) où les précipitations durant ce mois dépassent les 200 mm, la nappe est sursaturée et le niveau piézométrique coïncide avec la surface topographique dans la plupart des puits. Puis, 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.48).

Tableau 30: Variation des profondeurs de la surface piézométrique (NS en m) (Décembre 2006 – Mai 2007).

Mois \ NS (m)	Min	Max	Moy	P (mm) Les Salines
Décembre 2006	1.09	8.8	2.77	142
Janvier 2007	0.97	8.59	2.7	35.4
Février 2007	0.9	6.3	2.26	51.4
Mars 2007	0.15	2.85	1	203.7
Avril 2007	0.25	3.1	1.22	27
Mai 2007	0.45	3.65	1.74	17

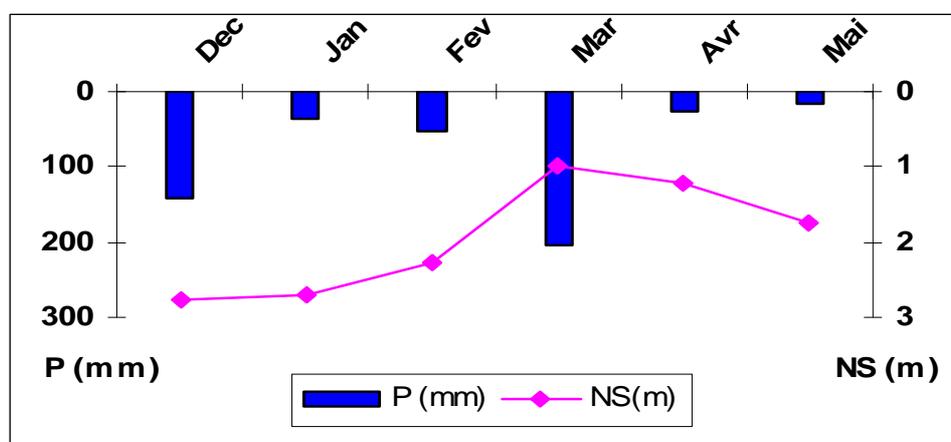


Figure 48: Variation des profondeurs de la surface piézométrique NS (m) en fonction des précipitations P en mm (station des Salines).

Afin de bien 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 au mois de février selon la méthode des chlorures établie par Scholler (1962).

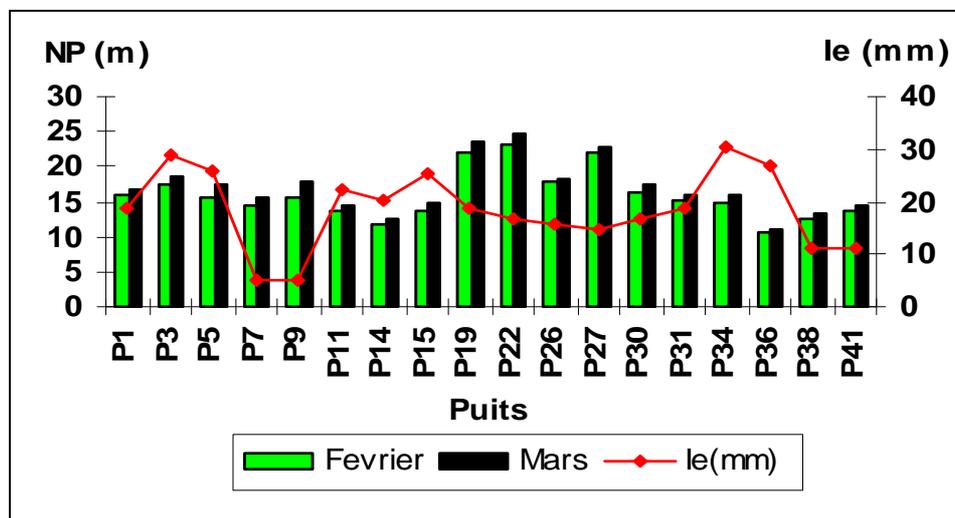


Figure 49: Variation du niveau piézométrique NP (m) en fonction de l'infiltration efficace Ie (mm).

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.

D'après l'histogramme (fig.49), on observe 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 excepté les puits P7 et P9 au Sud-est du lac (commune de 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 $0.13 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, avec des sols moyennement perméables à perméables, où le coefficient de perméabilité varie entre $0.28 \cdot 10^{-5}$ et $5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$.

L'observation des cartes piezométriques réalisées montre 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, quand le second, il montre le drainage du lac et de la nappe par l'oued Meboudja. Les piéments du massif de l'Edough au Nord du lac Fetzara sont caractérisés par les fortes valeurs du gradient hydraulique (variant entre 0.5 et $0.9 \cdot 10^{-2}$). Par contre, le gradient est faible à très faible au Sud du lac Fetzara (Commune de Cheurfa et celle d'El Eulma) et au Sud-ouest de la commune de Berrahal.

Chapitre VI

ETUDE

HYDROCHIMIQUE

La détermination de la qualité des eaux reste importante pour la détermination des usages de l'eau. L'eau destinée à la consommation humaine doit obéir à des critères très spécifiques, par contre ces critères sont moins draconiens pour l'industrie et l'agriculture. C'est pourquoi nous avons accordé un grand intérêt au chapitre relatif à la chimie des eaux.

1. Introduction

La composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, donc la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages (irrigation, industrie...etc.). Dans la région du lac Fetzara, la chimie des eaux (eaux de surface, eaux souterraines) est souvent influencée par l'effet de la dissolution des formations géologiques, l'évaporation des eaux du lac Fetzara, les rejets industriels et l'activité agricole. Et, en raison de l'utilisation multiple de ces eaux, cette étude a été menée afin de contrôler l'état actuel de la chimie des eaux, son évolution dans le temps, dans l'espace et en fonction de la variation des paramètres physico-chimiques de l'eau.

Pour cet objectif, un suivi de six mois a été réalisé (Décembre 2006 au Mai 2007). On a effectué trois campagnes d'échantillonnages (Janvier 2007, Mars 2007 et Mai 2007) pour un total de 95 échantillons, les analyses effectuées se rapportent aux eaux de surface à savoir ; oued Mellah, oued El Hout, oued Zied (les entrées du lac Fetzara) et oued Meboudja (vidange du lac Fetzara) avec 50 échantillons et aux eaux souterraines des nappes entourant le lac pour 45 échantillons. L'ensemble des points d'échantillonnages (puits, oueds) est matérialisé sur la carte d'inventaire (fig.50).

Mesures in situ : deux paramètres physico-chimiques (pH, conductivité) sont mesurés *in situ*, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon et durant les mesures piezométriques à l'aide d'un pH mètre et d'un conductimètre.

Analyse des éléments chimiques : une analyse complète des éléments chimiques a été effectuée pour cette étude : les éléments majeurs (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{-2} et HCO_3^-), le cycle de l'azote et les phosphates (NO_3^- , NO_2^- et PO_4^{-3}), et les éléments métalliques en traces (Fe (total), Mn^{+2} , Cr (total), Ni^{+2} , Zn^{+2} , Pb^{+2} , Cu^{+2}).

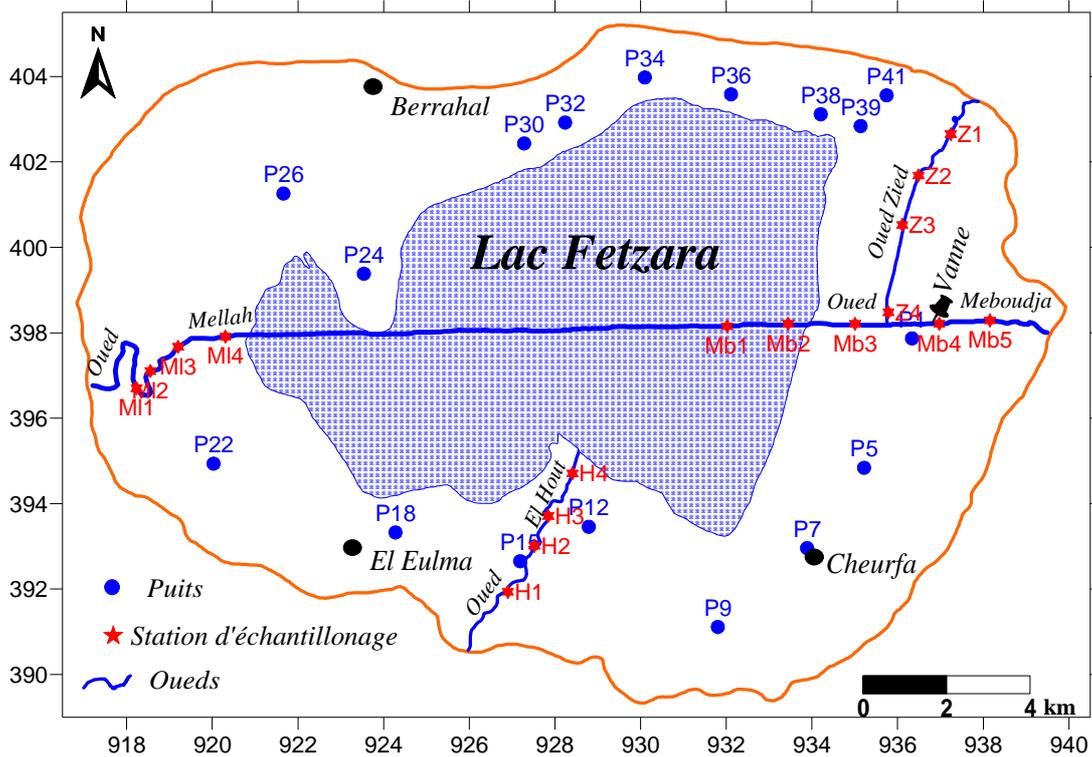


Figure 50: Carte d'inventaire des points analysés.

2. Les eaux souterraines

La qualité des eaux reste un atout important pour déterminer l'utilisation de ces eaux. Cette qualité diffère d'un horizon à un autre ce qui oblige le chercheur à donner les indications concernant chaque horizon étudié. Dans ce travail nous nous intéressons aux eaux prélevées à différentes profondeurs. Notons que les éléments majeurs et les éléments traces ont été dosés.

2.1. Eléments majeurs

2.1.1. Statistiques élémentaires

L'étude statistique réalisée porte sur 45 échantillons prélevés au cours des mois de Janvier, Mars et Mai 2007 sur les eaux souterraines. Le tableau suivant (tab.31), montre que la conductivité des eaux varie de manière significative, elle passe de 385 à 10740 μcm , ce qui implique que les eaux peuvent atteindre une salinité conséquente. Au niveau des éléments majeurs on retrouve la même évolution pour les éléments suivants : Na^+ , HCO_3^- et Cl^- . Cette évolution semble dictée par la pluviométrie. En effet les précipitations enregistrées au cours des mois considérées n'est pas identique et par conséquent influence les eaux différemment. Pour visualiser les liens existant entre les éléments chimiques nous allons réaliser une analyse en composantes principales.

Tableau 31: Variations des concentrations des éléments majeurs des eaux souterraines.

Libellé de la variable	Effectif	Poids	Moyenne	Ecart-type	Min	Max
CE	45	45.00	1582.33	1645.12	385.00	10740.0
Ca ⁺²	45	45.00	59.20	34.12	18.40	167.00
Mg ⁺²	45	45.00	64.04	31.61	10.56	156.48
Na ⁺	45	45.00	300.63	144.47	104.05	663.24
K ⁺	45	45.00	5.28	4.94	0.00	24.91
HCO ₃ ⁻	45	45.00	362.45	108.22	169.58	611.22
Cl ⁻	45	45.00	414.95	316.37	78.10	1368.00
SO ₄ ⁻²	45	45.00	162.28	95.48	42.85	418.08

2.1.2. Analyse en composantes principales

L'ACP, a pour but la détermination des liens existants entre les éléments et leurs origines. Dans le cas présent on a utilisé 45 analyses chimiques et huit variables. Le nombre de variable huit a été pris après plusieurs essais, en effet quelques variables tel que le pH ont diminué l'inertie totale et de ce fait ont été éliminés. L'inertie ou l'information totale donnée dans le cas présent est de 57 %, alors qu'avec les autres éléments elle ne dépasse pas 35 %.

2.1.2.1. Observation du cercle ACP

Le cercle formé par les deux axes F1F2, montre selon l'axe horizontal F1 (37%), une opposition entre les eaux fortement minéralisées (riches en chlorures, bicarbonates, magnésium et sodium) et occupant la partie négative de l'axe F1, s'opposent aux eaux faiblement minéralisées caractérisant la partie positive de l'axe F1 (fig.51). Au niveau de l'axe F1, on retrouve la même variation que celle observée au niveau du tableau 31.

Concernant l'axe vertical F2 (20%), on note une opposition entre le potassium et les sulfates. Cette évolution confirme bien l'effet des précipitations sur la composition chimique des eaux. Lors des pluies, les apports en eau vers le lac en provenance du massif de l'Edough et par le biais des interactions eau roche, enrichissent les eaux en potassium contenu dans les formations métamorphiques (*in Majour, 1996*). Notons par ailleurs que les faibles concentrations en sulfates sont surtout dues au fait que les formations évaporitiques sont absentes dans cette zone (*in Djabri, 2007*).

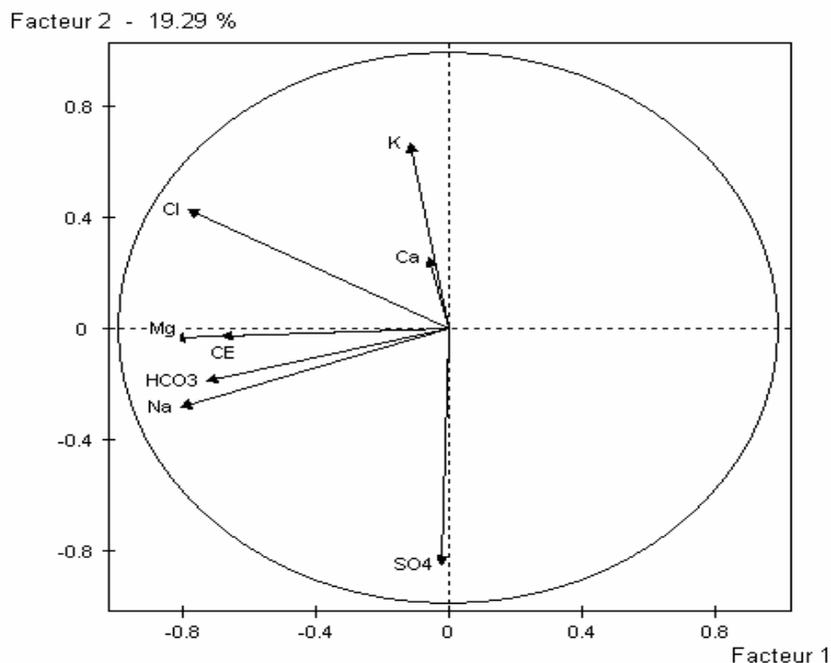


Figure 51 : Cercle ACP des eaux souterraines (Eléments majeurs).

Pour confirmer l'hypothèse avancée nous avons comparé la variation des concentrations du potassium et des sulfates entre deux périodes de prélèvement suivantes mois de Janvier et mois de Mars 2007 (tab.32).

Tableau 32: Variations du Potassium et des Sulfates entre les mois de Janvier et Mars 2007.

Puits	Sulfates (SO_4^{-2} en mg/l)		Potassium (K^+ en mg/l)	
	Janvier 2007	Mars 2007	Janvier 2007	Mars 2007
P1	117,60	53,76	11,70	24,91
P5	204,00	184,80	6,08	9,42
P7	82,56	107,52	12,30	0,02
P9	73,44	60,00	11,98	1,12
P12	76,32	306,24	2,10	0,57
P15	201,60	84,96	9,70	11,63
P18	92,64	143,04	7,60	6,65
P22	254,40	42,85	2,30	0,00
P24	171,84	70,56	2,58	2,34
P26	84,00	66,24	1,78	0,66
P30	245,76	293,76	3,25	1,68
P32	239,04	156,00	6,70	7,21
P34	90,72	117,60	1,12	0,57
P36	197,76	238,56	1,48	1,12
P38	87,84	293,76	2,31	0,02
P41	99,84	85,44	5,66	4,44

On remarque surtout une baisse très sensible au niveau des sulfates. Ces concentrations peuvent baisser de moitié cas du P24 et P32. Le potassium n'étant pas lui-même important et le temps de séjour des eaux de pluie dans les réservoirs des sources est trop court de ce fait la variation n'est pas encore généralisé.

2.1.2.2. Matrice de corrélation

Cette matrice (tab.33), nous permet de dégager les associations qui peuvent exister entre les éléments chimiques. Dans le cas présent $n = 45$, de ce fait le coefficient de corrélation adopté sera $r = 0.54$. Nous pouvons ainsi dégager les associations suivantes :

CE--Na⁺, $r = 0.49$ Mg⁺²--Na⁺, $r = 0.52$ Na⁺--HCO₃⁻, $r = 0.51$

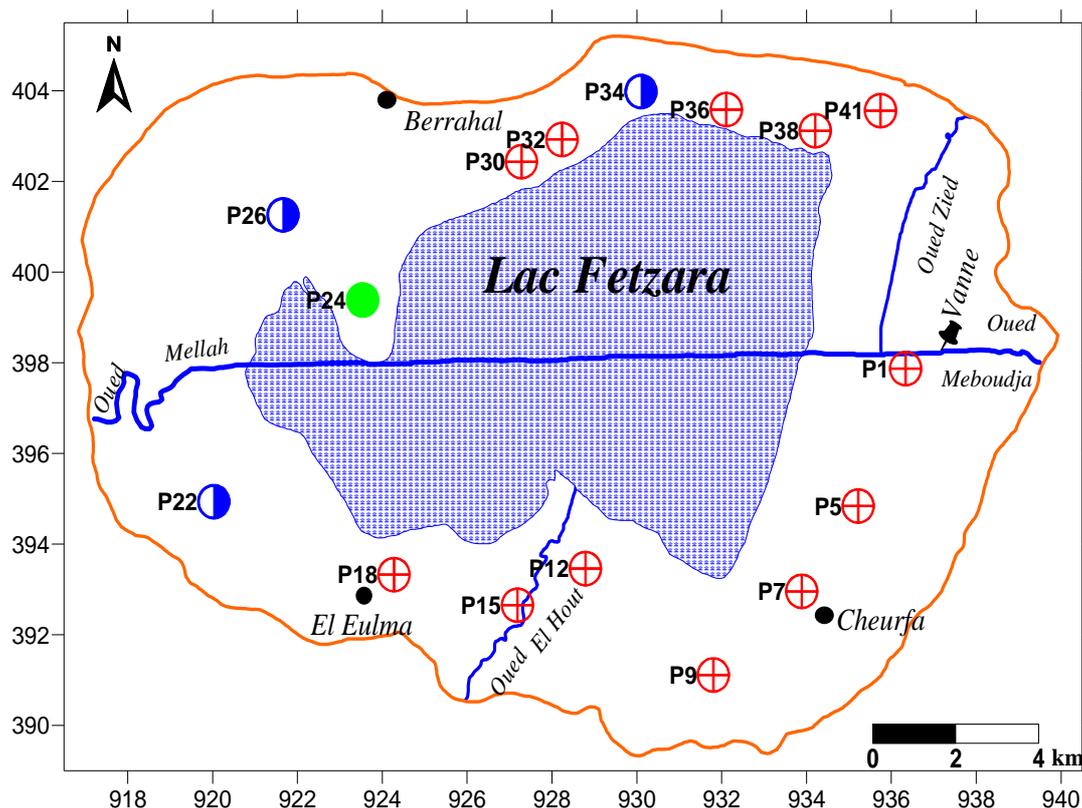
CE--Cl⁻, $r = 0.46$ Mg⁺²--HCO₃⁻, $r = 0.62$ Na⁺--Cl⁻, $r = 0.59$

Mg⁺²--Cl⁻, $r = 0.59$

Tableau 33: Matrice de corrélation des eaux souterraines

	CE	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²
CE	1.00							
Ca ⁺²	0.04	1.00						
Mg ⁺²	0.39	0.19	1.00					
Na ⁺	0.49	-0.18	0.52	1.00				
K ⁺	0.01	0.04	0.10	-0.03	1.00			
HCO ₃ ⁻	0.36	0.01	0.62	0.51	-0.01	1.00		
Cl ⁻	0.46	0.09	0.59	0.59	0.22	0.33	1.00	
SO ₄ ⁻²	0.01	-0.04	0.13	0.25	-0.30	0.08	-0.38	1.00

Nous remarquons que la salinité des eaux est particulièrement due aux chlorures et au sodium. Les eaux sont caractérisées par la présence de trois faciès chimiques : chloruré sodique, chloruré calcique et bicarbonaté sodique (fig.52).

**Légende:**

- | | |
|---|---|
|  <i>Faciès chloruré sodique</i> |  <i>Faciès bicarbonaté sodique</i> |
|  <i>Faciès chloruré calcique</i> |  <i>Oueds</i> |

Figure 52 : Faciès chimiques des eaux souterraines (Mars 2007).

2.2. Eléments traces métalliques

2.2.1. Analyse en composantes principales

Le traitement réalisé a donné une inertie totale de 52.99 % pour les deux axes F1 et F2.

Le cercle ACP, selon l'axe F1 (31.45 %), met en évidence deux oppositions (fig.53):

- la première entre les nitrates et les phosphates,
- la deuxième se fait entre le cuivre d'un côté et le plomb et le nickel de l'autre.

Selon l'axe F2 (21.54%), on remarque que les précédents éléments accompagnés du manganèse s'opposent au zinc.

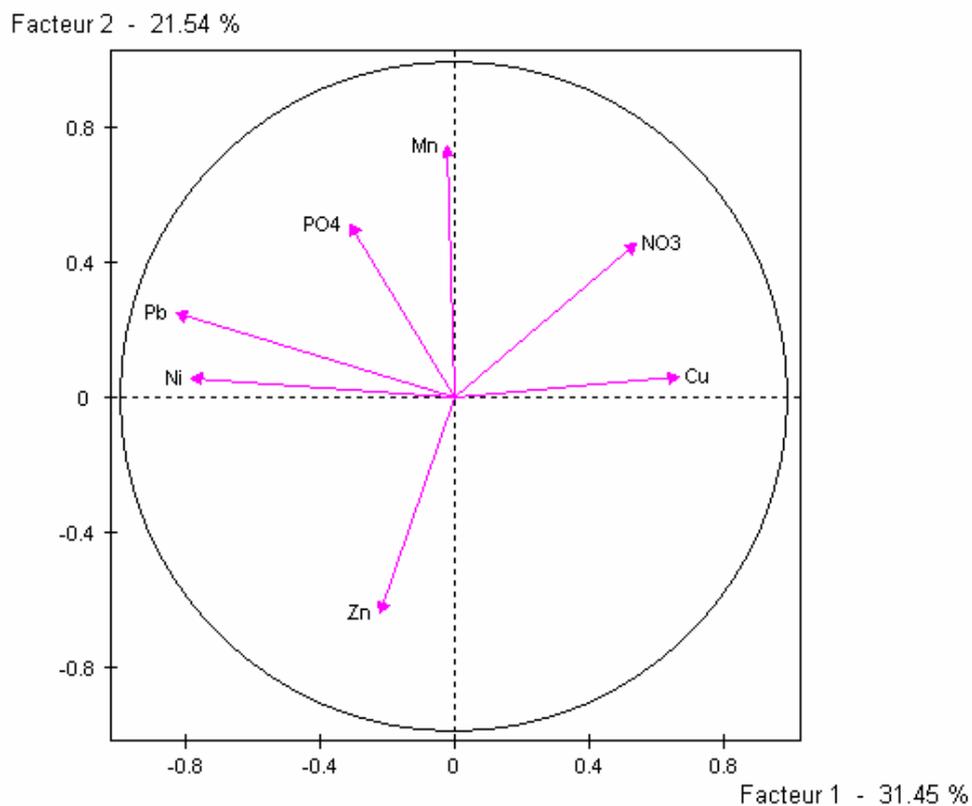


Figure 53: Cercle ACP des eaux souterraines (Eléments traces métalliques).

3. Les eaux de surface

Les analyses chimiques des eaux de surface (oued Mellah, Zied, El Hout et Meboudja) ont été effectuées sur 50 observations se rapportant à trois campagnes d'échantillonnages (Janvier, Mars et Mai 2007).

3.1. Eléments majeurs

3.1.1. Statistiques élémentaires

Les concentrations observées au niveau des eaux de surface (oued Meboudja, Zied, El Hout et Mellah) sont reportées dans le tableau ci-après (tab.34).

Tableau 34: Variations des concentrations des éléments majeurs des eaux de surface.

Libellé de la variable	Effectif	Poids	Moy	Ecart-type	Min	Max
Q	35	35.00	0.28	0.37	0.002	1.232
CE	50	50.00	1474.40	775.83	258.00	3080.00
Ca ⁺²	50	50.00	82.22	26.96	22.40	131.20
Mg ⁺²	50	50.00	57.22	33.96	8.88	119.28
Na ⁺	50	50.00	294.83	132.64	20.70	494.50
HCO ₃ ⁻	50	50.00	238.54	32.70	123.22	291.58
Cl ⁻	50	50.00	454.83	243.08	71.00	880.40
SO ₄ ⁻²	50	50.00	121.23	66.31	24.00	299.04

On remarque qu'au niveau des cations le sodium domine tandis que pour les anions il y a une compétition entre les chlorures et les bicarbonates, cette compétition serait liée à la période de prélèvement (Janvier, Mars et Mai 2007) caractérisant une période pluvieuse.

3.1.2. Matrice de corrélation

La matrice de corrélation (tab.35) présente les différentes corrélations entre les variables prises deux à deux, elle nous permet de dégager les associations suivantes :

$$\text{CE} \text{---} \text{Ca}^{+2}, r = 0.64 \quad \text{CE} \text{---} \text{Cl}^-, r = 0.94$$

$$\text{CE} \text{---} \text{Mg}^{+2}, r = 0.64 \quad \text{Ca}^{+2} \text{---} \text{SO}_4^{-2}, r = 0.61$$

$$\text{Na}^+ \text{---} \text{Cl}^-, r = 0.89$$

Tableau 35: Matrice de corrélation des eaux de surface.

	CE	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²
CE	1.00						
Ca ⁺²	0.64	1.00					
Mg ⁺²	0.64	0.41	1.00				
Na ⁺	0.85	0.46	0.31	1.00			
K ⁺	0.22	0.07	-0.27	0.39	1.00		
Cl ⁻	0.94	0.51	0.57	0.89	0.28	1.00	
SO ₄ ⁻²	0.25	0.61	0.14	0.34	-0.18	0.15	1.00

3.1.3. Observation du cercle ACP

Le cercle réalisé par les deux F1F2, montre selon l'axe horizontal F1 (52.32 % de la variance), une opposition entre les eaux fortement minéralisées (riches en chlorures, magnésium et sodium) et occupant la partie positive de l'axe F1 et s'opposent aux eaux faiblement minéralisées caractérisant la partie négative de l'axe F1 (fig.54).

Selon l'axe F2 (20.94 % de la variance) on observe une opposition entre le calcium (Ca^{+2}) et les bicarbonatés (HCO_3^-) (fig.54).

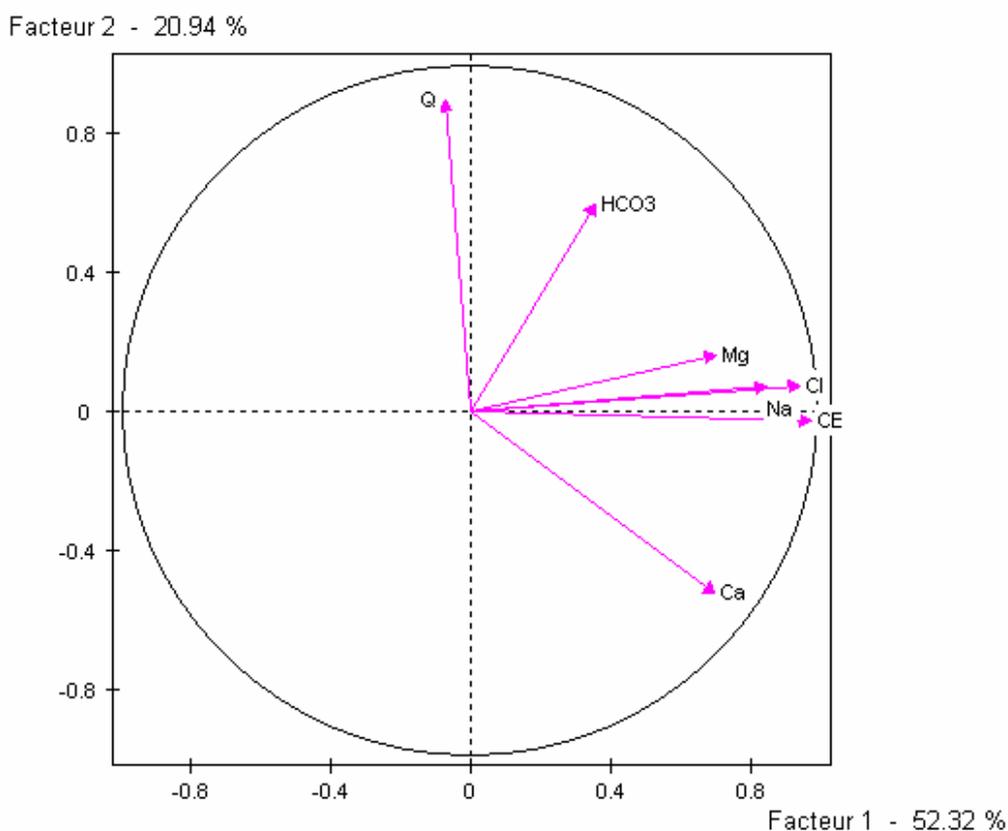
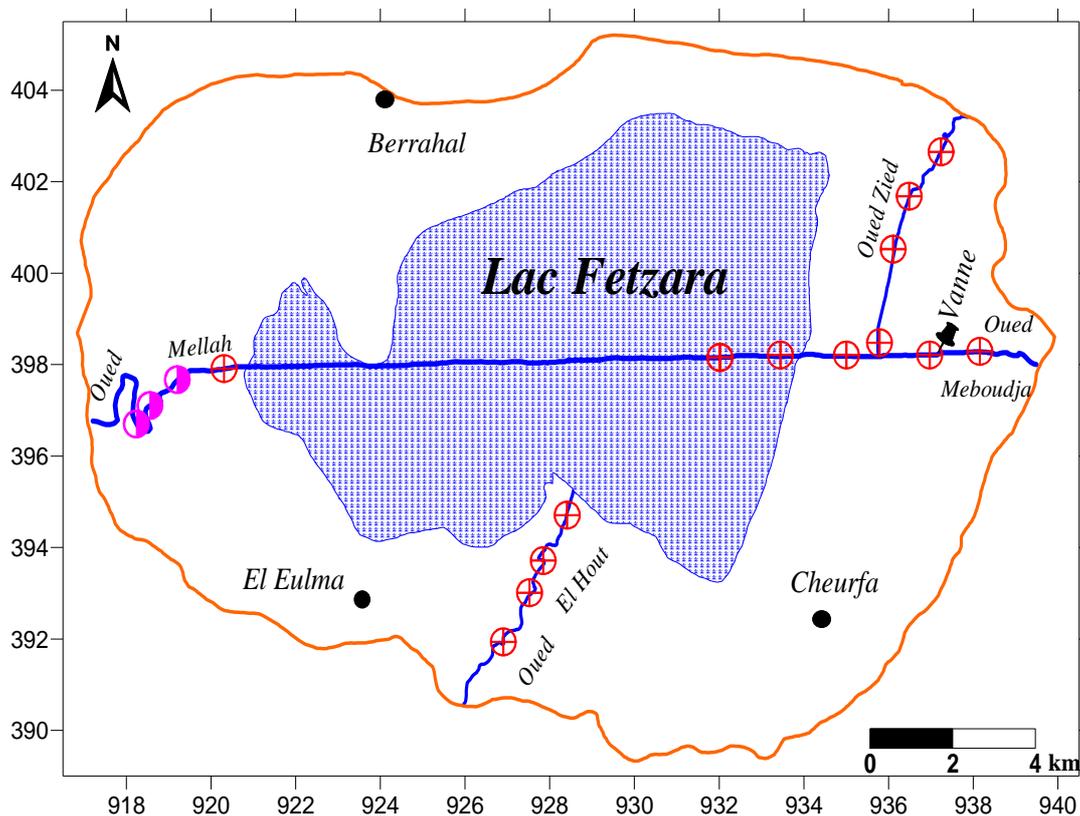


Figure 54 : Cercle ACP des eaux de surface (Eléments majeurs).

La carte ci-dessous (fig.55) montre que les eaux superficielles de la région du lac Fetzara sont caractérisées par la présence de deux faciès chimiques dominants, l'un chloruré sodique caractérise les eaux de oued Meboudja, oued Zied, oued El Hout et l'aval de oued Mellah (Mel4). L'autre bicarbonaté sodique caractérise les eaux de oued Mellah. Ce faciès serait lié aux échanges de bases.



Légende:

- ⊕ *Faciès chloruré sodique*
- *Faciès bicarbonaté sodique*
- ~ *Oueds*

Figure 55 : Faciès chimiques des eaux de surface (Mars 2007).

4. Evolution des concentrations- débits :

4.1. Eléments majeurs :

4.1.1. Oued Zied : on remarque deux évolutions (fig.56, 57, 58) :

La première indique que le débit et l'élément chimique considéré évoluent de la même manière, c'est le cas de tous les éléments à l'exception du potassium et du calcium. Cette situation serait due au fait qu'au niveau du point de prélèvement 3, il y a apport conséquent en calcium qui s'accompagne d'une baisse du potassium.

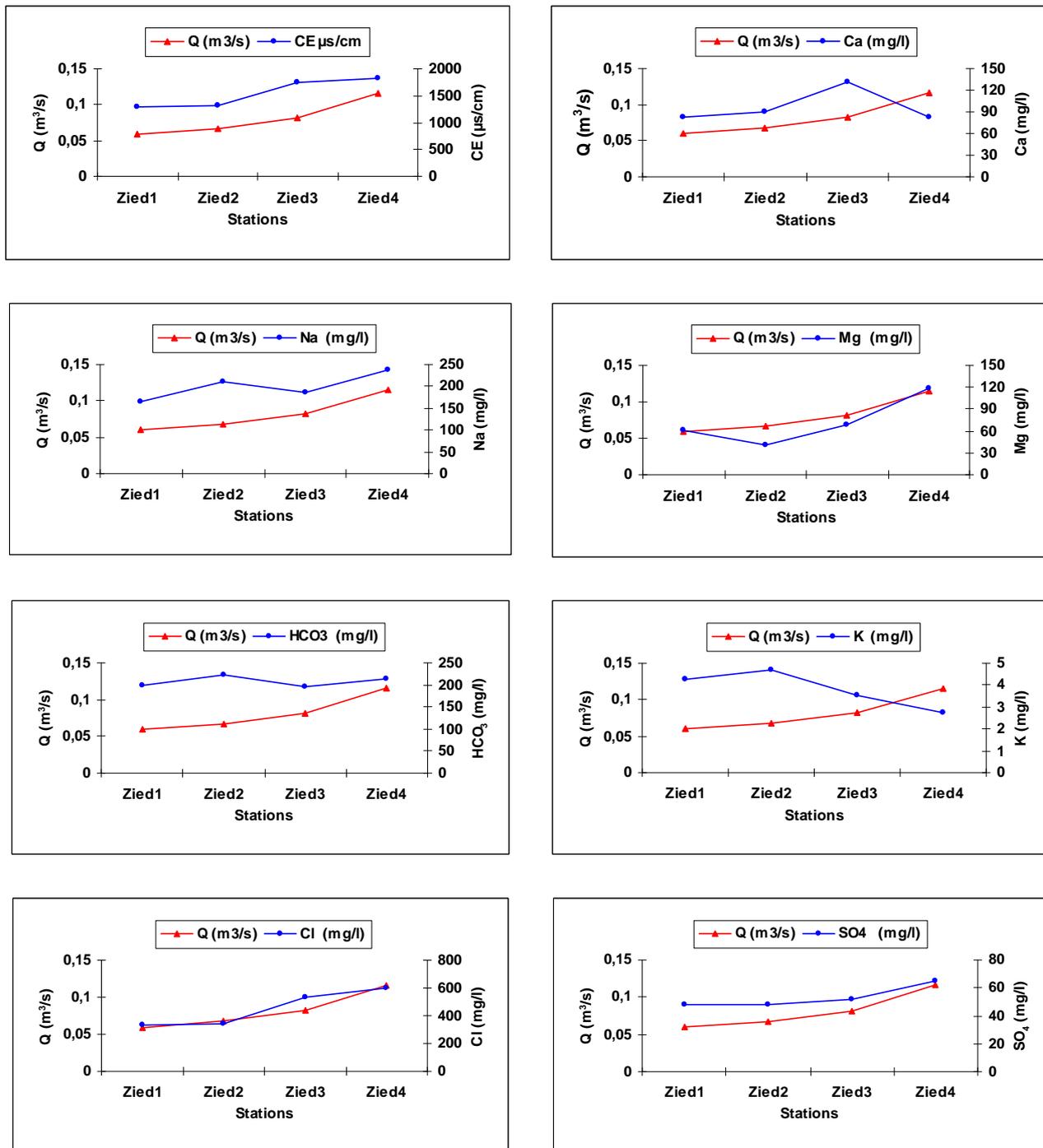


Figure 56: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Zied (Janvier 2007).

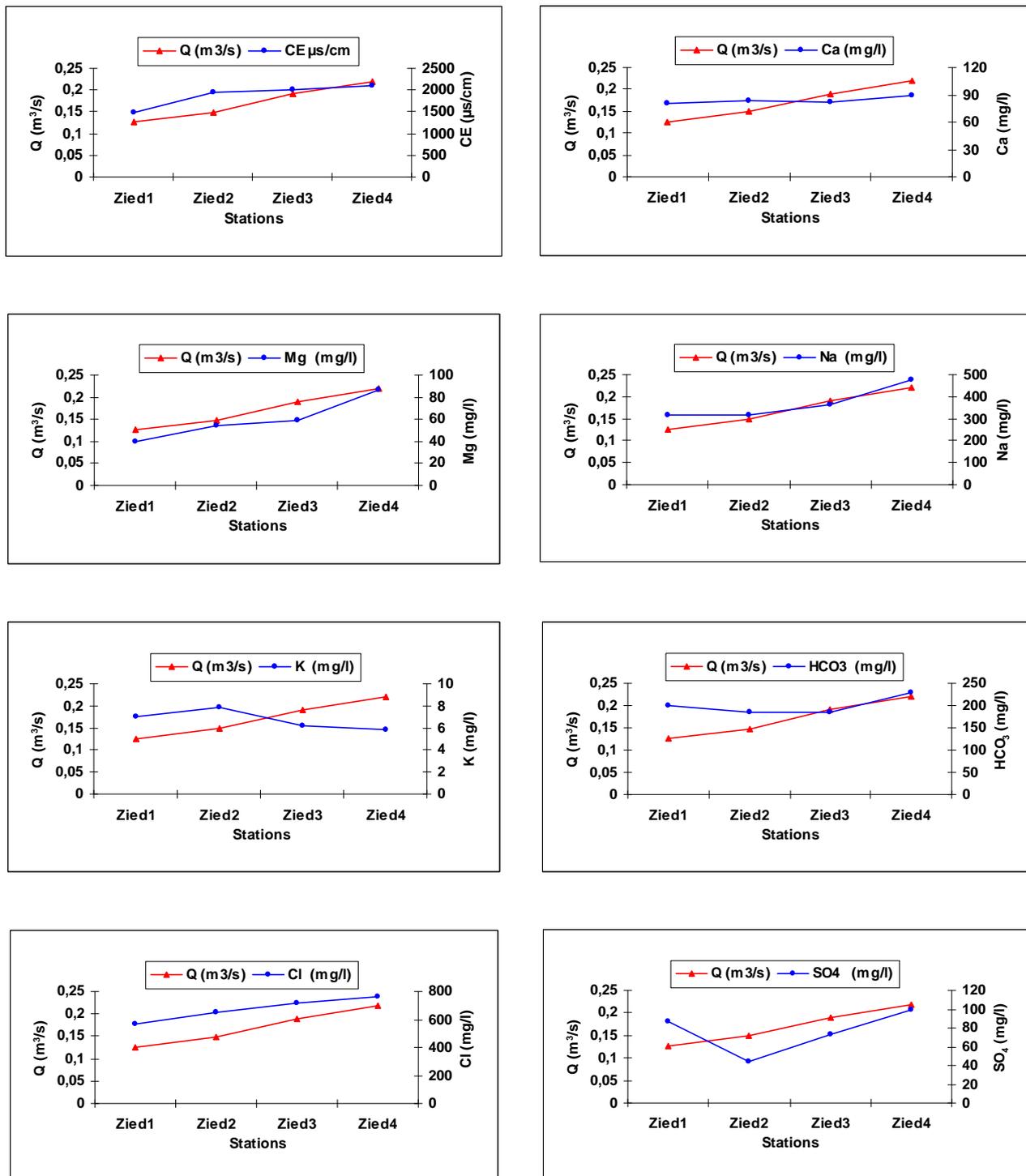


Figure 57: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Zied (Mars 2007)

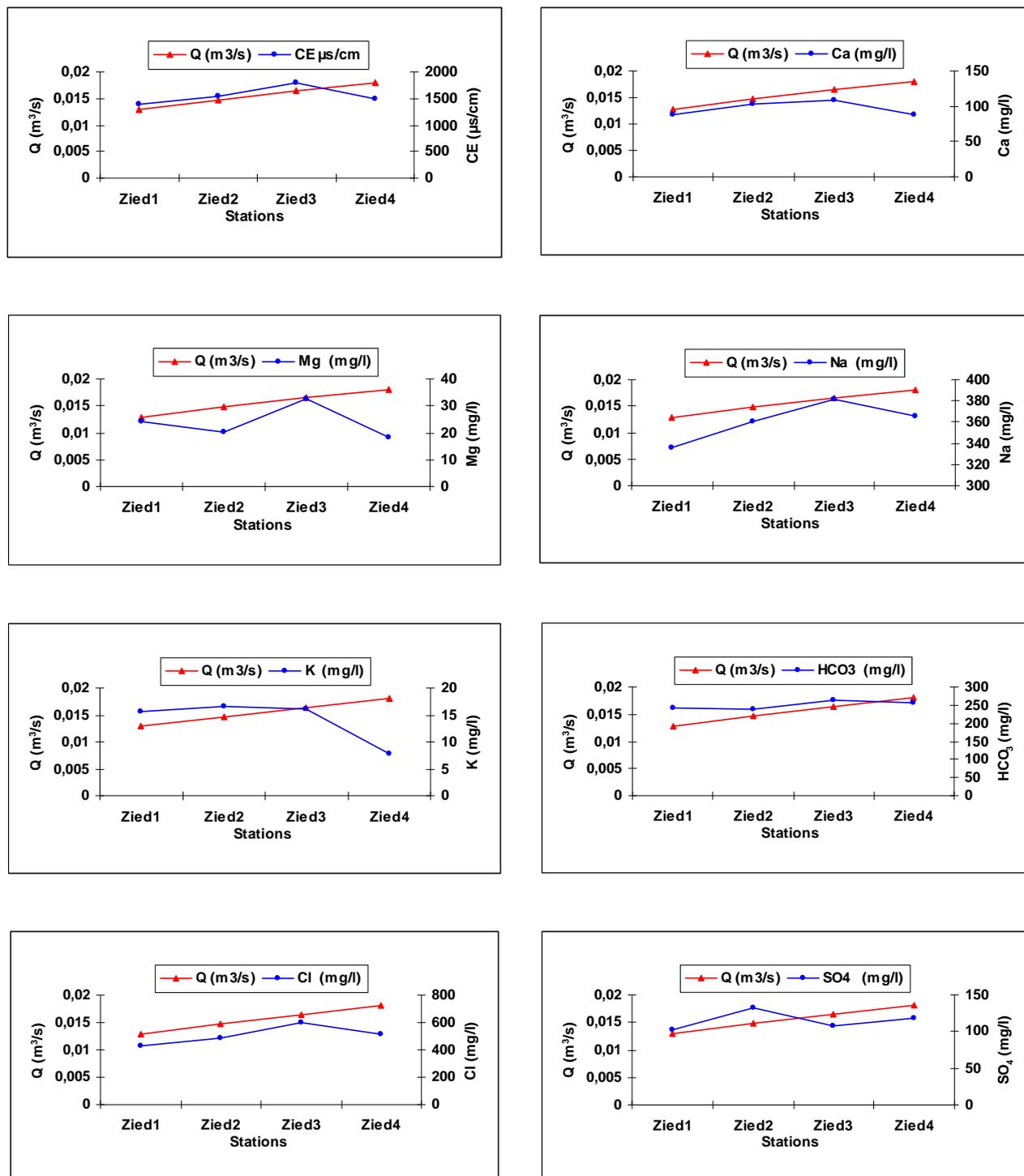


Figure 58: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Zied (Mai 2007).

4.1.2. Oued El Hout : au niveau de cet oued l'évolution diffère par rapport au précédent, à titre indicatif nous remarquons que le calcium évolue avec le débit par contre le magnésium au niveau des points 3 et 4, s'oppose au débit. Nous remarquons également une évolution inverse entre le débit et le potassium au niveau des quatre points de mesure. Par ailleurs la conductivité et le sodium n'évoluent pas de la même manière que les débits au niveau du point 4, elles restent importantes ce qui laisse supposer une absence de dilution (fig.59,60,61).

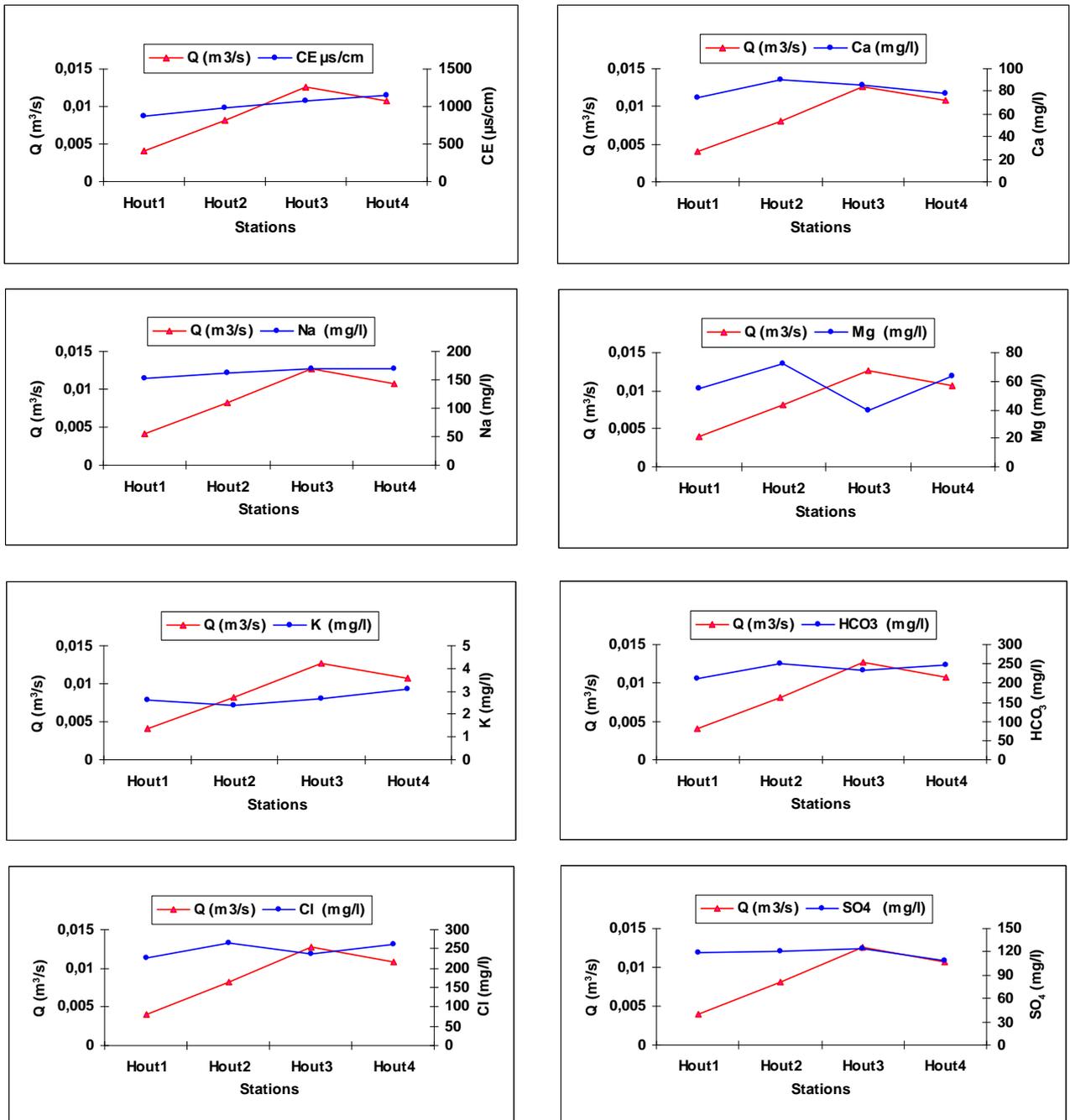


Figure 59: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de l'oued El Hout (Janvier 2007).

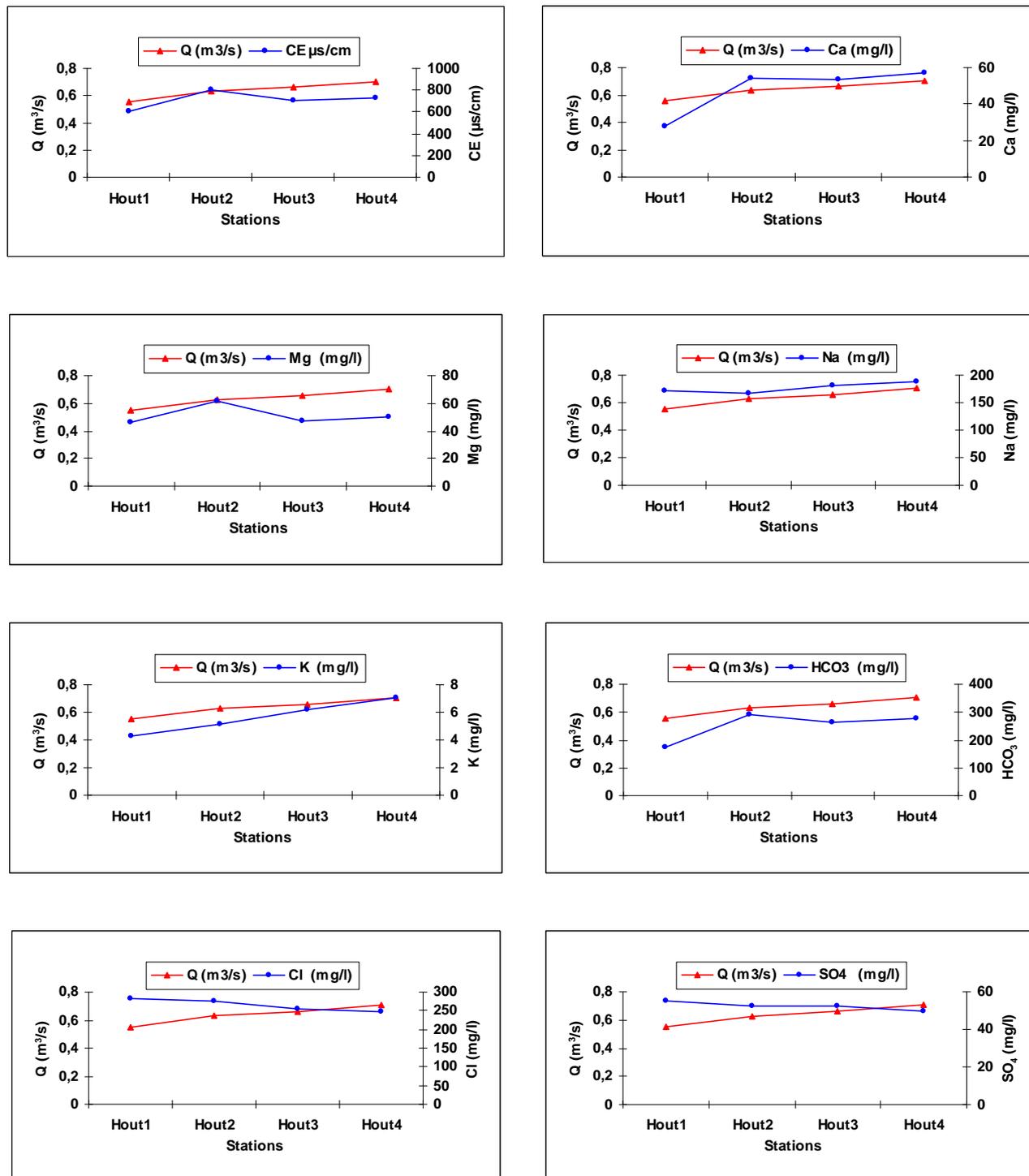


Figure 60: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued El Hout (Mars 2007).

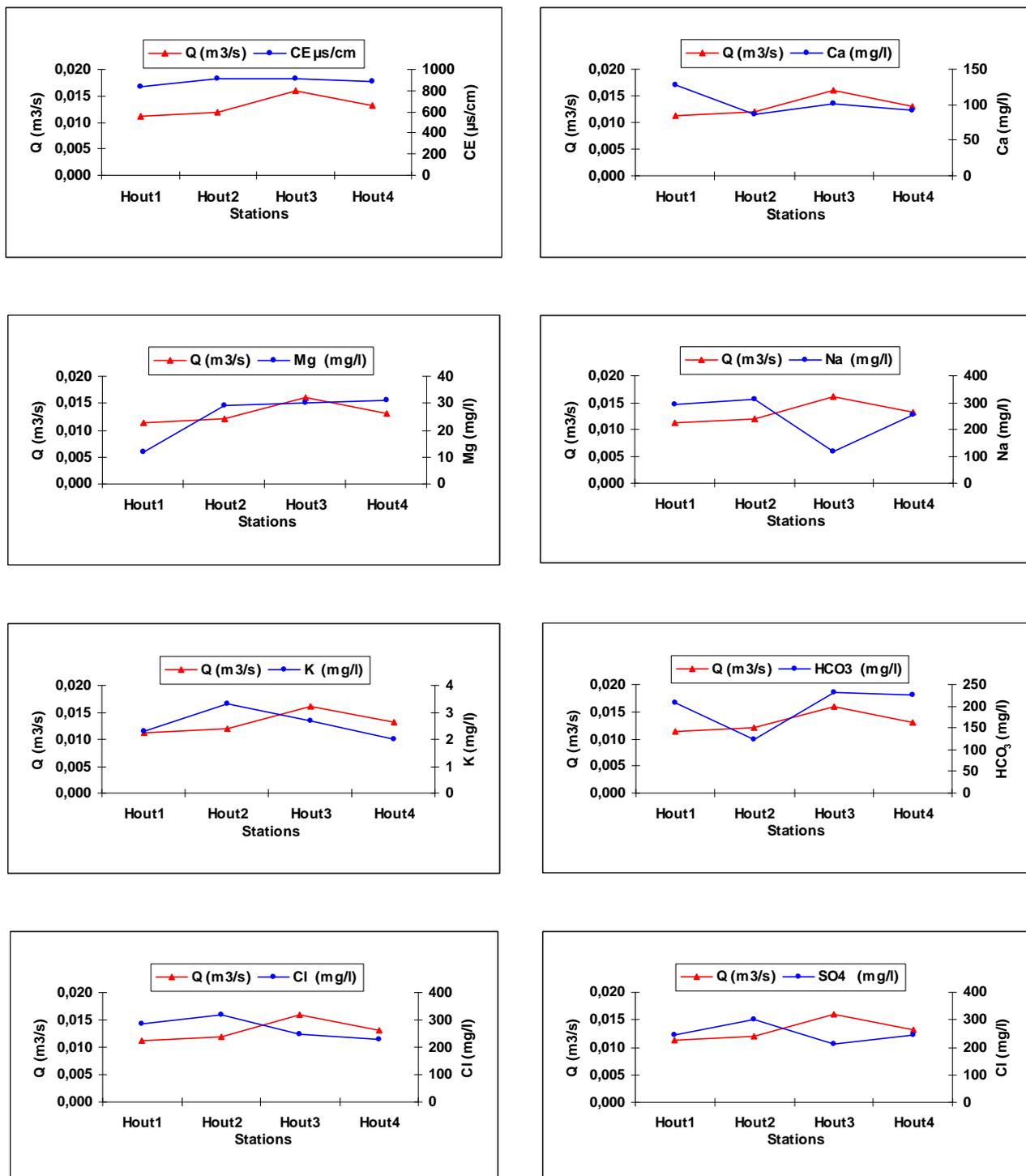


Figure 61: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued El Hout (Mai 2007).

4.1.3. Oued Mellah : nous remarquons une évolution analogue entre les différentes concentrations et les débits au niveau de trois points (Mel1, Mel2 et Mel3), par contre, au niveau de la station Mel4 (vers le lac), il y a opposition par rapport au débit. Nous remarquons aussi une évolution inverse entre le débit et le sodium au niveau des quatre points de mesure. Les sulfates n'évoluent pas de la même manière que les débits durant la deuxième campagne (Mars 2007) (fig.62, 63).

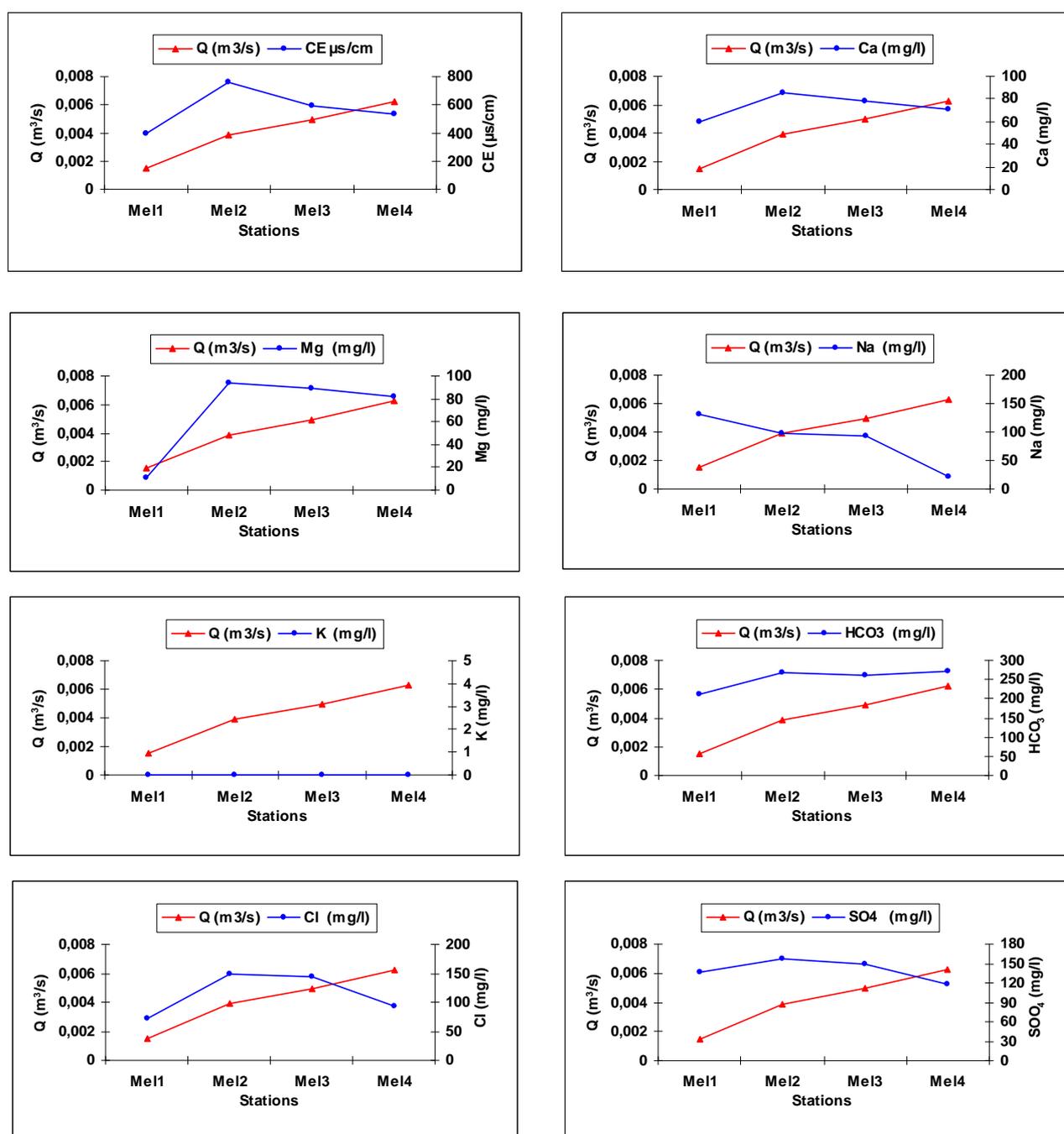


Figure 62: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Mellah (Janvier 2007).

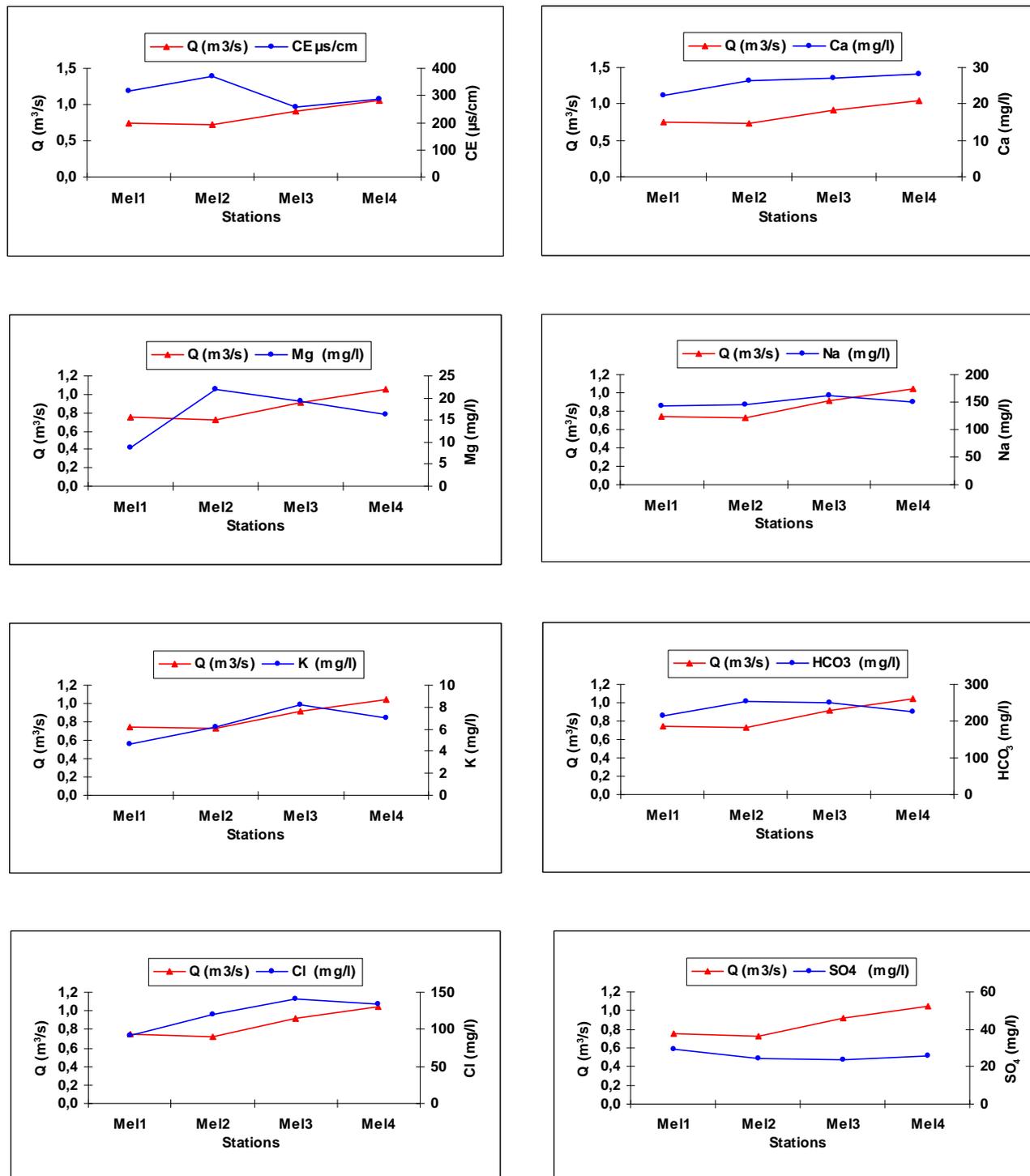


Figure 63: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Mellah (Mars 2007).

4.2. Eléments traces métalliques

4.2.1. Oued Zied : d'une manière générale, on remarque que les concentrations des éléments traces métalliques au niveau de oued Zied évoluent inversement par rapport au débit.

Les nitrates qui suivent la même évolution que le débit caractérisant ainsi un effet de chasse. Lors de la deuxième campagne (Mars 2007), les nitrates, le chrome et le manganèse, présentent des concentrations insignifiantes, probablement due au largage de ces éléments vers d'autres niveaux favorisé par les fortes précipitations (203 mm au mois de mars) (fig.64, 65).

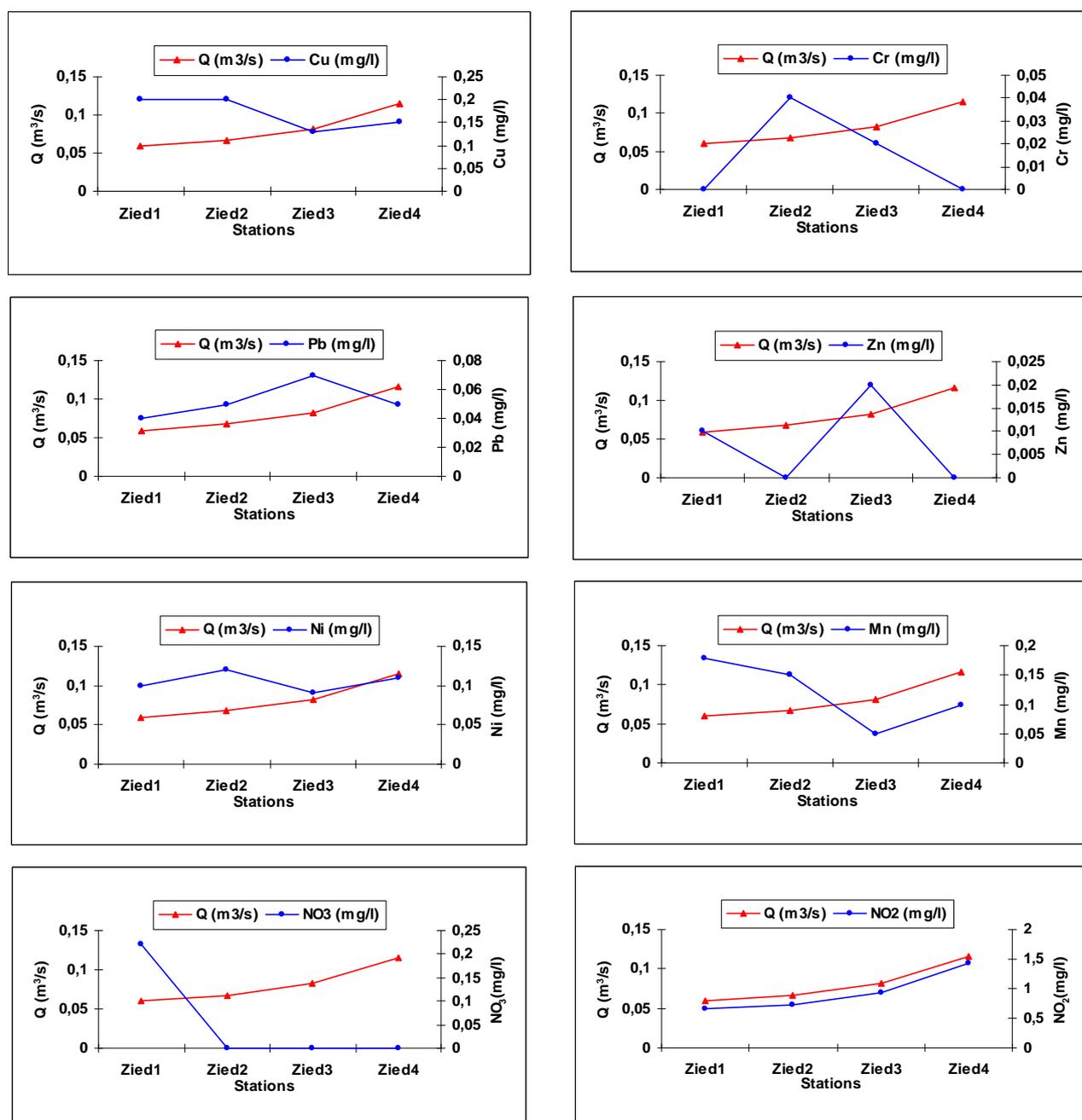


Figure 64: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Zied (Janvier 2007).

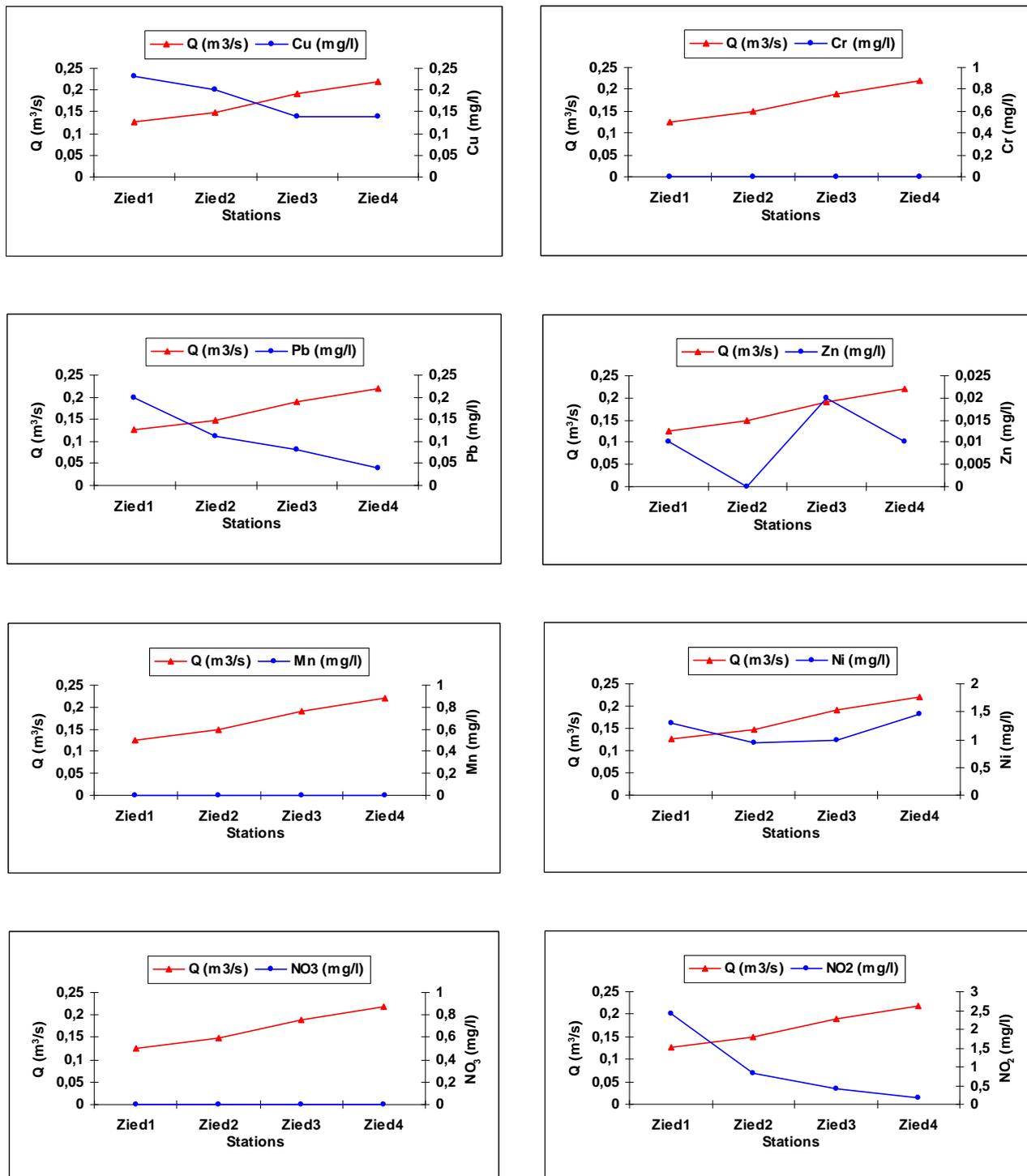


Figure 65 : Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Zied (Mars 2007)

4.2.2. Oued El Hout : on observe une évolution irrégulière. Les plus fortes concentrations sont enregistrées au niveau de la station (Hout3) (fig.66, 67). Lors de la deuxième campagne on remarque la disparition de quelques éléments, tel que les nitrates et le chrome, qui sont évacués vers d'autres niveaux par les fortes précipitations de ce mois (203 mm).

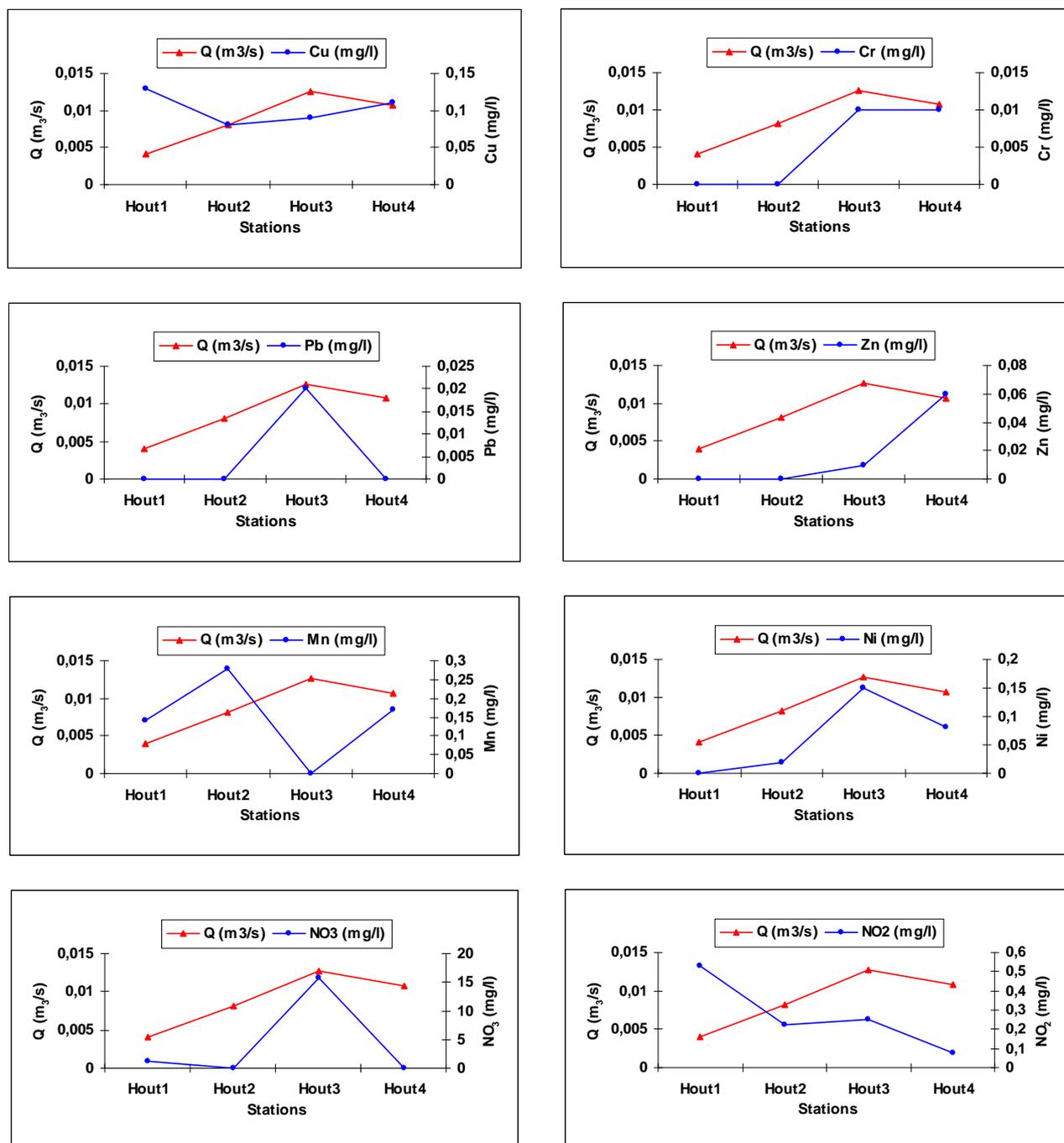


Figure 66: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued El Hout (Janvier 2007)

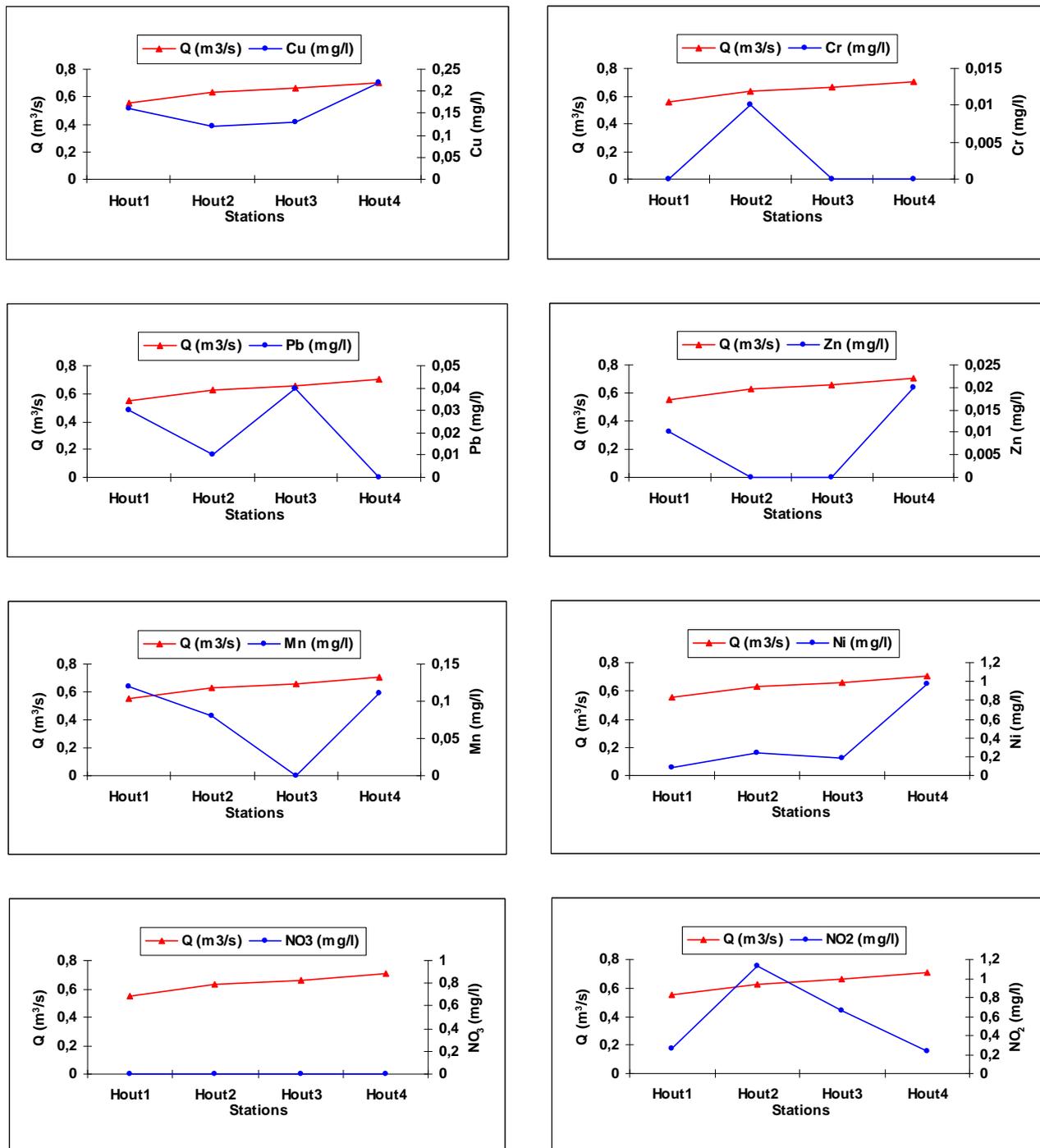


Figure 67: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued El Hout (Mars 2007).

4.2.3. Oued Mellah : on note les évolutions suivantes (fig.68, 69):

- Une évolution irrégulière des concentrations de l'amont vers l'aval, le manganèse et le zinc, évoluent inversement par rapport au débit.
- Les plus fortes concentrations des éléments sont enregistrées aux stations Mel3 et Mel4, ce qui laisse supposer la présence de zone d'apports.
- Quelques éléments présentent des concentrations très faibles au cours de la deuxième campagne (Mars 2007), c'est le cas du chrome et des nitrates.

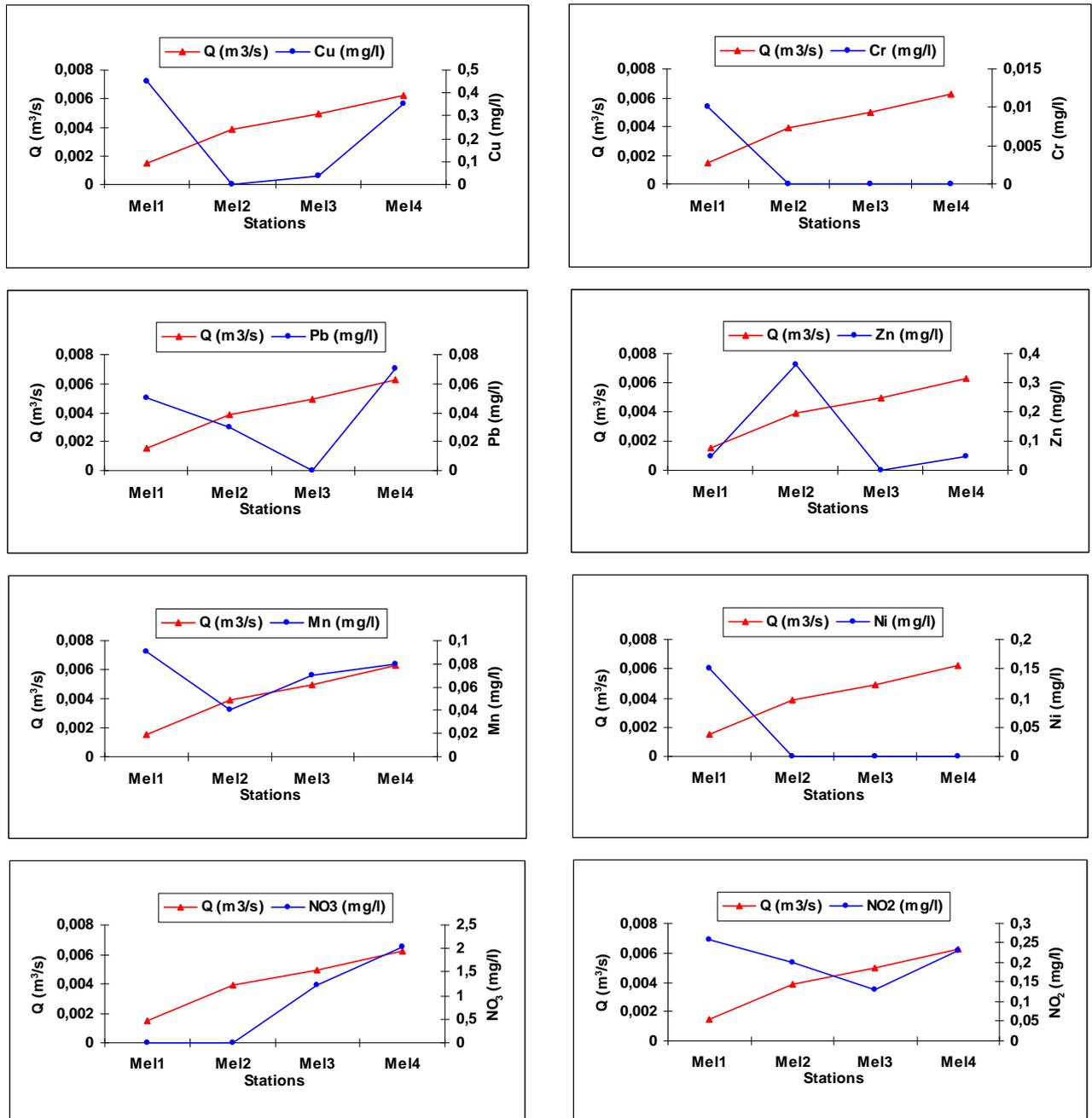


Figure 68: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Mellah (Janvier 2007).

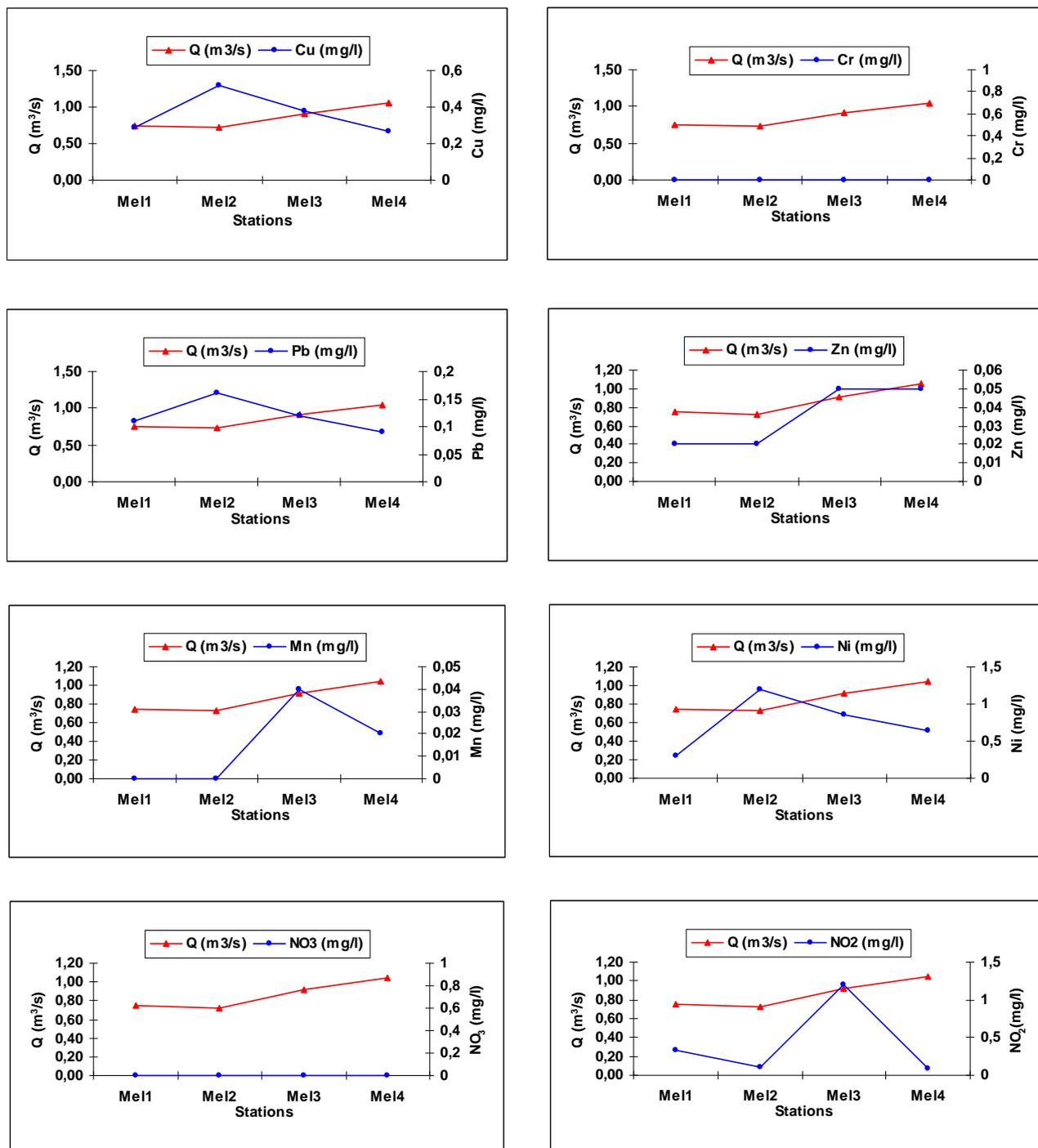


Figure 69: Evolution des différentes concentrations en fonction de débit de oued Mellah (Mars 2007).

5. Evolution des concentrations le long de oued Meboudja

Les courbes d'évolutions des concentrations des eaux d'oued Meboudja durant les trois campagnes d'échantillonnage (Janvier, Mars et Mai 2007) montre une diminution des teneurs des éléments majeurs (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{-2}) pendant la deuxième et la troisième campagne sous l'effet des fortes précipitations (203,7 mm pour le mois de Mars et 17 mm pour le mois de Mai) qui diluent les concentrations.

Le débit atteint les $3.68 \text{ m}^3/\text{s}$, le pH augmente au cours de la troisième campagne (Mai 2007). Les ETM, suivent une évolution irrégulière et parfois il y absence c'est le cas du chrome au cours des campagnes (Mars et Mai 2007) (fig.70, 71).

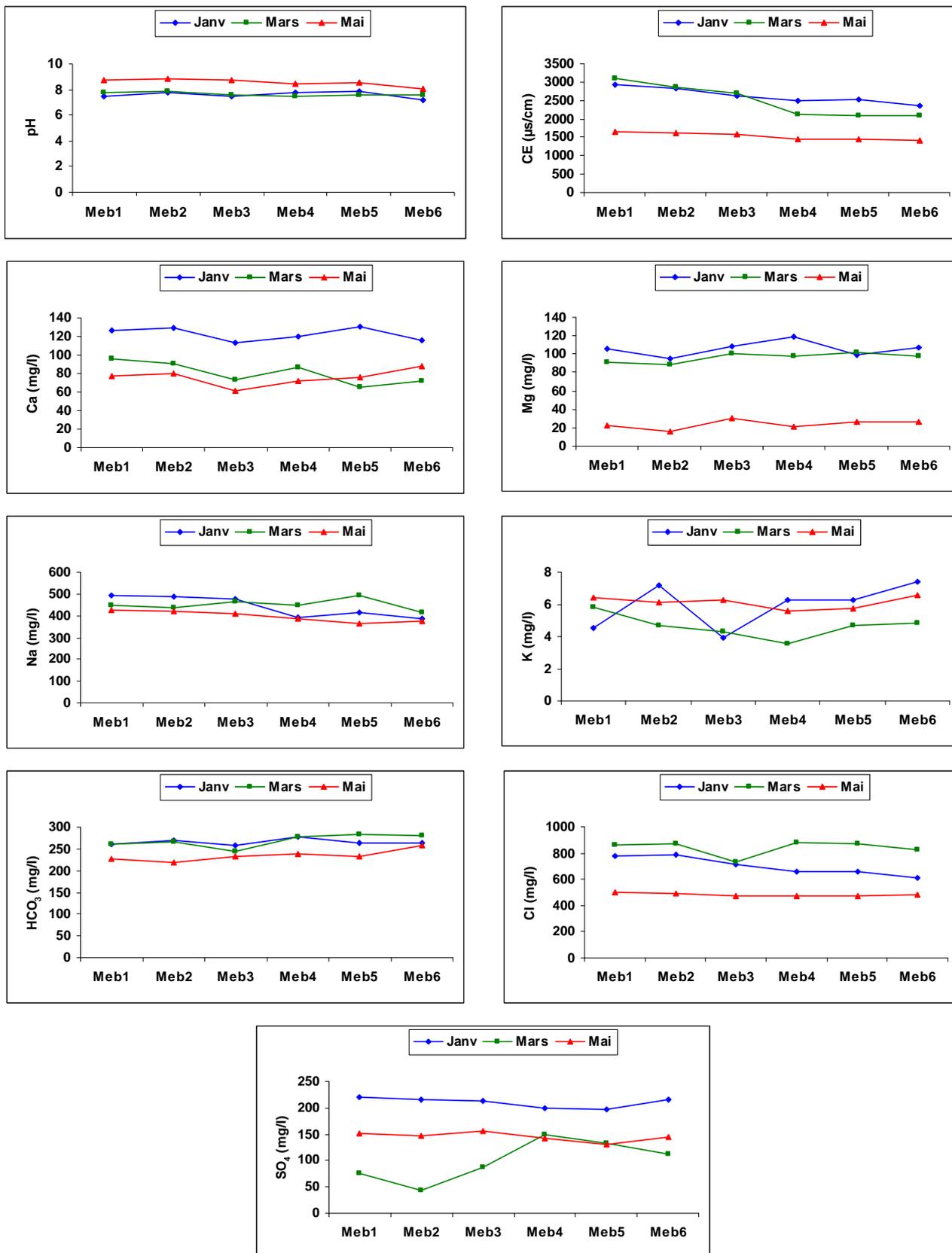


Figure 70: Evolution des concentrations le long de oued Meboudja durant les trois campagnes (Janvier, Mars et Mai 2007).

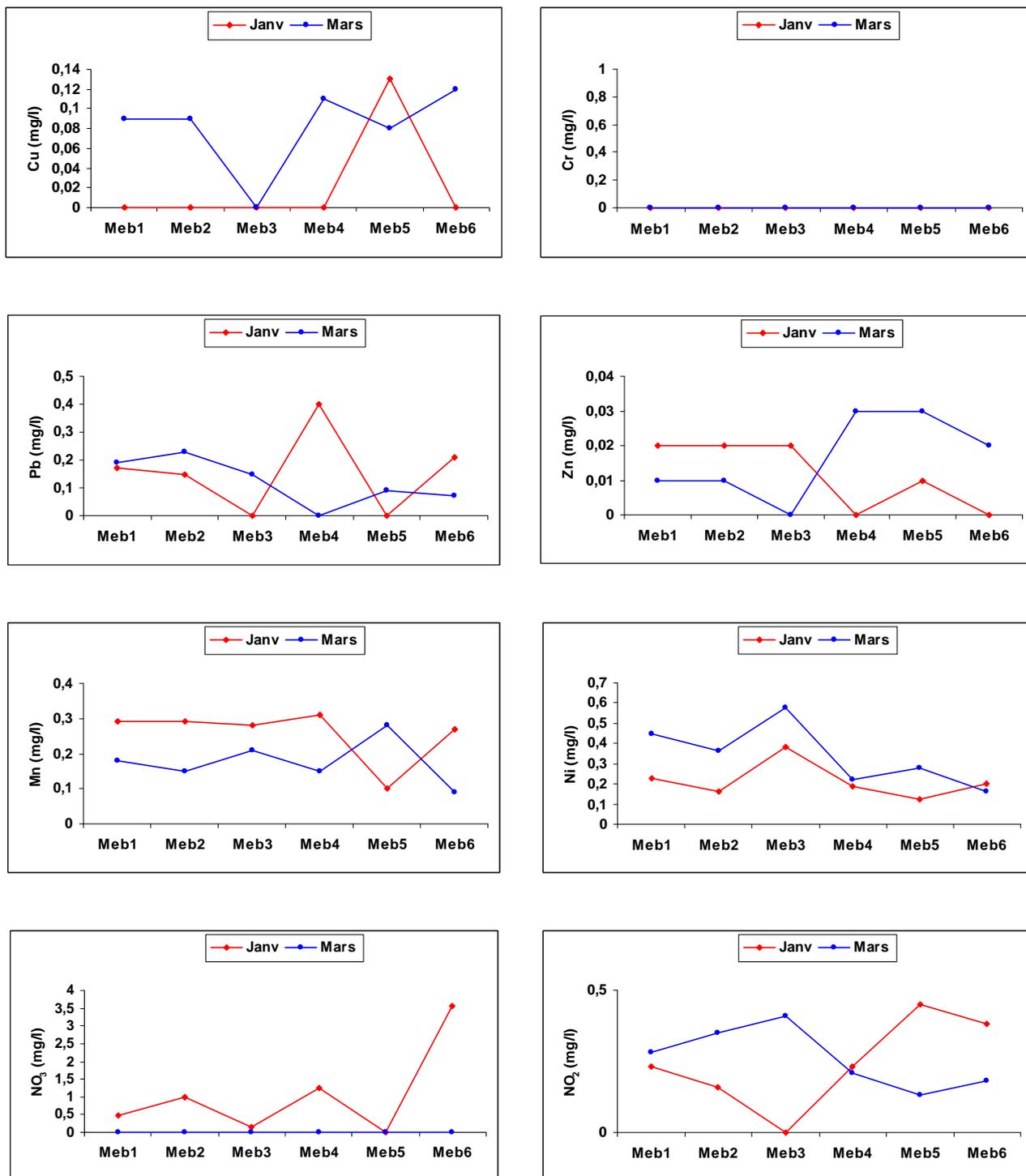


Figure 71: Evolution des concentrations le long de oued Meboudja durant les deux campagnes (Janvier, Mars 2007).

6. Estimation des flux transitant par les Oueds

Les eaux du lac Fetzara sont collectées à partir des oueds El Hout, Mellah et Zied. Les eaux des trois oueds à leur sortie du lac sont évacuées par l'oued Meboudja, ce dernier est un affluent de l'oued Seybouse, qui reçoit ces eaux avant de jeter en mer. Afin d'étudier la dynamique hydro-saline du lac Fetzara, nous avons effectué des mesures des flux des différents éléments chimiques (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- et SO_4^{-2}) au niveaux des entrées (oued El Hout, Mellah et Zied) et à la sortie du lac (oued Meboudja). Ces flux sont calculés selon la formule suivante :

$$F = Q * C \quad \text{Avec : } F : \text{Flux en mg/s.}$$

Q : débit en l/s.

C : Concentration en mg/l.

Les résultats de mesures (tab.36, 37, 38) montrent que les flux des éléments chimiques varient d'un élément à l'autre selon leur concentration et d'un oued à l'autre selon leur débit.

Les eaux arrivant au lac par les affluents (oued Zied, Mellah et El Hout) présentent des compositions chimiques différentes. Les flux calculés montrent des valeurs importantes au niveau d'oued Zied (il apporte le plus d'éléments solubles) par rapport aux autres oueds (El Hout et Mellah) ceci durant la première et la troisième campagne. Ces flux sont presque identiques durant la deuxième campagne (Mars 2007) (fig.72, 74,76).

Cette situation aurait été provoquée par la crue du mois de Mars, au cours de laquelle le débit a atteint les valeurs les plus importantes ; oued Mellah ($16 \text{ m}^3/\text{s}$), oued Zied ($2.92 \text{ m}^3/\text{s}$), oued El Hout ($10.2 \text{ m}^3/\text{s}$) et oued Meboudja ($3.68 \text{ m}^3/\text{s}$).

La comparaison entre les flux d'entrée (oued El Hout, Mellah et Zied) et de sortie (oued Meboudja), montre que les sorties sont supérieures aux entrées pendant les trois campagnes (Janvier, Mars et Mai 2007) (fig.73, 75,77).

Ceci se traduit également par un changement de la composition chimique des eaux, qui serait dû à la matrice argileuse du lac qui favorise les échanges de base et à la forte évaporation des eaux du lac Fetzara.

Tableau 36: Flux des entrées et de la sortie du lac Fetzara (Janvier 2007).

	Q (l/s)	F Ca ⁺² (mg/s)	F Mg ⁺² (mg/s)	F Na ⁺ (mg/s)	F K ⁺ (mg/s)	F HCO ₃ ⁻ (mg/s)	F Cl ⁻ (mg/s)	F SO ₄ ⁻² (mg/s)
Les entrées du lac (oueds El Hout, Mellah et Zied)								
Hout1	4,05	301,32	223,56	614,79	10,69	859,73	921,37	480,17
Hout2	8,13	734,95	589,26	1307,30	19,51	2033,31	2161,77	975,93
Hout3	12,65	1072,72	503,98	2153,03	33,90	2947,70	3000,58	1569,86
Hout4	10,73	840,16	679,85	1806,93	33,48	2657,39	2818,77	1170,75
Mel1	1,50	90,00	16,56	196,65	0,00	316,59	106,50	205,62
Mel2	3,87	331,27	361,61	381,97	0,00	1033,99	577,02	606,82
Mel3	4,93	386,51	438,57	460,46	0,00	1293,14	707,95	733,78
Mel4	6,25	445,00	511,00	129,38	0,00	1700,38	576,87	730,63
Zied1	59,74	4970,37	3670,43	9875,02	256,28	11873,92	19935,24	2855,57
Zied2	67,23	6023,81	2678,44	14225,87	314,64	15009,77	22911,98	3235,11
Zied3	81,92	10747,90	5662,31	15261,69	287,54	16090,73	43622,40	4251,65
Zied4	115,70	9441,12	13772,93	27409,33	315,86	24701,95	69003,48	7555,21
La sortie du lac (oued Meboudja)								
Meb4	745,30	89436,00	88899,38	294468,03	4650,67	206403,38	486829,96	149060,00

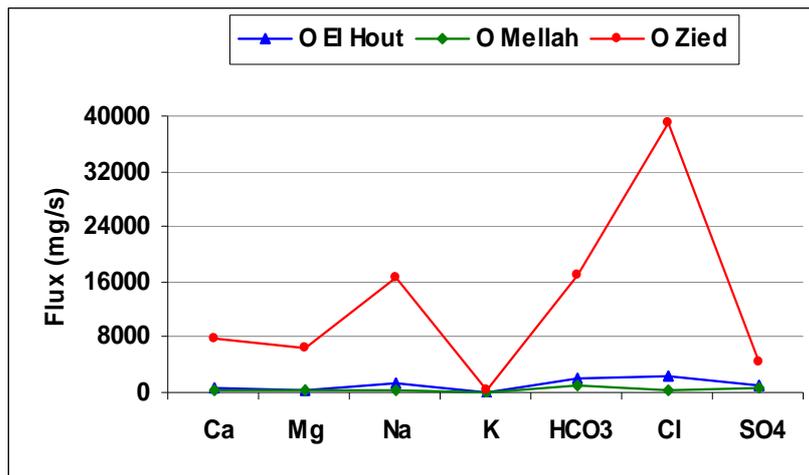


Figure 72 : Flux des entrées du lac Fetzara (Janvier 2007).

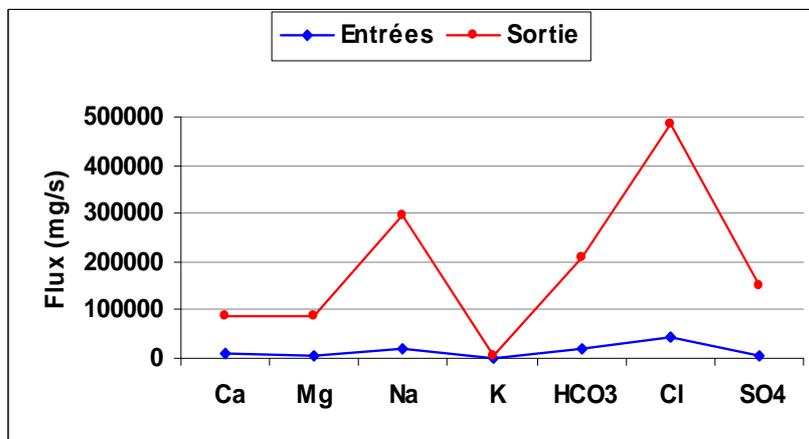


Figure 73 : Flux des entrées et de la sortie du lac Fetzara (Janvier 2007).

Tableau 37: Flux des entrées et de la sortie du lac Fetzara (Mars 2007).

	Q (l/s)	F Ca ⁺² (mg/s)	F Mg ⁺² (mg/s)	F Na ⁺ (mg/s)	F K ⁺ (mg/s)	F HCO ₃ ⁻ (mg/s)	F Cl ⁻ (mg/s)	F SO ₄ ⁻² (mg/s)
Les entrées du lac (oueds El Hout, Mellah et Zied)								
Hout1	551,90	15342,82	25696,46	95202,75	2384,21	94937,84	156739,60	30277,23
Hout2	629,40	34239,36	38972,45	104228,64	3247,70	183520,45	174280,86	32917,62
Hout3	660,00	35376,00	31046,40	119064,00	4092,00	173118,00	168696,00	34518,00
Hout4	705,80	40089,44	35572,32	132972,72	5004,12	195464,25	175391,30	35290,00
Mel1	747,10	16735,04	6634,25	106454,28	3496,43	159505,85	68957,33	21770,49
Mel2	726,90	19190,16	16049,95	106418,16	4535,86	183571,33	87736,83	17736,36
Mel3	913,99	24860,53	17548,61	147152,39	7485,58	228588,90	129786,58	21935,76
Mel4	1049,00	29372,00	17119,68	157549,31	7363,98	236759,30	141510,10	26959,30
Zied1	125,95	10076,00	4957,39	39900,96	884,17	25046,42	71539,60	10957,65
Zied2	148,30	12338,56	7972,61	46625,52	1156,74	27681,68	96869,56	6480,71
Zied3	190,25	15676,60	11141,04	69327,10	1187,16	35047,86	136428,28	14021,43
Zied4	219,20	19464,96	19044,10	104361,12	1282,32	50008,29	166526,24	21792,86
La sortie du lac (oued Meboudja)								
Meb4	1232,00	106444,80	120637,44	555508,80	4324,32	341190,08	1084652,80	184972,48

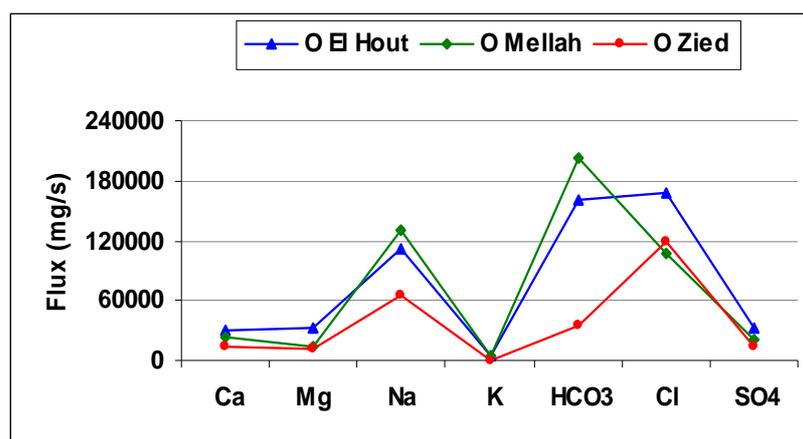


Figure 74 : Flux des entrées du lac Fetzara (Mars 2007)

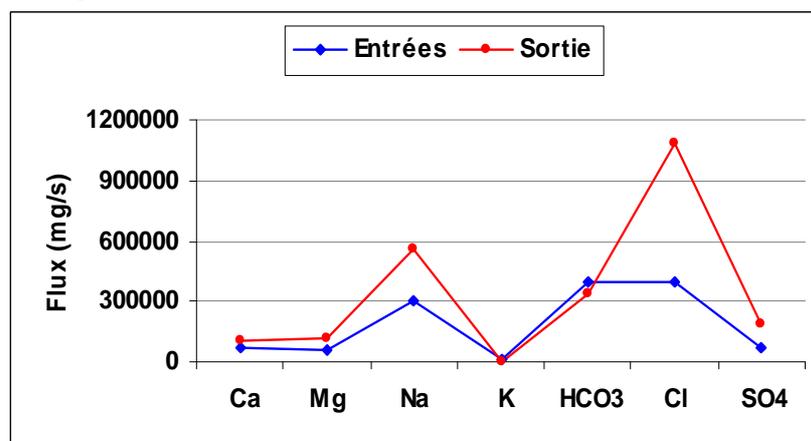


Figure 75 : Flux des entrées et de la sortie du lac Fetzara (Mars 2007).

Tableau 38 : Flux des entrées et de la sortie du lac Fetzara (Mai 2007).

	Q (l/s)	F Ca ⁺² (mg/s)	F Mg ⁺² (mg/s)	F Na ⁺ (mg/s)	F K ⁺ (mg/s)	F HCO ₃ ⁻ (mg/s)	F Cl ⁻ (mg/s)	F SO ₄ ⁻² (mg/s)
Les entrées du lac (oueds El Hout, Mellah et Zied)								
Hout1	11,25	1440,00	135,00	3296,25	25,88	2346,98	3195,00	2764,80
Hout2	12,00	1027,20	351,36	3768,00	39,60	1478,64	3834,00	3588,48
Hout3	16,00	1625,60	483,84	1872,00	43,20	3728,32	3976,00	3379,20
Hout4	13,10	1205,20	408,72	3353,60	26,20	2956,67	2976,32	3219,46
Zied1	12,84	1129,92	308,16	4314,24	199,02	3117,30	5469,84	1325,09
Zied2	14,75	1534,00	297,36	5324,75	243,38	3509,03	7121,30	1961,16
Zied3	16,43	1774,44	536,28	6259,83	266,17	4309,59	9915,51	1758,67
Zied4	18,09	1591,92	329,96	6602,85	142,91	4656,73	9247,61	2144,75
La sortie du lac (oued Meboudja)								
Meb4	832,20	59918,40	17975,52	323725,80	4660,32	197980,38	395877,54	119037,89

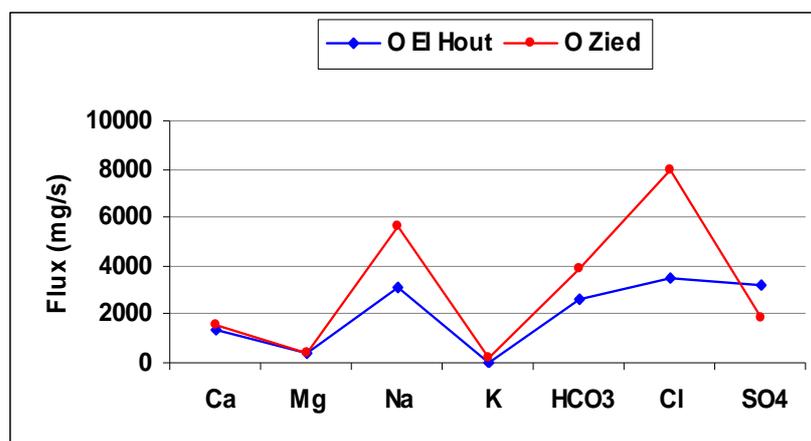


Figure 76 : Flux des entrées du lac Fetzara (Mai 2007)

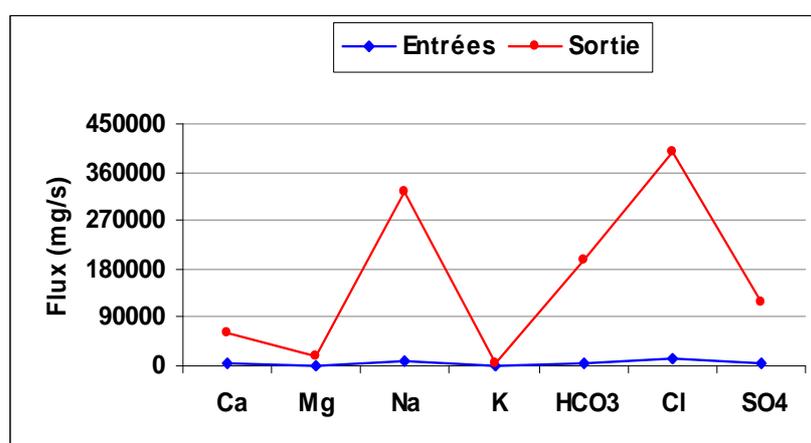


Figure 77 : Flux des entrées et de la sortie du lac Fetzara (Mai 2007).

7. Conclusion

L'étude hydrochimique des eaux souterraines (nappe entourant le lac Fetzara) et des eaux superficielles (Oued Meboudja, Zied, El Hout et Mellah), nous a permis d'avoir une idée sur l'évolution des concentrations dans l'espace et dans le temps. Les études statistiques par l'analyse en composante principale (ACP) ont montré que les chlorures et le sodium sont à l'origine de la minéralisation élevée des eaux, la forte minéralisation enregistrée dans la région de Cheurfa et celle de Oued Zied pour les eaux souterraines et au niveau de oued Meboudja pour les eaux de surface, ceci est confirmé par les résultats de la comparaison entre les flux des entrées et les flux de la sortie du lac. Les eaux sont caractérisées par la dominance de trois faciès chimiques : chloruré sodique, chloruré calcique et bicarbonaté sodique. Les concentrations des eaux diminuent d'une campagne à l'autre, due à une dilution des eaux sous l'effet des apports des fortes précipitations durant la période d'étude.

En ce qui concerne les éléments traces métalliques, les eaux souterraines et superficielles ont des faibles concentrations en Fer, Chrome, Manganèse, Zinc, Cuivre. Par contre le Plomb et le Nickel se présentent avec des fortes concentrations qui dépassent les normes admises, ce qui est probablement dû aux rejets dans les oueds, à la nature des formations géologiques et le phénomène de lessivage qui régissent la libération en grandes quantité de ces éléments.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Cette étude a été menée afin de connaître l'état actuel de la qualité des eaux de la région du lac Fetzara, son évolution dans le temps et dans l'espace, d'évaluer les propriétés physiques et physicochimiques des sols menacés par le phénomène de salinisation et d'étudier leur influence sur la qualité des eaux de la région.

🚧 Le lac Fetzara est l'un des plus importants lacs de l'extrême Nord-est Algérien. Il est situé 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 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 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 constituant la limite Nord du lac, ils sont constitués de Gneiss, 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).

🚧 Les études antérieures réalisées sur les sols de la région du lac Fetzara (*Durand, 1950 ; Ifagraria, 1967 ; A.J.C.I, 1985 ; B.N.E.D.E.R, 2004 et Djamai, 2007*), ont permis de faire ressortir quatre classes de sols à savoir : les sols peu évolués, les vertisols, les sols hydromorphes et les sols halomorphes. Les résultats analytiques révèlent que les sols sont caractérisés par une porosité moyenne d'ordre de 33 %, un pH faiblement acide à alcalin (5.65 à 7.93), et des teneurs en matière organique très variables (0.26 à 7.67 %). La salinité des sols

a atteint son maximum dans les parties Nord-est (Oued Zied) et au Sud-est du lac (Commune de Cheurfa). Les concentrations des sels solubles caractérisées par un faciès chloruré sodique, suivent la même évolution que la conductivité électrique.

🚧 L'analyse des données climatiques de quatre stations situées aux alentours du lac (les Salines, Pont Bouchet, Ain Berda et Berrahal), montre que le climat de la région est de type méditerranéen caractérisé par deux saisons bien distinctes; l'une chaude et sèche s'étend du début du mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre et l'autre froide et humide s'étale du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai.

La région d'étude reçoit des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de : 673.46 mm (Salines), 625.22 mm (pont Bouchet), 627.45 mm (Ain Berda), 687.77 mm (Berrahal). La température moyenne annuelle de l'ordre de 17.7 °C est enregistrée à la station des Salines. Le bilan calculé montre que la reconstitution du stock commence au mois de Novembre et s'achève au mois d'Avril. L'épuisement du stock en eau s'observe au mois de Mai, ce qui provoque un déficit agricole (DA) nécessitant une irrigation surtout pour la période allant du mois de Juin jusqu'au mois d'Octobre. L'estimation de l'infiltration efficace par la méthode des chlorures (*Schoeller et Berkloff, 1962*), montre que l'infiltration varie entre 14 et 31 mm au niveau de la majorité des points, avec une moyenne de 18.44 mm. Elle est inférieure à 10 mm au Sud-est du lac Fetzara (commune de Cheurfa).

🚧 L'étude du régime hydrologique des affluents du lac est basée sur la comparaison entre les débits mesurés durant la période pluvieuse. Pour réaliser ce travail nous avons utilisé les mesures réalisées par nos soins et se rapportant à la période s'étalant du mois de Janvier jusqu'au mois de Mai 2007. Nous avons également pris en considération les mesures réalisées par Melle *Habes Sameh*, caractérisant la période allant de Décembre 2004 à Mars 2005.

Les apports d'eau vers le lac sont tributaires des précipitations, étant donné que les débits atteignent leurs maximums durant les mois de janvier et février 2005, où les précipitations dépassent les 130 mm pour la période considérée. Durant la crue du 12 Mars 2007, les précipitations ont dépassé 100 mm en 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 oued El Hout, Mellah et Zied, par contre l'évolution des débits de oued Meboudja dépend de l'ouverture de la vanne.

🚧 La nappe superficielle entourant le lac Fetzara est contenue dans des alluvions récentes et actuelles, elle présente une texture argilo-sableuse et argilo-limoneuse, avec une transmissivité varie entre 0.13 10⁻³ m²/s et 1.4 10⁻³ m²/s, et un coefficient de perméabilité osciller entre 0.28 10⁻⁵ et 5 10⁻⁵ m/s.

L'examen des cartes piézométriques (Décembre 2006 jusqu'au Mai 2007) 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. 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, quand au second, il montre le drainage du lac et de la nappe par l'oued Meboudja. L'évolution du niveau piézométrique en fonction des précipitations présente dans l'ensemble des puits une élévation du niveau d'eau et ceci à partir du mois de Décembre, de ce fait la recharge de la nappe commence pour atteindre son maximum au mois de Mars, ensuite s'ensuit une baisse progressive à partir de ce mois.

🚧 L'étude hydrochimique des eaux souterraines (nappe superficielle entourant le lac Fetzara) et des eaux superficielles (Oued Meboudja, Zied, El Hout et Mellah), nous a permis d'avoir une idée sur l'évolution des concentrations dans l'espace et dans le temps. Les études statistiques par l'analyse en composante principale (ACP) ont montré des valeurs élevées de la conductivité, sont dues à l'existence de certains éléments chimiques à des concentrations élevées (HCO_3^- , Cl^- , Na^+ et Ca^{+2}). Cet excès est dû à une contamination naturelle par la dissolution des terrains traversés (roches carbonatées, formations salifères et argiles). A ce titre les eaux à fortes minéralisations sont enregistrées dans la région de Cheurfa et de Oued Zied pour les eaux souterraines. Les eaux de l'oued Meboudja restent les plus minéralisées dans le cas des eaux de surface. La comparaison réalisée entre les flux entrants au lac (oued El Hout, Mellah et Zied) et les flux sortants du lac (oued Meboudja), confirme cette variation des concentrations. Ce changement du chimisme des eaux entre l'entrée et la sortie du lac, serait lié d'une part à la matrice argileuse qui favorise les échanges de bases et d'autre part par l'évaporation des eaux du lac Fetzara. D'une manière générale, les eaux sont caractérisées par la dominance de trois faciès chimiques : chloruré sodique, chloruré calcique et bicarbonaté sodique.

En ce qui concerne les éléments traces métalliques, les eaux souterraines et superficielles ont des faibles concentrations en Fer, Chrome, Manganèse, Zinc, Cuivre. Par contre le Plomb et le Nickel se présentent avec des fortes concentrations qui dépassent les normes admises, ce qui est probablement dû aux rejets dans les oueds, à la nature des formations géologiques et le phénomène de lessivage qui régissent la libération en grandes quantité de ces éléments.

Enfin, Les concentrations des eaux varient d'une campagne à l'autre sous l'effet de la dilution favorisée par les fortes précipitations.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- AHMED_SAID. Y, LEAKE. B. E, 1993:** The Edough leptynites, Annaba, NE Algeria, are they good indicators to the origin of the biotite gneisses. Bulletin du service géologique de l'Algérie, volume 4, n°2. pp. 99-107.
- AHMED_SAID. Y, LEAKE. B. E, 1995:** The petrogenesis of the Edough muscovite orthogneisses, Annaba, northeast Algeria. Journal of African Earth Sciences. Vol. 21, No. 2, pp. 253-269.
- AISSA & al, 1995 :** Géologie et métallogénie sommaire du massif de l'Edough (N.E.Algérie). Mémoires du service géologique de l'Algérie, 9 ,7-55.
- AJCI, 1985 :** Etude de la faisabilité du projet d'aménagement agricole de la région périphérique du Lac Fetzara. Volume 3.
- ANONYME, 2000 :** Etude d'aménagement et d'assainissement des terres agricoles dans la région périphérique du lac Fetzara. (B.N.E.D.E.R.)
- ANONYME, 2002 :** Etude pédologique et mesures hydrodynamiques. (B.N.E.D.E.R).
- ANONYME, 2003 :** Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar. Lac de Fetzara, Wilaya de Annaba. (Direction générale des forêts "D.G.F").
- ANONYME, 2006 :** Eléments traces métalliques « Guide méthodologique » recommandations pour la modélisation des transferts des éléments traces métalliques dans les sols et les eaux souterraines, ENERIS, N° INERIS-DRC 06-66246/DESP-R01a.
- ATHAMENA. M, 2006 :** Etude des ressources thermales de l'ensemble allochtone Sud Setifien. Mémoire de Magister, option : Mobilisation des ressources hydriques. Univ. Batna, 131 p.
- BADRAOUI. M & al, 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.
- 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. Univ. Annaba, 110 p.
- CABY. R, HAMMOR. D, DELOR. C, 2001:** Metamorphic evolution, partial melting and Miocene exhumation of lower crust in the Edough metamorphic core complex, West Mediterranean orogen, eastern Algeria. Tectonophysics 342, 239–273.

- DEBIECHE.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, Univ. Franche-Compte, 235 p.
- DERRADJI. F & al, 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° 1-2005, pp. 65-72
- DIRECTION GENERALE DES FORETS, 2002 :** Atlas des 26 zones humides Algériennes d'importance internationale, Algérie. p 53-55.
- DJABRI. L, 1996 :** Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la Seybouse. Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. Th. Doct. Es-Sciences, Univ. Annaba, 261p.
- DJABRI. L, & al, 2007:** Origin of water salinity in a lake and coastal aquifer system. Environmental Geology. DOI10.1007/s00254-007-0851-2_ Springer-Verlag 2007.
- DJAMAI. 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.
- DUCHAUFOR. P, 1983 :** Pédologie T1. Pédogenèse et classification, Paris, 491p.
- DUCHAUFOR. P, 1994 :** Pédologie T2. Constituants et propriétés du sol, Paris, 665 p.
- DURAND, 1950 :** Premiers résultats de l'étude des sols du lac Fetzara. Doc inédit ; SES Alger, 112p.
- GLEIZES. G & al, 1988 :** Données lithologiques et pétrostructurales nouvelles sur le massif cristallophyllien de l'Edough (Est Algérie). C.R. Acad. Sci. Paris, 36, pp1001-1008.
- GUY. AUBERT, 1978 :** Méthode d'analyse des sols. Centre régional de documentation pédagogique de Marseille. Service d'impression 55 une Sylvabe 13006.
- GHIT. Y, GUERFI. N, 2001 :** Contribution à l'étude de la ressource en eau et perspectives d'aménagement dans la dépression lacustre de Fetzara. Mémoire d'ingénieur. Univ. Annaba, 49 p.
- HABES. S, 2006 :** Pollution saline d'un lac, cas du lac Fetzara, Est Algérien. Mémoire de Magister, option : Hydrogéologie. Univ. Annaba, 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, option : Hydrogéologie. Univ. Annaba, 168 p.
- HAMMOR. D, LANCELOT. J, 1998 :** Métamorphisme miocène de granites panafricains dans le massif de l'Edough (Nord-Est de l'Algérie). C.R.Acad. Sci. Paris, 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, 214 p.
- HAZOURLI. S, ZAHI. N, 2003 :** La mise en valeur des terres agricoles par le biais de la concession ; Cas de périmètre de concession du lac Fetzara. Mémoire d'ingénieur en Aménagement Rural. Univ. Annaba, 198 p.
- Hilly, J. 1962 :** Etude géologique du massif de l'Edough et du Cap de Fer (Est Constantinois). Bull. n°19, carte géologique Algérie, Alger, pp.339.
- IFAGRARIA, 1967 :** Etude générale de la mise en valeur agricole des plaines côtières d'Annaba. Soc Ifagraria, Rome ; partie I, 169p.
- JARRAYA HORRICHE. F, 2004 :** Contribution à l'analyse et à la rationalisation des réseaux piézométriques. Thèse de Doctorat, option : Génie Hydraulique.Univ. Tunis El Manar, 260 p.
- KHERICI. N, 1993 :** Vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines d'un système de nappes superposées en milieu industriel et agricole (Annaba-la Mafragh), Nort-Est Algérien.Th.Doct. Es-Sciences, Univ. d'Annaba, 170 p.
- LAOUAR. R & al, 2002:** Stable isotope study of the igneous, metamorphic and mineralized rocks of the Edough complex, Annaba, Northeast Algeria. Journal of African Earth Sciences. 35, 271–283
- MARRE. A, 1992 :** Le Tell oriental Algérien de Collo à la frontière Tunisienne, Etude géomorphologique. Volume 1 & 2 O.P.U. Alger, Algérie.
- MAJOUR. H, 1996 :** Utilisation de l'analyse statistique pour l'étude de fonctionnement Hydrodynamique et Hydrochimique du réservoir cristallin de l'Edough (Nord-Est Algérien). Th. Magister. Univ. d'Annaba.
- MONIE & al, 1992 :** Age Burdigalien de la tectonique ductile extensive dans le massif de l'Edough (Kabylies, Algérie). Données radiométriques $^{39}\text{As} - ^{40}\text{Ar}$. Bull.Soc.géol.France, n°5, pp.571-584.

RODIER. J, 1996 : L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8e édition Dunod, Paris, France.

ZENATI. N, 1999 : Relation Nappes-Lac Confirmation par l'hydrochimie cas de la plaine Ouest d'El Hadjar lac Fetzara N-E Algérien. Mémoire de Magister, option : Chimie et Environnement. Univ. Annaba, 151 p.

ANNEXES

Annexe 1: Norme des teneurs en matières organiques adaptés par les maraîchers Français (Soltner, 1981).

MO%	Appréciations
< 1	Extrêmement faibles
1 - 1.5	Très faibles
1.5 - 2.5	Faibles
2.5 - 3.5	Moyennes
3.5 - 4.5	Moyennement élevées
4.5 - 5	Elevées
> 5	Très élevées

Annexe 2 : Gamme des pH des sols (D'après Gaucher, in Soltner, 1981).

pH	Désignation des sols
3 - 4.5	Extrêmement acides
4.5 - 5	Très fortement acides
5 - 5.5	Très acides
5.5 - 6	Acides
6 - 6.75	Faiblement acides
6.75 - 7.25	Neutre
7.25 - 8.5	Alcalins
> 8.5	Très alcalins

Annexe 3 : Echelle de la salinité des sols (U.S.S.L, 1954).

CE mmohs/cm (25°C)	Appréciation
< 2	Non salé
2 - 4	Peu salé
4 - 8	Salé
8 - 16	Très salé

Annexe 4 : Coefficient pluviométrique des stations ; les Salines, Pont Bouchet et Ain Berda.

Année	Coefficient pluviométrique (H)			
	Les Salines	Pont Bouchet	Ain Berda	Berrahal
1975/76	0.74	0.75	0.72	/
1976/77	1.13	1.13	1.16	/
1977/78	0.81	0.73	0.68	/
1978/79	1.01	0.94	1.04	/
1979/80	0.90	0.83	0.99	/
1980/81	0.94	0.87	1.07	/
1981/82	1.13	1.06	0.94	1,21
1982/83	1.01	0.84	0.92	0,92
1983/84	1.39	1.32	1.14	1,10
1984/85	1.38	1.45	1.34	1,28
1985/86	0.81	0.69	0.73	0,83
1986/87	1.35	1.18	1.30	1,23
1987/88	0.73	0.59	0.61	0,76
1988/89	0.83	0.78	0.77	0,66
1989/90	0.79	0.78	0.85	0,69
1990/91	1.02	1.04	10.9	1,02
1991/92	1.02	1.00	1.01	1,00
1992/93	0.96	1.01	1.08	0,96
1993/94	0.77	0.78	0.80	0,95
1994/95	0.81	0.85	0.93	0,80
1995/96	1.20	1.16	1.15	1,10
1996/97	0.63	0.62	0.63	0,92
1997/98	1.40	1.20	1.37	1,09
1998/99	1.25	1.10	1.17	1,09
1999/00	0.83	0.75	0.90	0,91
2000/01	0.82	0.83	0.87	0,88
2001/02	0.68	0.66	0.59	0,73
2002/03	1.25	1.49	1.55	1,36
2003/04	1.05	1.03	1.38	1,10
2004/05	1.47	1.50	1.30	1,55
2005/06	0.91	0.86	0.92	0,86

Annexe 5 : les lignes directrices de l'OMS en ce qui concerne la qualité de l'eau potable, mises en place à Genève en 1993 sont la référence en ce qui concerne la sécurité en matière d'eau potable.

Elément /substance	Symbole/ formule	Lignes directives fixées par l'OMS des eaux potables
Conductivité	CE	400 µs/cm
pH	pH	6.5 - 8.5
Sodium	Na	200 mg/l
Magnésium	Mg	50 mg/l
Calcium	Ca	>200 mg/l
Potassium	K	12 mg/l
Chlore	Cl	250 mg/l
Sulfates	SO ₄	250 mg/l
Nitrates	NO ₃	50 mg/l
Nitrites	NO ₂	0.1 mg/l
Phosphates	PO ₄	0.5 mg/l
Cuivre	Cu	2 mg/l
Fer	Fe	0.2 mg/l
Plomb	Pb	0.01 mg/l
Manganèse	Mn	0.5 mg/l
Nickel	Ni	0.02 mg/l

**Annexe 6 : Valeurs critiques du coefficient de corrélation selon A. Mangin
(in ATAHAMENA. M, 2006).**

Individus	Corrélation critique		Individus	Corrélation critique	
	Au seuil de 5%	Au seuil de 1%		Au seuil de 5%	Au seuil de 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