

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Année 2013



Faculté des Sciences de la Terre
Département de géologie

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat

**Caractéristiques chimiques d'un lac appartenant
aux écosystèmes humides du Nord de l'Algérie;
Cas : Lac Fetzara
Nord - Est Algérien**

Option :
Hydrogéologie

Par
HABES Sameh
(Magister en Hydrogéologie)
(MAA U.K.M. Ouargla)

DIRECTEUR DE THESE : DJABRI Larbi

Professeur UBM Annaba

DEVANT LE JURY

Président :

M. HANI Azzedine

Professeur U.B.M. Annaba

Examineurs :

M. CHAFFAI Hichem

Pr. U.B.M. Annaba

M. ZEDOURI Aziez

M.C.A U.K.M. Ouargla

M. HACINI Messaoud

M.C.A U.K.M. Ouargla

M. BAALI Fethi

M.C.A. U. Tébessa

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Eau,

Tu n'es pas nécessaire à la vie : tu es la vie.

Tu nous pénètres d'un plaisir qui ne s'explique point par les sens.

Avec toi rentrent en nous tous les pouvoirs auxquels nous avons renoncé.

Par ta grâce s'ouvrent en nous toutes les sources taries de notre cœur.

Tu es la plus grande richesse qui soit au monde, et tu es aussi la plus délicate, toi si pure au ventre de la terre (...).

Tu n'acceptes point de mélange, tu ne supportes point d'altération,

Tu es une ombrageuse divinité...

Mais tu répands en nous un bonheur infiniment simple.

Saint-Exupéry "Terre des Hommes", Editions Gallimard, 1939.

Présente partout, y compris dans nos expressions les plus quotidiennes « j'en ai l'eau à la bouche » ou « c'est clair comme de l'eau de roche », l'eau se voit affublée d'adjectifs comme autant d'images qui illustrent et reflètent les rapports entretenus par les hommes depuis la nuit des temps avec cet élément naturel.

De tous temps et en tous lieux, l'eau a marqué les esprits que ce soit par son omniprésence parfois débordante ou par sa rareté entêtante et obstinée. Nombre de poètes, de peintres ont puisé l'inspiration à sa source, elle a baigné des générations et des civilisations entières, enveloppé de son univers feutré et protecteur tout ce que l'humanité compte de nouveaux nés, dans ces conditions il n'est pas étonnant qu'elle figure en aussi bonne place dans notre patrimoine. Fontaines, puits, lavoirs, abreuvoirs, autant de constructions, autant d'hommages que nous rendons à l'eau.

On la dit généreuse lorsqu'elle tombe enfin en pluie sur des terres asséchées et arides, vive lorsqu'elle court dans le lit de ces rivières bien oxygénées où se cache la truite et où dévalent les kayaks, bienfaisante lorsqu'elle remplit les verres des curistes en stations thermales, rafraîchissante lorsqu'elle asperge les randonneurs repus de fatigue et de soleil, apaisante et délassante lorsque sonne l'heure de la douche ou du bain. Nul n'ignore ses propriétés et ses vertus et chacun s'accorde à reconnaître son caractère vital à l'échelle de la planète entière.

REMERCIEMENTS

Je remercierai toutes celles sans qui cette thèse ne serait pas ce qu'elle est (aussi bien par les discussions que j'ai eu la chance d'avoir avec eux, leurs suggestions ou contributions). Et je remercierai aussi toutes les personnes que j'ai pu rencontrer. Le nombre de personnes qui ont rendu ces années de thèse agréables n'a fait que croître au fil des années. Si j'oublie une personne dans cet exercice, et je le ferai sans doute, je m'en excuse d'avance.

Ce travail de thèse a été réalisé dans le laboratoire **Ressource en Eau et Développement Durable REDD**.

Je tiens à remercier en tout premier lieu le Professeur **Larbi Djabri**, mon Directeur de Thèse, pour la confiance qu'il m'a témoignée et pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de diriger et d'examiner ce travail. Je le remercie également pour la confiance qu'il m'a témoignée de m'avoir initié dans le domaine de la recherche. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour toute l'attention, la patience et le temps qu'il m'a consacré, malgré ses lourdes responsabilités et ses nombreuses préoccupations et surtout pour son soutien moral, je lui dis « **MERCI** ».

Mes vifs remerciements également pour Monsieur le Professeur **A. HANI**, de l'université de Annaba, d'avoir bien voulu s'intéresser à ce travail et qui a bien accepté de me faire le grand honneur de présider le Jury de ma soutenance.

Je dois témoigner ma gratitude à messieurs, **Pr. H. CHAFFAI** de l'université de Annaba, **M.C.A. F. BAALI** de l'université de Tébessa, **M.C.A. M. HACINI** et **M.C.A. A. ZEDOURI** de l'université de Ouargla, d'avoir accepté d'examiner, d'évaluer ce travail et de siéger au jury de ma soutenance.

Je tiens à remercier en particulier le Docteur **RACHID DJAFER** de m'avoir accueilli en sein de son laboratoire de Toxicologie et d'avoir mis à ma disposition toutes les ressources nécessaires pour mon travail.

Il y a certaines personnes qui méritent un remerciement spécial : celles qui ont été à mes côtés dans les moments les plus durs et celles qui ont créé et partagé tant de si bons souvenirs avec moi. Je les remercie de croire en moi lorsque j'ai de la difficulté à croire en moi-même. A tout ce beau monde, je dédie cette thèse.

Il y a des personnes à qui je dois beaucoup et leur dire un GROS MERCI, et à qui je serai reconnaissante pour toujours : mon entourage familial et en particulier ma mère « **Aicha** » « je t'aime Mama, tu es mon inspiration ».

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Une très forte pensée pour mon défunt Père adoré « **Abdel Hamid** » que dieu est pitié de son âme, j'aurai aimé qu'il soit présent.

Mes sœurs adorées **Souhaila** et **Mountaha**. Mon frère **Youcef** et sa femme **Nadia** et tout particulièrement mes bouts de choux: **Dina** et **Midou**.

Une pensée toute particulière pour **Samir**.

Et tout particulièrement, je tiens à remercier mes amis qui ont été à mes côtés :

MOHAMED, FAHIMA.

Mes vifs remerciements à tous les enseignants et collègues du Département de Géologie de l'Université **Kasdi Merbah Ouargla**.

Un grand Merci pour Messieurs **M. DJIDEL** et **L. GHRIEB** pour leur précieuse aide.

En contrepartie de tout ce que j'ai pu apprendre sur l'Hydrochimie, le risque de pollution, protection des zones humides... j'espère que les idées présentées ici pourront aider, d'une manière ou d'une autre, à la gestion et la protection des ressources en eaux et surtout des écosystèmes humides.

Je me dois maintenant détourner une des plus belles pages de ma vie étudiante et surtout le site sur lequel j'ai travaillé « **Le Lac Fetzara** », un site que j'oublierai jamais pour ça richesse et sa diversité.

Résumé :

En Algérie, la salinité des eaux reste l'une des principales pollutions des eaux. Cette salinité est souvent mal maîtrisée car ses origines sont multiples et peuvent être d'origines naturelles ou anthropiques, ce qui complique d'avantage la compréhension des mécanismes régissant cette pollution. Le lac Fetzara est soumis à ce fléau, les eaux du lac montrent la présence de salinité, étant donné que les eaux aboutissant au lac traversent différentes formations géologiques et de ce fait se chargent en éléments chimiques, sans oublier pour autant le rôle du climat par les eaux de pluie et l'évapotranspiration en période sèche.

Cette salinité peut être engendrée par l'homme (agriculture et l'industrie), pour pallier à ces problèmes, plusieurs études ont été effectuées ; à savoir : géologique, climatique, hydrogéologique et hydrochimique. Plusieurs outils ont contribué dans ces études, outil piézométrique, outil statistique (ACP, simulation des indices de saturations), modélisation.

Nos campagnes d'analyse se sont étalées sur une période allant de 2009 jusqu'au 2010, plusieurs éléments chimiques ont été analysés (anions, cations et ETM), des ACP ont été réalisées, digrammes de Piper et Richards aussi, un modèle a été établi par le logiciel des neurones artificiels. Et on a terminé notre étude par la détermination de la pollution des eaux par les éléments traces métalliques.

La description des formations géologiques à l'affleurement a montré la présence de deux types de formations : les formations métamorphiques présentent essentiellement au niveau du massif de l'Edough et ses environs, constituant ainsi la limite nord du lac, les formations sédimentaires occupant le reste de la zone d'étude. De ce fait, les eaux aboutissant au lac auront des compositions chimiques dépendant des formations traversées.

Les résultats obtenus par la méthode statistique montre que la salinité des eaux est soit engendrée par le NaCl ou par HCO_3Ca , ce résultat est confirmé par l'étude des rapports qui confirme le lien étroit entre la conductivité et ces éléments.

La salinité des eaux du lac Fetzara a une double origine :

Une première endogène causée par la matrice argileuse, la seconde exogène entraînée par les réactions eau-roche se produisant lors des écoulements des eaux de surface. Ces réactions seraient à l'origine de : l'hydrolyse, la dilution, la précipitation.

La pollution des eaux alimentant ou sortant du Lac Fetzara, a montré que les ETM arrivés au lac stagnent dans ce dernier, ces mêmes ETM, auraient une origine anthropique, ils n'ont aucun lien avec la minéralisation.

ملخص:

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

في الجزائر، الملوحة هو تلوث المياه الرئيسية. وغالبا ما يكون هذا بسبب سوء الملوحة يتقن أصولها عديدة ويمكن أن يكون الأصل الطبيعي أو من صنع الإنسان، مما يعقد ميزة فهم الآليات التي تحكم هذا التلوث. البحيرة **فزازة** يخضع لهذه المشكلة، البحيرة تظهر وجود الملح، والمياه مما يؤدي إلى البحيرة من خلال التكوينات الجيولوجية المختلفة واتخاذ الرعاية بالتالي من العناصر الكيميائية، دون أن ننسى دور المناخ في مياه الأمطار والتبخر أثناء فترات الجفاف. ويمكن أن يكون سبب ملوحة من قبل الرجل (الزراعة والصناعة)، للتغلب على هذه المشاكل، التي أجريت العديد من الدراسات، وهي: الجيولوجية والمناخية والهيدرولوجية والهيدروجيولوجية. وقد ساهمت العديد من الأدوات في هذه الدراسات، وأداة أداة إحصائية (**ACP , piezometric** مؤشرات التشبع المحاكاة) النموذجية. وانتشرت حملات تحليلنا على مدى فترة من 2009 إلى 2010، تحليل العناصر الكيميائية عدة (الأيونات والكاتيونات وETM)، أحرز **ACP**، و **digraphs** ريتشاردز أيضا بايير، وهو نموذج كان التي أعدتها الخلايا العصبية الاصطناعية البرمجيات. ولقد انتهى دراستنا من خلال تحديد تلوث المياه من المعادن النزرة. وأظهرت وصف التكوينات الجيولوجية في نتوء وجود نوعين من التدريب: تشكيلات المتحولة هي أساسا في **Edough** واسعة النطاق والمكونات المحيطة بها والحدود الشمالية للبحيرة، والتكوينات الرسوبية احتلال بقية منطقة الدراسة. مما يؤدي إلى مياه البحيرة على التراكيب الكيميائية اعتمادا على تشكيلات اجتاز. النتائج التي تم الحصول عليها بواسطة الأسلوب الإحصائي تبين أن سبب ملوحة كلوريد الصوديوم أو من قبل أي من **HCO₃Ca**، ويؤكد هذه النتيجة من التقارير الدراسة أن يؤكد العلاقة الوثيقة بين الموصلية والعناصر. وملوحة البحيرة **فزازة** له أصل مزدوج: **A** الذاتية تسبب الأولى من مصفوفة الطين، والخارجية الثانية التي عن طريق المياه والصخور ردود الفعل التي تحدث خلال تدفق المياه السطحية. ردود الفعل هذه هي السبب في: التحلل المائي، التخفيف، وتساقط الأمطار. تلوث المياه أو ترك تغذية بحيرة **Fetzara** أظهرت أن **ETM** وصل في البحيرة ركود في الأخير، هذه **ETM**، سيكون لها أصل اصطناعي، ليس لديهم اتصال مع تمعدن.

Abstract :

In Algeria, the salinity is major water pollution. This salinity is often poorly mastered because its origins are numerous and can be natural or anthropogenic origin, which complicates advantage understanding the mechanisms governing this pollution. Lake Fetzara is subject to this problem, the lake show the presence of salt, as the waters leading to the lake through different geological formations and thus take care of chemical elements, without forgetting the role of climate in rainwater and evapotranspiration during dry periods.

The salinity may be caused by man (agriculture and industry), to overcome these problems, several studies were conducted, namely: geological, climatic, hydrogeological and hydrochemical. Several tools have contributed in these studies, tool piezometric statistical tool (ACP simulation saturation indices), modeling.

Our analysis campaigns were spread over a period from 2009 to 2010, several chemical elements were analyzed (anions, cations and ETM), ACP has been made, digraphs and Richards also Piper, a model was prepared by the software artificial neurons. And we ended our study by determining water pollution by trace metals elements.

Description of the geological formations in the outcrop showed the presence of two types of training: the metamorphic formations are essentially at the massive Edough and surrounding components and the northern boundary of the lake, the sedimentary formations occupying the rest the study area. Thereby leading to the lake waters have chemical compositions depending on the formations traversed.

The results obtained by the statistical method shows that salinity is caused by either NaCl or HCO_3Ca , this result is confirmed by the study reports that confirms the close relationship between the conductivity and the elements.

The salinity of the lake Fetzara has a double origin: A first endogenous caused by the clay matrix, the second exogenous driven by water-rock reactions occurring during flow of surface water.

These reactions are the cause of: hydrolysis, dilution, precipitation. Water pollution feeding or leaving the Lake Fetzara showed that the ETM arrived at the lake stagnated in the latter, these ETM, would have an anthropogenic origin, they have no connection with the mineralization.

SOMMAIRE

Préambule	
Remerciements	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Liste des figures	
Liste des tableaux	

INTRODUCTION GENERALE

CADRE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE

I-1- Cadre Géographique	1
a-Introduction	1
b-Toponymie de la région de Fetzara	2
c-Mise en valeur du lac Fetzara	2
I-2- Aperçu géomorphologique	5
I-2-1- Le Lac Fetzara	5
I-2-2- La plaine de Annaba	7
I-2-3- La montagne	8
I-2-4- Les sols et le couvert végétal	8
I-2-4-1- Les sols des versants	8
I-2-4-2- Les sols alluvionnaires	9
I-3- Cadre géologique	10
I-3-1- Introduction	10
I-3-2- Massif de l'Edough	10
I-3-3- Description lithologique du massif	12
A- Le socle	12
A-1- Les Gneiss	12
A-2- Les micaschistes	13
A-3- Les roches métabasiques	14
B- La couverture sédimentaire	14
C- Le magmatisme tertiaire	14
I-3-4- Tectonique et structure du massif de l'Edough	15
I-3-4-1- Déformations synmétamorphiques	15
I-3-4-2- Déformations tardives	15
I-3-5- Plaines littorales	16
I-3-6- Minéralisation du massif de l'Edough	17
I-4- Conclusion	17

PEDOLOGIE

II-1- Aperçu pédologique	18
II-1-1- Les différentes classes de sols	18
II-1-1-1- Les sols peu évolués: (SPE)	18
II-1-1-2- Les vertisols (SV)	20
II-1-1-3- Les sols hydromorphes (SH)	20
II-1-1-4 - Les sols halomorphes (SHA)	21
II-2- Occupation du sol	23

a- Le piémont	24
a-1- Occupation agricole	24
a-2- Occupation humaine	24
a-2-a- Zone faiblement peuplée	24
a-2-b- Zone moyennement peuplée	25
a-2-c- Zone fortement peuplée	25
Les plaines	25
II-3- Conclusion	26

HYDORCLIMATOLOGIE DE LA REGION D'ETUDE

III-1- Introduction	27
III-2- Les stations climatiques	28
III-3- Etude des facteurs climatiques	28
III-3-1- Précipitations	28
III-3-1-1- Les précipitations moyennes mensuelles	28
III-3-1-2- Représentation mensuelle des précipitations	29
III-3-1-2-1- Histogramme de la station des salines	29
III-3-1-2-2- Coefficient pluviométrique (H)	29
III-3-1-3- Répartition saisonnière des précipitations	31
III-3-2- Température	33
III-3-3- L'humidité	34
III-3-4- Le vent	34
III-3-5- Caractéristiques climatiques d'aridité	35
III-3-6- Le bilan hydrique	36
III-3-6-1- L'évapotranspiration	37
III-3-6-1-1- L'évapotranspiration potentielle (ETP)	37
III-3-6-1-2- L'évapotranspiration réelle (ETR)	38
III-3-7- L'interprétation du bilan hydrique	42
a) Station des Salines	43
b) Station de Berrahal	43
c) Station de Pont Bouchet	43
d) Station de Séraïdi	44
III-4- Conclusion	44
III-5- Hydrologie	45
III-5-1- Réseau hydrographique du lac Fetzara	47
III-5-2- Régime hydrologique du lac Fetzara et de ces affluents	47
III-5-2-1- Régime de l'Oued El Hout pendant les périodes (2004-2005) et (2007)	59
III-5-2-2- Régime de l'Oued El Mellah pendant les périodes (2004-2005) et (2007)	50
III-5-2-3- Régime de l'Oued Zied pendant les périodes (2004-2005) et (2007)	51
III-5-2-4- Régime de l'Oued Meboudja pendant les périodes (2004-2005) et (2007)	51
III-5-2-5- Régime de l'Oued Seybouse	52
III-6- Conclusion	52

HYDROGEOLOGIE DES NAPPES ENTOURANT LE LAC

IV-1- Introduction	54
IV-1-1- Hydrogéologie de la région de Annaba	54
IV-1-1-1- Les aquifères dénombrés	54
La nappe des formations superficielles	54
La nappe des graviers	55
La nappe des alluvions de la haute terrasse	55
La nappe des cipolins	55
La nappe des travertins	55
A- La nappe superficielle de Annaba (NSA)	56
B- La nappe d'accompagnement du Lac Fetzara (NAL)	56
IV-1-3- Délimitation des aquifères	56
IV-2- Géométrie des aquifères	57
La nappe superficielle	59
La nappe des graviers (ou nappe profonde)	59
IV-3- Les caractéristiques hydrodynamiques	62
a- La nappe des graviers	63
b- Les nappes entourant le lac Fetzara	63
IV-4- Descriptions des nappes	64
IV-4-1- Nappe profonde des graviers	64
IV-4-2- Nappes superficielles	65
a- Nappe des gneiss altérés	65
b- Nappe du cordon dunaire	65
c- Nappe des sables argileux et limons	66
IV-5- Chronique des piézométries	67
IV-5-1- Piézométrie réalisée par Bouaziz A et Rouabhia A (1993)	67
IV-5-2- Piézométrie réalisée par N Zenati (1997 & 1998)	68
La nappe d'accompagnement du lac Fetzara	70
IV-5-3- Piézométrie réalisée par TH. Debieche (2000)	70
IV-5-4- Piézométrie réalisée par S. Habes (2006)	72
IV-5-5- Piézométrie réalisée par F. Zahi (2008)	73
IV-5-6- Piézométrie réalisée par A.K Rouabhia et al (2008)	75
IV-5-7- Piézométrie réalisée par N. Zenati (2009)	75
IV-5-8- Piézométrie réalisée par S. Habes (2010)	77
IV-6- Battement de la nappe superficielle	78
IV-6-1- La nappe des graviers	78
IV-6-1-1- Chronique des Piézométries de la nappe profonde (in Debieche 2002)	78
IV-6-1-2- Chronique des Piézométries de la nappe profonde (in Hani 2003)	79
IV-6-2- Battements du niveau de la nappe des graviers (in Debieche 2002)	80
IV-7- Bilan hydrodynamique du système aquifère global: Oued - Nappe superficielle – Nappe des graviers	81
IV-8- Carte des Transmissivités de la nappe des graviers	84
IV-9- Apports des sondages mécaniques	85
IV-9-1- Champ de captage d'El Eulma	85
IV-9-2- Champ captant de Khoualed	86
IV-9-3- Champ captant de Berrahal	86
IV-9-4- Champ captant d'Oued El Aneb	88
IV-9-5- Champ captant de Kheraza	89
IV-10- Conclusion	91

HYDROCHIMIE DES EAUX

DU LAC ET DE SON ENVIRONNEMENT (OUEDS ET NAPPES)

V-1- Introduction	93
V-2- Qualité des eaux superficielles	94
V-2-1- Diagramme de Piper	94
V-2-2- Apports de l'analyse en composantes principales	95
Observation du cercle ACP	95
Observation du cercle ACP	96
V-3- Caractéristiques des eaux à l'entrée et à la sortie du lac	97
V-3-1- Caractéristiques des eaux entrant dans le lac	97
ACP des eaux de l'Oued Mellah	97
ACP des eaux de l'Oued El Hout	99
ACP des eaux de l'Oued Zied	100
V-3-2- Qualité des eaux à leur sortie du lac	102
ACP des eaux de l'Oued Meboudja	102
V-4- Méthode des rapports	103
Le couple $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$	103
Les eaux du Lac Fetzara	104
Les éléments $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}$	105
Pour la région du lac Fetzara	105
V-5- Aspects qualitatifs et quantitatifs des apports et des exores	106
V-5-1- Flux transitant par les Oueds	107
V-5-2- Méthode de calcul des flux transitant par le Lac Fetzara	107
V-5-3- Masses transitant par les Oueds	108
Bilan entrée-sortie du lac Fetzara	108
V-6- Relation Lac Fetzara- massif de l'Edough	110
V-7- Les facteurs climatiques	111
V-7-1- Mise en évidence de l'inter action Eau-Roche par la Thermodynamique	111
A-Principes de la thermodynamique	111
A-1- Relation activité-concentration	111
B-Application aux eaux de la zone d'étude	113
Activité d'une espèce chimique (a_i)	113
Force ionique	114
C-Equilibre minéraux-solution	114
La constante d'équilibre	114
V-7-2- Application aux eaux superficielles de la zone d'étude	115
V-7-2-1- Variations des indices de saturation Oued Meboudja	116
V-8- L'influence Marine	116
V-9- Les facteurs anthropiques	118
V-9-1- Mécanismes de retour des eaux d'irrigation	119
V-9-2- Les critères des eaux d'irrigation	120
V-9-3- Notion de SAR (Sodium Adsorption Ratio)	120
V-9-4- Application aux eaux de la région d'étude	121
A-Caractéristiques des eaux d'irrigation de l'Oued Zied	121
B-Pour l'Oued Meboudja	121

V-10- Mise en évidence d'une interférence eaux de surface eaux souterraines	123
V-10-1- Diagramme de Piper	124
V-10-2- ACP pour les eaux souterraines	124
V-10-3- Résultats fournies par la thermodynamique	127
A-Mois de Janvier	127
B-Mois de Juillet	127
V-10-4- Confirmation par la modélisation	128
V-10-5- Origine géochimique des minéraux	130
V-10-6- Localisation des zones de variations des Indices de saturation	130
V-10-7- L'irrigation à partir des eaux des puits et sa conséquence sur le sol et la plante ...	131
Interprétation des diagrammes de Richards	132
V-11- Conclusion	134

MODELISATION

VERIFICATION DE L'ORIGINE DE LA SALINITE PAR LA METHODE DE RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

VI-1- Application du modèle de RNA (ou ANN)	139
VI-2- Connexions entre les neurones	139
VI-3- Architecture du réseau	141
VI-4- Création du modèle	141
VI-5- Calibrage et vérification du modèle	145
VI-5-1- Détermination des modèles d'entrées	146
VI-5-1-1- Résultats et discussion	146
VI-5- Conclusions	149

POLLUTION DES EAUX DU LAC FETZARA

VII-1- Introduction	150
VII-1-1- Origine et devenir des métaux dans l'environnement	150
a- Apports telluriques naturels	150
b- Apports anthropiques	151
VII-1-2- Devenir des métaux dans l'eau	152
VII-1-3- Etat de la pollution des eaux à l'entrée du Lac	153
a- Dans la zone Ouest	153
a-1- Une contamination par les éléments majeurs	153
a-2- Contamination par les éléments traces métalliques (ETM)	153
Synthèse des résultats sur la contamination des eaux souterraines (in Majour 2010)	153
b- Dans la zone Est	155
VII-1-4- Etat de la pollution des eaux à la sortie du Lac	156
a- Devenir des polluants à l'entrée et à la sortie du Lac	156
b- Mécanismes d'Adsorption	157
c- Mécanismes de l'absorption	157
d- Paramètres analysés	158
d-1- Analyse des résultats d'ensemble	158
VII-1-5- Origines des ETM, dans les eaux à l'entrée et à la sortie du Lac	157
VII-1-5-1- ACP des ETM lourds sans conductivité électrique	157
Analyse ETM avec conductivité électrique	158
a- Matrice de corrélation	160
b- Analyse du cercle ACP	161

VII-1-5-2-ACP des ETM lourds avec conductivité électrique	161
a-Matrice de corrélation	162
b-Analyse du cercle ACP	162
VII-1-6-Les ETM au niveau de l'Oued Meboudja	163
a-Choix des sites étudiés	163
b-Variations des concentrations des ETM, au niveau des sites	164
VII-7- Conclusion	165

Conclusions générales

Conclusions générales	166
-----------------------------	-----

Références bibliographiques

Références bibliographiques	168
-----------------------------------	-----

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude	page 1
Figure 2: Coupe par le piémont de la bordure sud du Lac Fetzara	page 6
Figure 3 : Carte géologique et géomorphologique de la plaine d'Annaba	page 10
Figure 4 : Carte géologique du massif de l'Edough	page 11
Figure 5 : Coupes géologiques entre Ain Berda et l'Edough, passant par le Lac Fetzara	page 16
Figure 6 : Carte pédologique de la région de Annaba	page 19
Figure 7: Triangle des textures minérales	page 23
Figure 8: Courbe Ombrothermique : station des Salines.	page 27
Figure 9 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la station des Salines (1980-2008)	page 29
Figure 10: Variations des coefficients pluviométriques.(Période 1980 - 2008)	page 31
Figure 11- (a, b, c, d): Répartition saisonnière des précipitations (%) au niveau des quatre stations	page 33
Figure 12- Variation des moyennes mensuelles des Températures (Salines, 1980-2008)	page 34
Figure 13- Graphiques du bilan d'eau (THORNTHWAITE) Stations de Pont Bouchet, les Salines, Berrahal et Séraïdi (1980-81/2006-07)	page 42
Figure 14: Les principaux sous bassins versant du lac Fetzara	page 46
Figure 15 : Courbes d'évaluation de débits de l'Oued El Hout pour les deux périodes (Déc. 2004 – Mars 2005) et (Jan. 2007 – Mai 2007)	page 50
Figure 16: Courbes d'évaluation des débits de l'Oued El Mellah pour les deux périodes (Déc. 2004 – Mars 2005) et (Jan. 2007 – Mai 2007)	page 50
Figure 17 : Courbes d'évaluation des débits de l'Oued Zied pour les deux périodes (Déc. 2004 – Mars 2005) et (Jan. 2007 – Mai 2007)	page 51
Figure 18 : Courbes d'évaluation des débits de l'Oued Meboudja pour les deux périodes (Déc. 2004 – Mars 2005) et (Jan. 2007 – Mai 2007)	page 52
Figure 19: Répartition des aquifères de la région d'Annaba	page 55
Figure 20: Les aquifères situés à l'Ouest du lac Fetzara	page 57
Figure 21 : Coupes montrant la nature lithologique des aquifères de Annaba (zone Est)	page 58
Figure 22 : Carte des isopaches de la nappe phréatique	page 59
Figure 23 : Carte des isobathes du toit de la nappe des graviers	page 60
Figure 24 : Carte des isobathes du substratum de la couche de graviers	page 60
Figure 25 : Carte des isopaches des couches de graviers et galets	page 61
Figure 26 : Carte des isopaches du niveau semi-perméable	page 62
Figure 27 : Nappes entourant le Lac Fetzara	page 64
Figure 28: Carte piézométrique du mois d'Avril	page 68
Figure 29 : Carte piézométrique du mois de mai 1997	page 69
Figure 30 : Carte piézométrique de la nappe d'accompagnement du lac Fetzara (MHT)	page 70
Figure 31: Piézométrie réalisée par TH. Debieche (2000)	page 71
Figure 32-a: Piézométrie de la nappe entourant le lac Fetzara période des hautes eaux (Décembre 2004)	page 72
Figure 32-b: Piézométrie de la nappe entourant le lac Fetzara période des basses eaux (Mars 2005)	page 72

Figure 33-a : Carte piézométrique de nappe entourant le Fetzara du mois de Décembre 2006	page 73
Figure 33-b : Carte piézométrique de la nappe entourant le lac Fetzara du mois de Mars 2007	page 74
Figure 34 : Carte piézométrique de la nappe entourant le lac (Juin 2009)	page 75
Figure 35 : Carte piézométrique de la nappe entourant le lac (mois de Mai 2009)	page 76
Figure 36-a : Carte piézométrique de la nappe entourant le lac Fetzara (Janvier 2010)	page 77
Figure 36-b : Piézométrie de la nappe entourant le lac Fetzara (Mai 2010)	page 77
Figure 37 a & b : Cartes piézométriques de la nappe des graviers	page 79
Figure 38 : Chronique des piézométries de la nappe des graviers	page 80
Figure 39 : Schéma montre les interactions et les échanges dans le système aquifère de Annaba	page 81
Figure 40 : Carte des Transmissivités obtenue par krigeage	page 85
Figure 41 : Mécanismes naturels et anthropiques régissant la salinité des eaux du lac Fetzara	page 93
Figure 42 : Diagramme de Piper eaux superficielles	page 94
Figure 43 : Cercle ACP, eaux superficielles	page 96
Figure 44 : cercle ACP, Oued Mellah	page 98
Figure 45 : Cercle ACP, Oued El Hout	page 100
Figure 46 : Cercle ACP, Oued Zied	page 101
Figure 47 : Cercle ACP, Oued Meboudja	page 103
Figure 48 : Relation Cl et Na, eau du Lac Fetzara (Meq/l)	page 104
Figure 49 : Echange de base, eau du Lac Fetzara (meq/l)	page 104
Figure 50 : Relation entre Ca et HCO ₃ , eau du Lac (meq/l)	page 105
Figure 51 : Origine du Calcium au niveau de la nappe d'accompagnement du Lac	page 106
Figure 52 : Carte des oueds à l'entrée et à la sortie du lac Fetzara	page 107
Figure 53 : Variation des indices de saturation au niveau de la Meboudja	page 116
Figure 54 : variations des éléments par rapport à la droite Cl mer-Cl précipitations	page 117
Figure 55 : Schéma Montrant le cheminement des eaux d'irrigation	page 119
Figure 56 : Diagramme de Richards pour les eaux de l'Oued Zied	page 121
Figure 57 : Diagramme de Richards pour les eaux de l'Oued Meboudja	page 122
Figure 58 : Aquifères recensés en relation avec le lac (in Khalfaoui, 2007)	page 123
Figure 59 : carte des infiltrations relatives au mois de Février 2007 (in Zahi, 2008)	page 123
Figure 60 : Diagramme de Piper eaux souterraines de la nappe entourant le lac	page 124
Figure 61 : ACP des eaux souterraines	page 126
Figure 62 : Répartition des ouvrages montrant une variation des indices de saturations	page 131
Figure 63 : Diagrammes de Richards pour les eaux souterraines au cours des mois (Janvier – Juillet)	page 132
Figure 64 : Répartition des zones montrant une dégradation de la qualité des eaux d'irrigation	page 133
Figure 65 : Schéma d'un neurone artificiel	page 139
Figure 66 : Illustration du réseau à 3 couches (<i>MLP</i>)	page 143
Figure 67 : Fonction de transfert sigmoïde	page 145
Figure 68 : <i>Architecture du modèle RNA</i>	page 147
Figure 69 : Corrélation entre la conductivité simulée et mesurée	page 148
Figure 70 : Schéma montrant la relation du lac avec les sources de pollution (in Zenati, 2010)	page 152

Figure 71: Cercle ACP, sans Conductivité électrique	page 161
Figure 72: Cercle ACP, avec Conductivité électrique	page 163
Figure 73: Emplacement des points de prélèvement sur l'Oued Meboudja	page 164
Figure 74: Variations des teneurs moyennes annuelles des ETM, dans les eaux de l'oued Meboudja suivant les sites considérés	page 165

Liste des tableaux

Tableau 1: Statistiques des proportions des particules minérales (A.J.C.I., 1983 ; B.N.E.D.E.R., 1997 et 2004)	page 22
Tableau 2 : Les stations météorologiques prises en considération	page 28
Tableau 3 : Les moyennes mensuelles en (mm) calculées pour la période (1980-2008)	page 28
Tableau 4: Précipitations moyennes annuelles (mm) et coefficient pluviométrique (H) des stations ; Salines, pont Bouchet et Berrahal (1980-2008)	page 30
Tableau 5: Répartition saisonnières des précipitations des stations : les Salines, Pont Bouchet et Berrahal (1980-2008)	page 32
Tableau 6 : Moyennes mensuelles des températures calculées à la station des Salines. En (°C) au cours de la période 1980-2008	page 33
Tableau 7: Humidité moyenne mensuelle (%), station des Salines (1980-2008)	page 34
Tableau 8: Les moyennes mensuelles calculées des vitesses du vent, stations des Salines et Séraïdi (1980-2008)	page 35
Tableau 9: Indice d'aridité calculé (d'après la formule DE MARTONNE)	page 36
Tableau 10 : Estimation des valeurs de la RFU selon la formule de Hallaire	page 39
Tableau 11 : Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite De la Station des Salines (1980-81/2006-07)	page 40
Tableau 12 : Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite de la station des Berrahal (1980-81/2006-07)	page 40
Tableau 13 : Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite De la station de Séraïdi (1980-81/2006-07)	page 41
Tableau 14: Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite De la station de Pont Bouchet (1980-81/2006-07)	page 41
Tableau 15 : Résultats de deux pompages d'essai effectués dans la nappe phréatique	page 62
Tableau 16: Résultats du pompage effectué dans le secteur central de la plaine de Annaba	page 63
Tableau 17 : Paramètres intervenant dans l'établissement du bilan hydrodynamique entre oued - nappe superficielle – nappe des graviers	page 82
Tableau 18: Bilan hydrodynamique oued – nappe superficielle – nappe des graviers dans la basse plaine de la Seybouse	page 83
Tableau 19 : Matrice de corrélation eaux superficielles	page 95
Tableau 19' : Récapitulation des corrélations	page 95
Tableau 20 : Matrice de corrélation Oued Mellah	page 97
Tableau 20' : Récapitulation des corrélations	page 97
Tableau 21 : récapitulation des corrélations	page 98
Tableau 22 : Matrice de corrélation Oued EL Hout	page 99
Tableau 22' : Récapitulation des corrélations	page 99
Tableau 23 : Matrice de corrélation Oued Zied	page 100
Tableau 23' : Récapitulation des corrélations	page 101
Tableau 24 : Matrice de corrélation Oued Meboudja	page 102
Tableau 25 : Flux calculés (T/L)	page 108

Tableau 26 : Flux calculés aux entrées et la sortie du lac pour les éléments dominants (T/An)	page 109
Tableau 27 : Produit de solubilité des minéraux pris en compte (à la température de 25 ° C)	page 113
Tableau 28 : Influence des minéraux au niveau des Oueds (entrées et sorties)	page 115
Tableau 29: Variations des indices de saturation entre les deux considérés	page 130
Tableau 30: L'erreur RMS dans différents réseaux de neurone	page 147
Tableau 31: Paramètres statistiques de régression	page 148
Tableau 32: Classement des variables par analyse de sensibilité	page 148
Tableau 33: résultats de la comparaison	page 159
Tableau 34 : Matrice de corrélation, ACP sans CE.....	page 160
Tableau 35: Matrice de corrélation, ACP avec CE	page 162
Tableau 31: Paramètres statistiques de régression	page 148
Tableau 32: Classement des variables par analyse de sensibilité	page 148
Tableau 33: résultats de la comparaison	page 159
Tableau 34 : Matrice de corrélation, ACP sans CE.....	page 160
Tableau 35: Matrice de corrélation, ACP avec CE	page 162

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le lac Fetzara appartient aux zones humides de l'Algérie orientale. En réalité de tout temps, les mots «zones humides» ont évoqué des marécages grouillants de créatures visqueuses, foyers de maladies telles que le paludisme et la schistosomiase. C'est, bien sûr, cette image des zones humides, territoires laissés à l'abandon, qui a entraîné le drainage et la transformation de ces espaces dans le but d'améliorer la santé publique ou pour faire place à l'agriculture intensive, à des bassins de pisciculture, à des résidences ou à des usines. Toutefois, depuis quelques années, le public devient sensible au fait que les zones humides naturelles procurent gratuitement de nombreuses fonctions précieuses (atténuation des inondations, recharge de la nappe souterraine, rétention des polluants), de nombreux produits (poisson, combustible, bois d'œuvre, riches sédiments servant à l'agriculture des plaines d'inondation) et de nombreux attributs (diversité biologique, beauté des paysages qui attirent les touristes, patrimoine culturel et archéologie). Une tendance à conserver les zones humides se dessine dans les nombreux pays qui ont adopté pour politique d'empêcher toute nouvelle perte ou dégradation des zones humides, de veiller à leur utilisation durable et d'encourager la recherche en vue de quantifier leurs valeurs. Aujourd'hui que peut-on dire à propos des zones humides. Les zones humides sont des écosystèmes de transition entre le milieu aquatique continental et le milieu marin; ils constituent une zone tampon. Ces écosystèmes abritent une grande diversité biologique tant au niveau de la flore que de la faune. Les écosystèmes les plus productifs en termes de biomasse, ces milieux ont longtemps été considérés comme insalubres et inutiles.

Par définition, Le terme « zones humides » est apparu en France à la fin des années 1960, introduit par les scientifiques et protecteurs de la nature ; cette expression est une traduction du mot « wetland » utilisé aux USA depuis le 17ème siècle. Cette expression nomme des milieux variés regroupés par la présence d'eau (douce, salée ou saumâtre) et la faible profondeur de celle-ci, il s'agit de marais, marécages, estuaires, lagunes, étangs, tourbières... De nombreux scientifiques ont proposé des définitions, nous retiendrons les plus pertinentes exposées dans des ouvrages reconnus.

En 1982, TOUFFET propose une définition dans le dictionnaire essentiel d'écologie, selon lui les zones, humides sont « tous les milieux où le plan d'eau se situe au niveau de la surface du sol ou à proximité. Ils se trouvent ainsi saturés d'eau de façon permanente ou temporaire par

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

des eaux courantes ou stagnantes, douces, saumâtres ou salées. Il s'y développe une végétation adaptée à un engorgement plus ou moins permanent. On comprend dans les zones humides : les zones halophiles et saumâtres, les marais arrière-littoraux, les marais continentaux, les tourbières, les bordures d'étangs et les berges des eaux courantes, les prairies, landes et bois humides établis sur des sols hydromorphes ».

Dans le Dictionnaire Encyclopédique de l'écologie, RAMADE (1993) introduit les menaces qui pèsent sur ces milieux singuliers. Ainsi, « zone humide » apparaît être un « terme général désignant tous les biotopes aquatiques marécageux ou lagunaires continentaux ou littoraux. Ces derniers sont particulièrement menacés par les drainages et les assèchements pour leur mise en culture ».

D'autres définitions plus sommaires ont été élaborées, néanmoins en 1991, une définition écologique plus globale est apparue. Geneviève BARNAUD propose la définition suivante : « Les zones humides se caractérisent par la présence, permanente ou temporaire, en surface ou à faible profondeur dans le sol, d'eau disponible douce, saumâtre ou salée. Souvent en position d'interface, de transition entre milieux terrestres et milieux aquatiques proprement dits, elles se distinguent par des sols hydromorphes ou non évolués, et/ou une végétation dominante composée de plantes hygrophiles au moins pendant une partie de l'année. Enfin elles nourrissent et/ou abritent de façon continue ou momentanée des espèces animales inféodées à ces espaces ».

A cette définition s'ajoute une liste d'écosystèmes plus ou moins communs appartenant aux zones humides, il s'agit des « marais, marécages, fondrières, fagnes, pannes, roselières, tourbières, prairies humides, marais agricoles, landes et bois marécageux, forêts alluviales et ripisylves marécageuses, mares y compris les temporaires, étangs, bras-morts, grèves à émergence saisonnière, vasières, lagunes, prés-salés, marais salicoles, mangroves, etc.. Elles se trouvent en lisière de source, de ruisseaux, de fleuves, de lacs, en bordure de mer, de baies et d'estuaires, dans les deltas, dans les dépressions de vallée ou dans les zones de suintements à flanc de collines ».

Les zones humides font partie des écosystèmes les plus productifs de la Terre. Tantôt décrites comme les « reins du paysage » pour les fonctions qu'elles remplissent dans les cycles hydrologique et chimique et tantôt comme des « supermarchés biologiques » en raison des vastes chaînes trophiques et de la riche diversité biologique qu'elles entretiennent. De ce fait il devient impérieux de les protéger. Pour protéger ces zones humides surtout de l'activité anthropique et des changements climatiques, car pouvant entraîner la disparition de ces

écosystèmes, il a été décidé le classement selon des critères établis au préalable de classer et de protéger ces sites.

Ainsi en Iran en 1971, la protection de ces zones humides s'imposait et c'est de ce contexte là que la convention RAMSAR a été signée.

Définition de la convention RAMSAR :

La convention RAMSAR signée en 1971 en Iran a pour but de protéger les zones humides au niveau international. Les articles 1.1 et 1.2 donnent une définition large. Les zones humides sont selon la convention « des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eaux marines dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres ».

L'article 2.1 rajoute que les zones humides pourront inclure des zones de rives ou de côtes adjacentes à la zone humide et des îles ou des étendues d'eau marine d'une profondeur supérieure à six mètres à marée basse, entourées par la zone.

La convention ajoute à cette définition de type juridique une longue liste d'écosystèmes et de milieux créés par l'homme concernés par cette convention.

En novembre 1984, à l'occasion de son adhésion à la convention Ramsar, l'Algérie avait classé ses deux premières zones humides, les lacs Tonga et Oubeïra. En 1999, elle a inscrit un troisième site, le lac des Oiseaux, toujours dans le complexe de zones humides d'El Kala, dans la Wilaya d'El Tarf.

En date du : 04 juin 2003 le lac Fetzara a été classé comme étant zone RAMSAR, caractérisé par sa grande étendue, dépendant des eaux de pluie et rare de son type en méditerranée.

De nombreuses menaces pèsent sur les zones humides algériennes que l'on continue de détruire à un rythme régulier. Privées de leur eau par les pompages excessifs ou par la construction irréfléchie de barrages, elles sont même complètement drainées au profit de l'agriculture.

La récupération de nouvelles terres agricoles sur une partie du lac dans le cadre de la mise en valeur agricole du site, la présence d'une conserverie de tomate et celle des cités urbaines risquent de polluer le lac Fetzara, classé zone humide dans le cadre de la convention Ramsar.

Par le biais de ce travail on a essayé de mettre en évidence les processus régissant la minéralisation des eaux entrant et sortant du lac Fetzara.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

La salinité des eaux présente l'un des grands problèmes en Algérie, vu son effet dévastateur sur la qualité des eaux. Elle est souvent liée à la dissolution des formations géologiques, à l'effet de l'évaporation et à l'effet d'une probable intrusion marine.

Plusieurs volets ont été débattus dans ce manuscrit, pour pouvoir déterminer la qualité des eaux et pour essayer de connaître les origines de la minéralisation des eaux.

Par le premier chapitre, on a donné un aperçu sur le cadre général de la zone d'étude par, sa situation géographique, géomorphologique et géologique. Nous avons pu montrer que la région est caractérisée par deux formations ; sédimentaire et métamorphique,

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude pédologique, montrant que la région du Lac Fetzara est composée de quatre types de sols, répartis comme l'indique les études faites sur la zone.

Le troisième chapitre est consacré à l'Hydroclimatologie, et le calcul des débits des entrées : (Zied, El Hout, El Mellah), et la sortie : Meboudja.

Le quatrième chapitre est consacré à l'hydrogéologie, qui nous montre par le biais de la piézométrie, l'existence d'une certaine interconnexion entre le Lac et les oueds, et que la région est caractérisée par une assez forte perméabilité indiquant, une probable exposition de la nappe à toute forme de pollution. Donc, ce chapitre a été réalisé sous forme de synthèse des travaux effectués au niveau de cette zone.

Le cinquième chapitre est consacré à l'hydrochimie, la salinité des eaux reste l'une des principales pollutions des eaux. Cette salinité est souvent mal maîtrisée car ses origines sont multiples et peuvent être d'origines naturelles ou anthropiques, ce qui complique d'avantage la compréhension des mécanismes régissant cette pollution. Notons que le mode de salinisation dépend des facteurs suivants :

- géographique (côtier ou continental),
- géologique (nature de l'aquifère, les sédiments traversés par les eaux et leurs minéralogie),
- le climat de la zone d'étude influence directement la salinité des eaux,
- l'intrusion marine, par le biais de la surexploitation des nappes crée un déséquilibre de l'interface eau douce eau salée,
- le retour des eaux d'irrigation, en effet les eaux traversant le sol, acquièrent une nouvelle composition qui peut entraîner une variation de la salinité.

Notre travail s'est fait en deux grandes parties, la première portera sur les eaux superficielles (Lac et Oueds), la seconde portera sur les eaux souterraines (puits gros diamètres).

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Le sixième chapitre traite de la pollution des eaux des Oueds (entrée et sortie du lac) induite par les différents rejets. Ainsi aux entrées du lac la pollution est surtout générée par les rejets urbains par contre, à leur sortie les eaux du lac sont mélangées aux eaux des rejets urbains et industriels, ce qui accentue leur pollution.

Le septième chapitre, consacré à la modélisation par le logiciel des neurones artificiels, ces derniers sont fondés sur des modèles qui tentent d'établir des relations entre les paramètres d'entrée et de sortie par interconnexions des neurones.

L'intérêt de ces modèles réside dans leur capacité d'apprendre des relations complexes à partir de données numériques.

Le dernier chapitre s'est porté sur la pollution des eaux par les métaux lourds. Cette pollution est en grande partie générée par l'homme, en effet les rejets urbains et industriels causent beaucoup de pollution aux eaux du lac et des Oueds associés. .

Par le biais de ce travail, nous avons essayé d'approcher et d'appréhender les problèmes liés à la ressource en eau, dans ce contexte particulier qui est une zone humide, avec toutes ses caractéristiques propres qui diffèrent de l'hydrogéologie classique.

CHAPITRE I
CADRE GENERAL DE LA
ZONE D'ETUDE

CHAPITRE I
CADRE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE

I-1- Cadre Géographique :

a- Introduction :

Le lac Fetzara s'allonge sur 17 kilomètres d'Est en Ouest de la ville d'Annaba à l'extrême Est de l'Algérie et sur 13 kilomètres dans sa partie la plus large. Le plan d'eau libre, dont l'eau douce est relativement temporaire selon l'intensité de la saison des pluies dont il dépend presque exclusivement, est généralement d'une étendue de plus de 5.800 hectares, auxquelles se rajoutent 4.000 hectares de terres inondables en saison hivernale constituant ainsi de vastes prairies humides.

Le Lac se situe à 18 Km au Sud-Ouest de la ville d'Annaba et à 14 Km de la mer. Il s'allonge dans le sens Est-Ouest sur 17 Km de long et sur 13 Km de large. Il est limité au Nord par le massif de l'Edough, par les collines de Aïn Berda au Sud et les cordons dunaires situés à l'Est et à l'Ouest. De Latitude 36° 43' et 36° 50' N Longitude 7°24' et 7°39' E. Superficie : 20.680 hectares. (Figure 1)

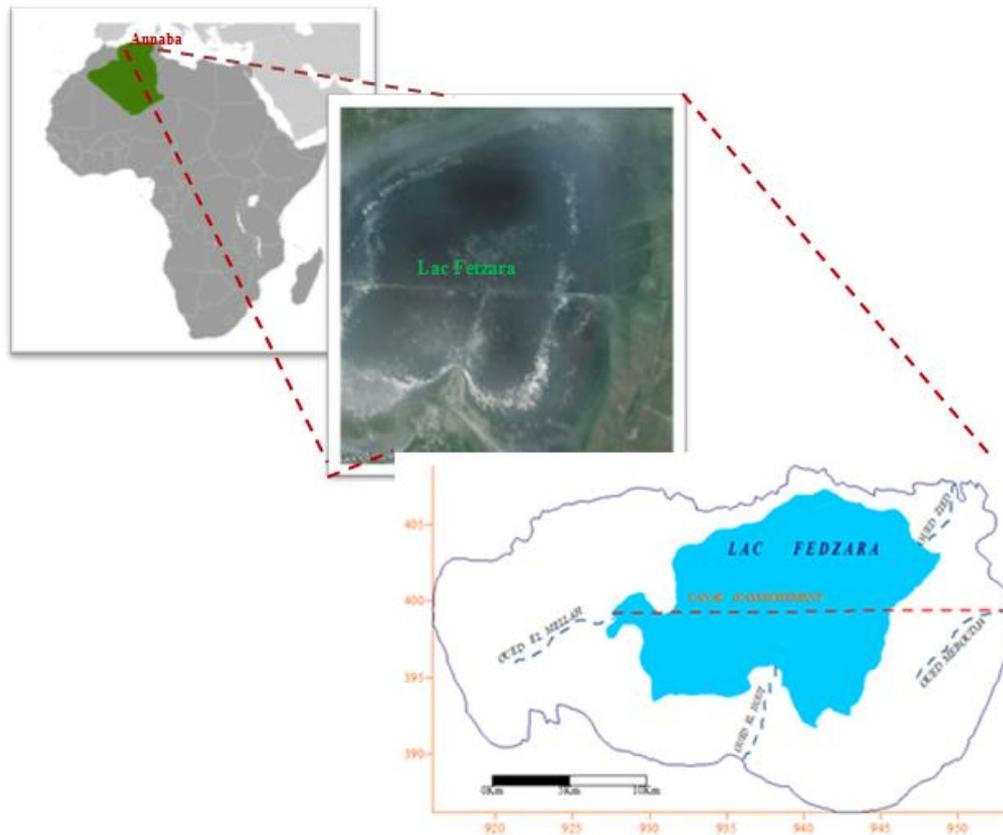


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

A la périphérie du lac existent plusieurs agglomérations: au Nord, le chef-lieu de la commune de Berrahal, au Sud les territoires des communes d'El Eulma (Oued El Hout) et de Cheurfa et à l'Est les petits villages d'El Gantra et de Oued Zied.

b- Toponymie de la région de Fedzara :

À partir des années 30, de nombreux sites préhistoriques ont été découverts et mis en valeur : Vieux massif de l'Edough, Cap de Fer, Cap de Garde, les collines de Bou Hamra, la région ouest d'Annaba, **le lac Fedzara**, les lacs d'El Kala, la côte Ouest de Chetaïbi et de Marsa. Des recherches et des études méthodiques sont particulièrement réalisées dans la station de Fort Génois située à la presqu'île de Ras El Hamra (Cap de Garde).

c- Mise en valeur du lac Fedzara :

Au Sud-Est de Bône, entre le massif cristallophyllien de l'Edough et les chaînes nummulitiques des Ohassas et de Penthièvre, le lac tectonique du Fedzara (11 km N-S, 25 km W-E) recueille les eaux d'un bassin versant de 520 km². Une nette dissymétrie existe dans son alimentation : très faible à l'Est où la ligne de partage des eaux est voisine de la limite du lac,

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

elle est plus importante à l'Ouest où débouche l'Oued Mellah (38 km²) ; sur le bassin versant méridional, très étendu, raviné par de nombreux torrents, l'Oued el Hout (79 km²), premier affluent du lac, tente une organisation du drainage, tandis qu'au Nord, où un réseau hydrographique plus évolué à la mer pour niveau de base, le bassin versant est réduit à une frange ; mais l'Oued Zied (17 km²) a un débit élevé.

La profondeur et la superficie du lac, variables en fonction de la pluviométrie annuelle (700 à 800 mm), ont pu varier de 1 à 3 au cours de l'année, les hautes eaux d'hiver étant d'autant plus élevées que les terrains sont imperméables (sols argileux, 12 000 ha sur 13 140 du domaine public), et la surface inondée d'autant plus grande que les côtes s'élèvent très lentement du fond du lac (10,70 m) vers l'extérieur. Les basses eaux d'été étaient d'autant plus basses que l'évaporation y était très forte. Cet assèchement rapide des terrains argileux provoque à la surface du sol des crevasses d'où le lac tire son nom d'« étang des crevasses » : Garaa Fetzara. La profondeur, comme la superficie du lac, a aussi varié depuis quatre-vingts ans en relation avec les travaux entrepris pour obtenir son assèchement.

Au milieu du XIXe siècle, le niveau aurait atteint la cote -f 16 et la superficie inondée aurait dépassé 14 000 ha. Bordé de joncs et de roseaux où nichaient des oiseaux migrateurs, le lac avait des eaux suffisamment riches en poisson pour justifier la concession des droits de pêche et de chasse (1er février 1859). Mais, l'insalubrité était telle que le projet d'un canal émissaire de 16 km se déversant dans l'Oued Meboudja est mis à l'étude. La Société Générale Algérienne qui contre des obligations d'assainissement et de peuplement, recevait les rives Nord et Est du lac, ne fit rien. En 1877, la compagnie Mokta El Hadid, qui exploitait la mine d'Ain Mokra où les mineurs mouraient des fièvres, obtint à son tour l'autorisation d'assécher la région contre cession gratuite des terrains du lac. Un canal partant du centre du lac (6 890 m) traversa alors le bourrelet occidental de 22 m et rejoignit la Meboudja (8 839 m) ; mais, si l'eau baissait à + 12 (1880), le lac restait marécage en été et la Compagnie abandonna ses droits à la Colonie (1903) qui prit à son compte les travaux achevés en 1935.

Le canal principal élargi, muni d'un ouvrage à vannes, est prolongé (7 300 m) jusqu'à la limite occidentale où il reçoit l'Oued Mellah ; les deux autres affluents sont canalisés à leur arrivée dans l'emprise du lac pour déverser directement au canal les eaux des torrents continuant à aller inonder les points bas. L'évacuation se fait normalement quand les pluies sont faibles ; quand les pluies sont fortes, l'eau monte, mais la vidange est assurée en trois ou quatre semaines et depuis 1936 le lac n'existe pas pendant neuf mois de l'année, 3890 ha n'étant plus jamais inondés. Un projet de drainage des eaux superficielles entre les torrents canalisés a été

étudié (1947); le manque de crédits n'a permis son application qu'à une faible superficie, mais son extension assurerait le dessalement des terres. Les zones où la concentration de chlore est la plus forte correspondent au débouché des affluents du SE et du NW.

L'indice annuel d'aridité indique une tendance nette au lessivage des sols. Sur les terrains non calcaires de la périphérie, irrégulièrement inondés, les eaux de pluie donnent naissance à des sols lessivés normaux ou à des solods ; mais les types les plus répandus sont les solontchaks, auxquels seuls s'intéresse la mise en valeur.

Les premiers projets de mise en valeur ne visaient qu'à un reboisement en eucalyptus (1875 ; 1880-1891 ; 1949) ; malgré des échecs répétés, une nouvelle tentative faite en 1954 pour fournir de l'ombrage aux pâturages s'est soldée par un demi succès, mais seulement à la périphérie (tamarins, eucalyptus).

S'inspirant des Marais Pontins, la Colonie installa en 1940 quatre anciens élèves d'une école d'agriculture sur des parcelles de 100 ha ; malgré l'assistance technique et financière de l'État, l'échec fut complet.

Or, parallèlement à l'assèchement, l'ancienne végétation de joncs régressait devant des plantes donnant un bon fourrage naturel, et d'avril à novembre le lac était occupé par les troupeaux des emboucheurs musulmans des Aïchaouas. Seul un nombre restreint de privilégiés riverains en bénéficiait et la vaine pâture entraînait la destruction progressive des rares espèces fourragères qui croissaient naturellement. En 1948, la mise en valeur du lac devenait l'objet unique (décret de 9 juin 1947) d'une Régie du Fetzara où le comité technique groupe des fonctionnaires de l'hydraulique et de la Colonisation, l'inspecteur du service de l'Élevage et l'ingénieur des Services agricoles; une station expérimentale était installée sur 40 ha de terrains périphériques associés à un secteur de 1 140 ha du lac. Le lac devient alors presque uniquement une zone d'élevage.

Le pâturage réglementé est limité d'avril à novembre, et à certaines zones (arrêté d'interdiction du 29 février 1953). Le droit de pacage, inférieur à celui réclamé dans les propriétés privées (400 F par ovin, au lieu de 2 000 à 3 000 F), comporte quatre bains anti-tiques et, depuis 1954, des pulvérisations sont faites à Ain Mokra et Oued El Hout (16 500 en 1954, 15 478 en 1955)¹. Depuis 1953, de nouvelles mesures sanitaires sont prises pour lutter contre les maladies chroniques du bétail : vaccination anti-tique, contre le charbon pour les bovins (6 000 en 1953 ; 7 139 en 1954), contre la strongylose pulmonaire pour les ovins (2 455 en 1954). Le nombre de bêtes ayant accès à ce domaine public a augmenté de 5 594 (dont 1 224 ovins) en 1949 à 10 705 (dont 4 059 ovins) en 1953 (8 594 en 1955). La mise en défens de

certaines parcelles permet à la station de faire des réserves de fourrage vendues à tous les petits usagers du lac dont les bêtes, par manque de nourriture en hiver, sont au printemps d'une maigreur extrême : en 1953, 1 900 q étaient vendus à 113 usagers ; en 1954, 2 612 q à 147 usagers.

Les rendements de fourrage naturel varient de 18 à 23 q à l'ha; des essais sont faits pour acclimater de nouvelles plantes fourragères annuelles et vivaces. L'ensilage du mélilot a commencé en 1954. Mais, actuellement encore, seul le cheptel de la station peut en être nourri.

Une tentative d'amélioration des races se heurte à l'indifférence des propriétaires; 18 saillies étaient seulement enregistrées à la station en 1953, alors que 400 juments vivent à la surface du lac. Des expériences de croisement entre la vache arabe et le taureau charentais, faites en 1952, pour obtenir un produit résistant aux chaleurs de l'été, mais plus précoce et fournissant plus de lait, donnent des veaux croisés qui, à 3 ans, malgré les mêmes conditions de vie, ont un poids supérieur et une lactation plus abondante. On compte sur les produits mâles issus du croisement pour obtenir à partir des vaches locales les sujets les mieux adaptés, mais, déjà, la station envisage l'exploitation commerciale du lait.

La régie fait de nombreux essais de cultures ; le sorgho à balai sur 5 ha, puis 10 ha ; le coton sur les meilleures terres (10 q/ha), le riz Mais on ne peut envisager leur extension sur de grandes surfaces, et la mise en valeur agricole, étant donné le dessalement progressif des terrains, ne saurait être envisagée que dans un temps assez lointain.

Ainsi se confirme la vocation pastorale de l'ancien lac Fetzara, et cette mise en valeur est d'autant plus importante qu'elle intéresse près du cinquième de la plaine de Bône et qu'elle permettrait de rétablir l'équilibre économique de cette plaine : sinon la réalisation progressive de son aménagement hydraulique devant entraîner une extension des zones cultivables aurait pour conséquence la réduction de celle des pâturages.

Enfin l'exode des populations riveraines (douars Oued El Hout, Cheurfa, Eulma), accru en 1953 où la moitié du cheptel ovin périt à la suite d'une infection parasitaire (strongylose pulmonaire) exagérée par la famine consécutive à la sécheresse de 1952, cet exode qui se dirige vers les bidonvilles bônois, cesserait peut-être. (In Travers L., 1958)

I-2- Aperçu géomorphologique:

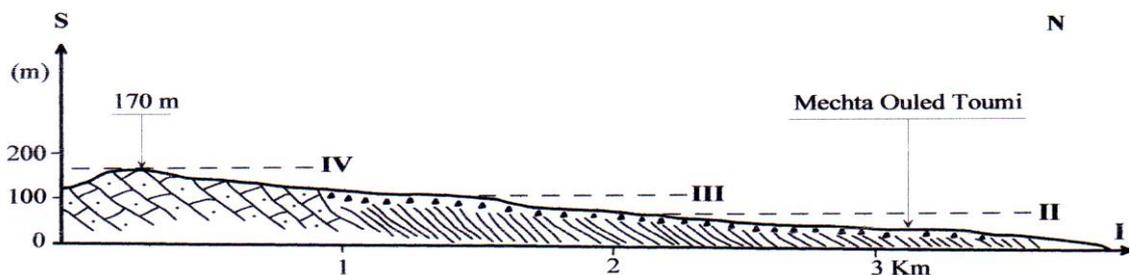
La géomorphologie de la région du Lac Fetzara présente trois formes morphologiques variées, dues essentiellement à la grande tectonique du Cénozoïque et du Quaternaire. Elles

constituent deux bassins versants principaux caractérisés par la région du Lac à l'Ouest et la Seybouse et l'Oued Meboudja à l'Est.

I-2-1- Le 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; il est représenté par une large dépression dont les dimensions sont approximativement de 17km d'Ouest en Est et 13km du Nord au Sud.

Au Sud, un véritable piémont avec six niveaux de glacis, s'est construit en aval du tell Nord Guelmien. La coupe (Fig.02) nous montre qu'il existe sur ce piémont quatre niveaux de glacis. Au-dessus du niveau IV, la coupe montre des replats de petites tailles qui tronquent les grès pseudo-numidiens de ces massifs.



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

Figure 2: Coupe par le piémont de la bordure sud du Lac Fetzara (in Belhamra, 2001)

Cette cuvette s'est formée suite à une grande tectonique active pendant le cénozoïque et le Quaternaire (figure 2), ainsi la série de Fetzara s'est développée en bordure du Lac Fetzara et plus largement autour des Djebels Debar, Grar et Taya (Vila, 1980) et elle présente deux bordures dissymétriques orientées, l'une vers le Nord et l'autre vers le Sud. Il s'agit donc, d'une région où l'érosion a beaucoup fonctionné durant le Quaternaire.

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 le piémont de la bordure Nord du Lac, la tectonique semble avoir été plus active que sur la bordure Sud (Marre, 1992).

Le fond de la cuvette du Lac est occupé, à l'Ouest par le Lac proprement dit et 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 de dessèchement, long de 14km, 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.

Le long du canal on observe, 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.

Ils sont riches en matières organiques. On a donc là, une alternance de phases rhéxistatiques 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 (Haou, 2001).

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

La liaison entre le Lac et la plaine d'El Hadjar s'effectue à partir de l'Oued Meboudja qui sinuait autrefois entre Belelieta et Bouhamra avant de se relier dans l'Oued Seybouse.

La plaine d'El Hadjar se termine brutalement au Nord, contre Djebel Belelieta, dernier mont du massif de l'Edough. Le versant de ce Djebel est rectiligne et abrupt. Il s'agit certainement d'un contact par faille.

Deux niveaux de petits glacis peuvent être observés au-dessus de la plaine d'El Hadjar, ils sont nettement déformés et plongent vers le fond de la plaine et disparaissent sous la basse plaine sableuse.

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'évolution 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 tout le quaternaire.

I-2-2- La plaine de Annaba :

La plaine de Annaba est drainée par l'Oued Seybouse est située immédiatement en arrière de la ville de Annaba.

Elle est limitée au Nord par l'anticlinal du massif de l'Edough et au Sud par l'anticlinal de la chaîne numidienne, 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 très sinueux avec de nombreux méandres, puis jusqu'à l'embouchure, elle prend un tracé plus rectiligne.

A l'Est et à l'Ouest, la basse terrasse sableuse de la Seybouse disparaît pour laisser la place à des dépressions de 2m d'altitude et aux formations argileuses noires et hydromorphiques (marais de Boukmira près de l'aéroport de Annaba).

Actuellement, à l'Ouest la Seybouse se jette dans la mer Méditerranée à Sidi Salem par l'intermédiaire d'un chenal artificiel creusé pendant les années 1960, c'est pour éviter l'envasement du port par les inondations de l'Oued Seybouse (apport de matériaux qui se déposent au fond de la mer)

I-2-3- La montagne :

Le mont de l'Edough est limité à son piémont Sud et Est par le Lac Fetzara, la plaine de Annaba et la mer Méditerranée à l'Ouest, ce massif 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 26km, débute au Nord du Lac Fetzara, elle s'élève rapidement à plus de 600m pour culminer à 1008m d'altitude au Kef Seba et redescend à 867m vers Séraïdi, elle s'abaisse en suite régulièrement jusqu'au Cap de Garde au Nord de la ville de Annaba.

Entre Belelieta et Bouhamra se creuse la vallée transversale de la basse Meboudja qui prend naissance au pied de la ride 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.

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

I-2-4- Les sols et le couvert végétal :

Notre zone d'étude est formée par un ensemble d'unités bien distinctes. L'interaction du relief, de l'altitude, de la pente, de la roche mère et de la tectonique, peut ainsi déterminer le façonnement du paysage naturel de la cuvette lacustre de Fetzara. Ce qui explique la diversité de l'occupation du sol.

A ce propos, 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 culturelle.

I-2-4-1- Les sols des versants :

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.

Djebel Menchoura, 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 Toubéïga 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.

Enfin, l'agriculture de piémont est axée sur une arboriculture rustique (olivier, figuier et figuier de barbarie), ainsi qu'un maraîchage légumier varié, léger et limité.

I-2-4-2- 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 Garaa 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 plaine est surtout axée sur le maraîchage, la tomate industrielle, la céréaliculture et la culture fourragère, ainsi que l'arboriculture fruitière en irriguée pour les agrumes et fruits à noyaux.

I-3- Cadre géologique :

I-3-1- Introduction:

L'aperçu géologique est fondamental à l'étude hydrogéologique. La géologie permet d'identifier les différents matériaux et les différentes structures des formations susceptibles de conduire l'eau des précipitations en profondeur. Il nous 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 occupant le reste de la région (figure 3)

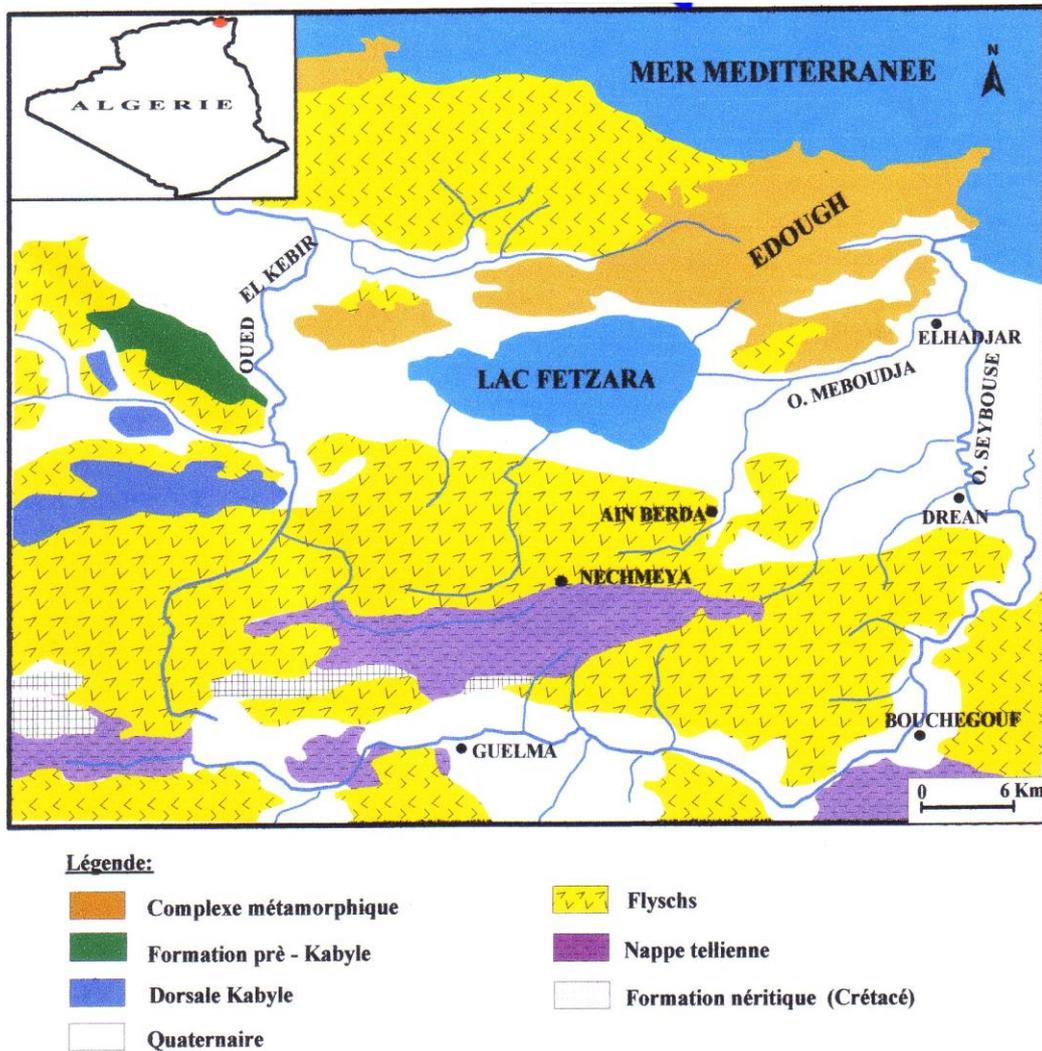


Figure 3 : Carte géologique et géomorphologique de la plaine d'Annaba

I-3-2- Massif de l'Edough :

Le massif de l'Edough constitue le complexe métamorphique le plus oriental du littoral algérien. (Figure 4) Il a fait l'objet de plusieurs études géologiques (L. Joleaud, 1936 ; Hilly, 1962; J.M. Vila, 1970; J.C. Lahondère, 1987; 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 des plaques africaine et européenne durant la période Oligo-Miocène (Auzende et al. 1975; Bouillin, 1979; 1986; Cohen, 1980; Maurey et al., 2000; Laouar et al. 2005).

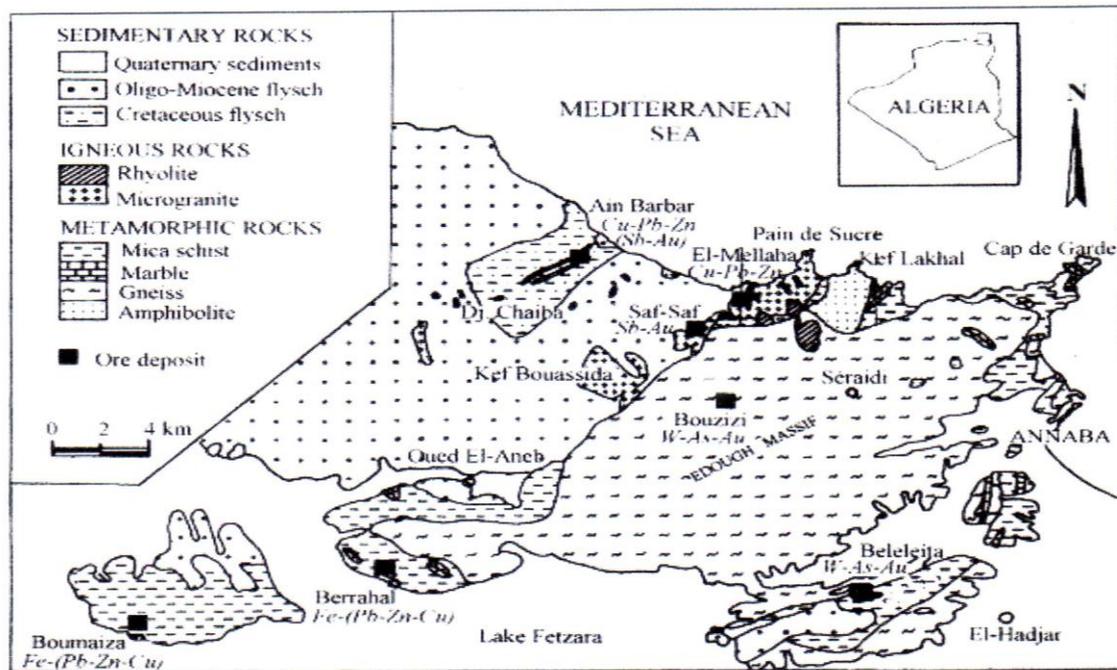


Figure 4 : Carte géologique du massif de l'Edough (Laouar & al. 2002)

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 est 606 ± 55 Ma. Pour les leucogranites supérieurs qui sont fortement déformés (Hamor et Lancelot, 1998), et donc ils ont été considérés comme des roches granitiques mises en place durant l'orogénèse panafricaine. 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) (Hamor, 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 (grès numidiens).

Durant le Miocène, à environ 16 Ma., des corps magmatiques sont mis en place au sein du complexe métamorphique et sa couverture sédimentaire (Marignac et Zimmermann, 1983). Ces roches ignées consistent en deux groupes principaux: des masses et des filons rhyolitiques, et des microgranites. Leur pétrologie, géochimie et pétrogenèse ont été étudiées par Ahmed-Said et al. (1993) et Laouar (2002). L'activité magmatique et l'hydrothermalisme associés dans le massif de l'Edough sont 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 (Bolf, 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.

I-3-3- Description lithologique du massif:

A- Le socle :

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 (Panafricain) (Hammor, 1992; Hammor et Lancelot, 1998) et l'unité supérieure constitué de micaschistes du Paléozoïque (Ilavsky et Snopkova, 1987). Des niveaux de marbre, d'amphibolites et de roches ultrabasiques sont également associés à ces deux unités.

A-1- Les Gneiss: Les gneiss à biotite qui forment le cœur de l'antiforme sont des roches fortement foliées et plissées et sont composés principalement par une variété œillée étroitement associée à de nombreux niveaux leptynitiques (quelques dizaines de mètres à plusieurs dizaines de mètres) riches en tourmaline et une autre variété plus ou moins migmatitique. Ces deux variétés ont été longtemps considérées comme des orthogneiss et des 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. Ce 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 (Ahmad-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.

A-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 métagabbros, de serpentinites 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 (Ahmad-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), surmontée par une unité épimétamorphique. La série "des alternances" est caractérisée par une alternance régulière de micaschistes, souvent fortement alumineux, et de 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, quant à elle, est représentée par les métapelites de Belelieta, Boumaïza et Berrahal. Elle correspond à des micaschistes à mica blanc, biotite, disthène, staurotide, rutilite et parfois grenat, interstratifiés avec des marbres.

A-3- Les roches metabasiques: Les roches métamorphiques basiques du massif de l'Edough se trouvent généralement dans la partie supérieure des gneiss et au niveau des micaschistes. Elles comprennent des amphibolites, des pyroxénites, des péridotites, des métagabbros, etc.; le volume le plus important desquelles est celui des amphibolites 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; Ahmed-Said et Leake, 1993). Parmi les roches ultrabasiqes, on note la présence d'enclaves de nature amphibolitiques et de roches riches en olivine, surtout au niveau des roches encaissantes (micaschistes). Ahmed-Said et Leake (1993) considèrent les amphibolites de Kef Lakhel comme roches ignées basiques à ultrabasiqes de nature effusive, formées dans un domaine de marge continentale.

B- La couverture sédimentaire: Elle comprend la nappe de flyschs crétaqués et la nappe de flyschs numidiens. Les flyschs crétaqués affleurent en fenêtre sous la nappe numidienne et occupent la région de Ain Barbar et El-Mellaha (Hilly, 1962; Marignac, 1988). 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 correspondent 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 1500m.

C- 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 Zimmermann, 1983). Les leucogranites et aplo-pegmatites se rencontrent souvent dans le socle de l'Edough, et sont spatialement associées à des complexes pegmatitiques. 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.

I-3-4- Tectonique et structure du massif de l'Edough:

I-3-4-1- Déformations synmétamorphiques:

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

Plissements synschisteux contemporains d'un métamorphisme de type barrovien (disthène-staurotide-grenat),

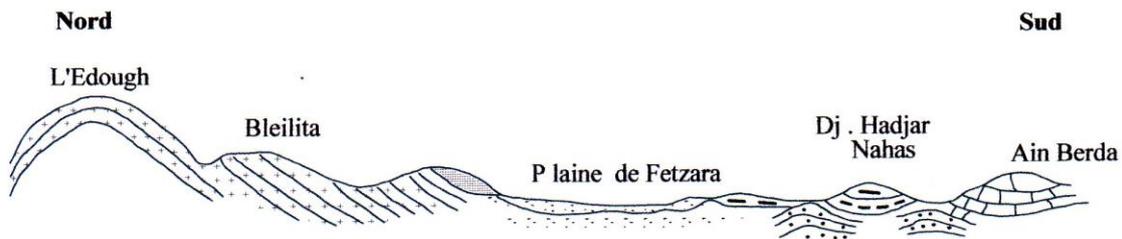
Plissements synschisteux et cisaillements ductiles, contemporains d'un métamorphisme de basse pression (andalousite-sillimanite) dans le contexte distensif d'une faille de détachement, d'âge burdigalien (Monié et al., 1992; Aissa et al. 1995; 1998).

I-3-4-2- Déformations tardives:

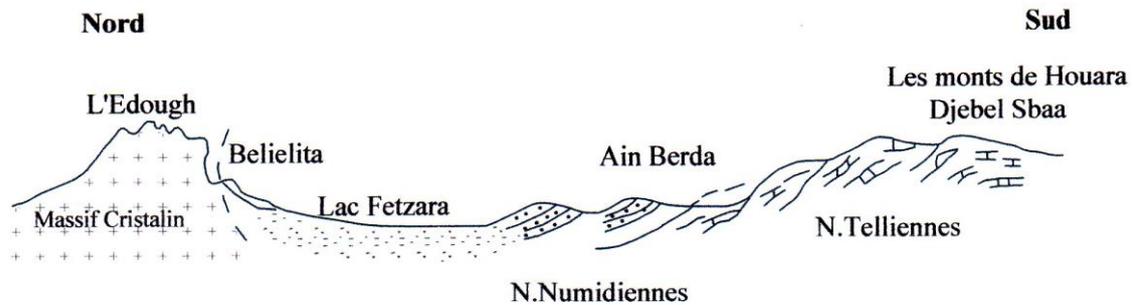
Les déformations tardives se résument essentiellement en la formation de plis et de failles (Aissa, 1995):

Plis droits à N140°E; et brachyantoclinal N50-60°E façonnant la forme actuelle du massif (fig.5).

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 en 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 guidé 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).



a- J.M. VILA 1980



b- L. JOLEAUD 1936

Légende :

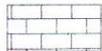
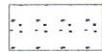
	Gneiss et Micaschistes
	Grés Numidien
	N. Tellienne (Marnes, Marno Calcaire)
	Quaternaire { Gravieres-Galets Argiles - Sables Gravieres - Sables

Figure 5 : Coupes géologiques entre Ain Berda et l'Edough, passant par le Lac Fetzara

I-3-5- Plaines littorales :

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

Elles ne constituent par 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 Daghousa.

I-3-6- 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.4):

- (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.

I-4- Conclusion :

La région de notre étude fait partie de l'ensemble géologique du Tell Nord Oriental. Elle est caractérisée par deux types de formation à savoir ; des affleurements de terrains métamorphiques et des terrains sédimentaires.

Les formations des bordures sont constituées de gneiss, de schistes, de micaschistes, de cipolins, de marnes, de marno calcaires, de calcaires métamorphiques et de formations gréseuses.

Les formations sédimentaires correspondent à un ensemble non uniforme, des dunes sableuses et des plaines fertiles. Elles sont caractérisées par des sédiments quaternaires.

Chapitre II

Pédologie

Chapitre II

Pédologie

II-1- Aperçu pédologique :

Les sols de la région du lac Fetzara ont suscité l'intérêt de plusieurs organismes de développement à savoir ; ORSTOM (1950), la société de conseil italien Ifagraria (1967), l'Agence nationale des ressources hydriques (A.N.R.H., 1981), l'Agence Japonaise de Coopération Internationale (A.J.C.I., 1985) et le Bureau National d'Etude pour le Développement Rural (B.N.E.D.E.R., 1997 et 2004), ces derniers ont dressé des cartes pédologiques qui constituent toujours une base d'information de la plupart des études pédologiques dans la région.

On note que la classification retenue s'inspire de celle établie par DUCHAUFFOUR correspondant à la classification française (C.P.C.S, 1967). Ces sols d'une manière générale, posent d'énormes problèmes de mise en valeur. Ils présentent souvent des croûtes calcaires ou gypseuses et sont la plupart du temps salés et sujets à l'érosion et à l'érosion secondaire. Nous avons essayé de dresser un aperçu général sur les différents types de sol dans la région du lac Fetzara.

La superficie de la zone d'étude étant de 313.5 km² sur un total de 743 km² ce qui correspond à 42.19%. (Figure 6)

II-1-1- Les différentes classes de sols :

D'après la classification française les différents types de sol de la région de notre étude sont :

II-1-1-1- Les sols peu évolués: (SPE)

Les sols peu évolués sont les plus fertiles. Ils se trouvent essentiellement sur les terres onduleuses des pieds de montagnes et sur les terrasses. L'épaisseur varie selon leur position topographique; leur superficie est de 11716 ha, soit 37.37% de la superficie totale.

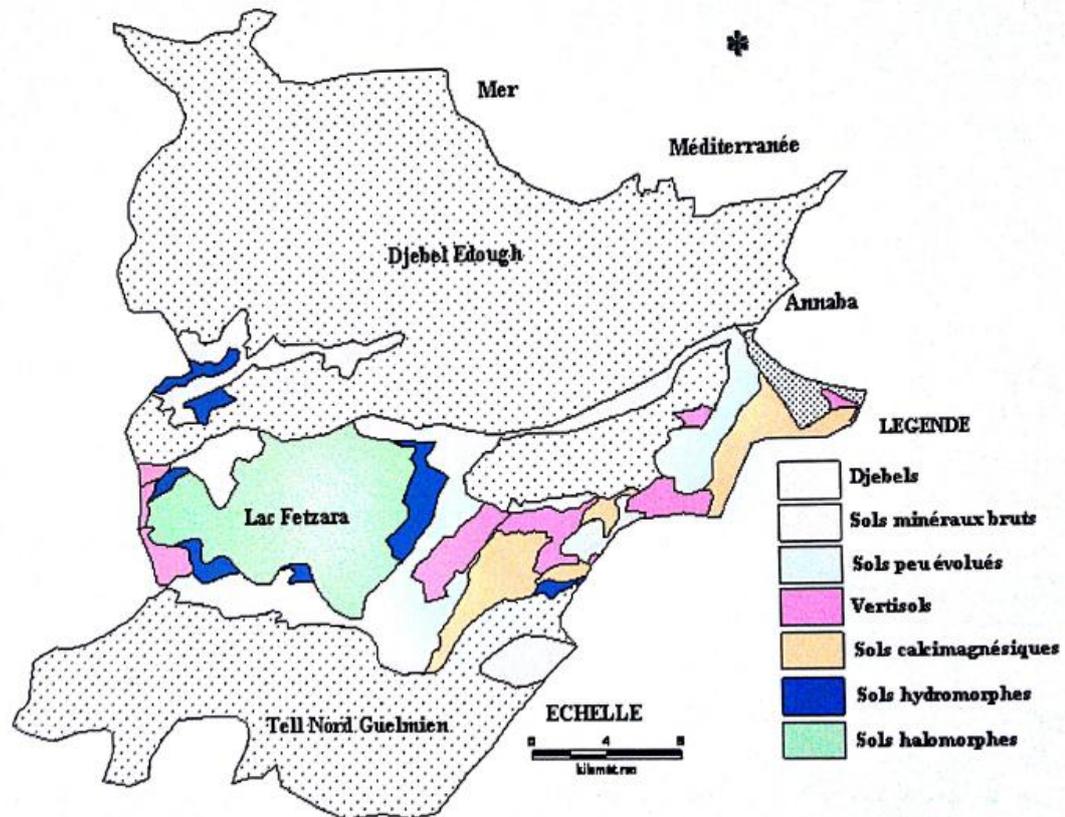
Ils ont une texture variée de fine à grossière, une perméabilité lente modérée, un taux de matière organique faible à moyen et une réserve minérale moyenne à assez bonne. Ces sols sont calcaires à teneur élevée en limon.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Ils se caractérisent par une très faible rétention d'eau, une perméabilité très élevée et un taux de matières organiques moyen.

Plusieurs sous classes sont observées dans la région du lac à savoir :

- ✓ Les sols peu évolués non climatiques, d'apport alluvial, ils sont caractérisés par un niveau hydromorphe, d'une texture fine, d'une faible perméabilité et d'une rétention



en eau élevée.

- ✓ Les sols peu évolués non climatique, d'apport alluvial, non calcaire, ce sont des sols plus fertiles, caractérisés par une bonne perméabilité et d'une texture moyenne.
- ✓ Les sols peu évolués non climatiques, d'apport alluvial, peu calcaire, ces derniers sont fertiles et conviennent à une large gamme de cultures. Ils sont caractérisés par une texture et un taux de matière organique moyen. La perméabilité est modérée pour cette classe. Ces sols sont formés par les effets colluviaux et alluviaux. La texture est grossière à moyennement grossière. Certains sols sont calcaires et d'autres ne le sont pas. Dans les terrasses basses, assez forte hydromorphie dans les couches inférieures et tenaces de sel.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

- ✓ Les sols peu évolués non climatiques, d'apport colluvial non calcaire. Ces sols colluviaux sont les plus répandus dans la classe. Ils sont caractérisés par les faibles teneurs en humus dans la couche supérieure. Généralement, sableux et de très bonne perméabilité avec une nappe basse.
- ✓ Les sols peu évolués non climatiques, d'apport colluvial, avec des colluvions fines non calcaires. Ces sols sont semblables aux sols précédents. Mais, ils sont moyennement grossiers et ont une forte hydromorphie.

II-1-1-2- Les vertisols (SV)

Ces sols sont caractérisés par une teneur en argile de plus de 30%, minéral argileux gonflant, ayant des fissures à la surface au moment de la sécheresse. La formation de ce type de sol est due à une présence dominante de calcaire.

Ces sols occupent 3324.8 ha de la superficie étudiée, soit 10.60%. Ils sont riches en argile gonflante. Les vertisols ont de mauvaises propriétés physiques (sols lourds). Ils possèdent une texture très fine et présentent un mauvais drainage.

On distingue trois sous classes dans la région d'étude :

- ✓ Les sols vertisols à drainage externe nul ou réduit, à structure anguleuse, calcaire. Ces sols sont caractérisés par un mauvais drainage et une très faible perméabilité. Leur texture est très fine ce qui les rend asphyxiant. Les sols de cette classe ont une teneur importante en argile gonflant riche en calcium et en magnésium substituant. Le gypse constitue l'élément principal.
- ✓ Les sols vertisols à drainage externe possible, à structure anguleuse, peu calcaire. Ils sont caractérisés par une perméabilité modérée au niveau du premier horizon et d'une texture fine.
- ✓ Les sols vertisols à drainage externe nul ou réduit, à structure anguleuse, non calcaire. Ils sont caractérisés par une texture fine et d'une faible perméabilité.

II-1-1-3- Les sols hydromorphes (SH)

Ils occupent une superficie de 3452 ha, soit 11.01% de la totalité de la zone d'étude. Ces sols sont fréquents à l'Ouest, au Sud, à côté des vertisols dans le Lac. Ces sols sont caractérisés par une texture très fine et une faible perméabilité. La présence d'une nappe explique alors l'hydromorphie temporaire ou permanente. Ces sols sont caractérisés aussi par un mauvais drainage.

D'après le référentiel pédologique (I.N.R.A, 1995), les excès d'eau sont considérés comme majeurs si l'hydromorphie apparaît à moins de 50 cm de profondeur, comme secondaires entre 50 et 80 cm et comme accessoires entre 80 et 120 cm, mais toujours est-il que le drainage de ces sols est obligatoire.

Deux sous classes caractérisent ce type de sols :

- ✓ Les sols hydromorphes peu humifère, colluvion. Ils sont caractérisés par une texture grossière et la nappe est peu profonde en saison pluvieuse. Le drainage est mauvais, ce qui conduit à une hydromorphie.
- ✓ Les sols hydromorphes peu humifères ou minéraux, alluvions fins non calcaires salées. Ils sont caractérisés par une très fine texture et une très faible perméabilité.

II-1-1-4 - Les sols halomorphes (SHA)

Ces sols sont fréquents dans la plus grande partie du lac. Ils occupent une superficie totale de 11046 ha, soit 35.23% de la superficie étudiée. Ils correspondent au sol à accumulation de sel de la zone du lac inondé en saison pluvieuse (supérieure à la côte 12 m). En période sèche, au moment de l'assèchement du lac, de grandes et petites fissures se produisent à la surface jusqu'aux couches de 50 cm de profondeur. Ce sont des sols caractérisés par l'accumulation des sels solubles, à texture lourde et riche en minéraux argileux gonflants.

On a plusieurs types de sols halomorphes :

- ✓ Les sols halomorphes à structure non dégradée, salins à alcalis sols salés et alluvions fins salés. On observe dans ces sols une accumulation de sel produit par l'évaporation et l'assèchement en saison sèche dans les zones du lac (origine maritime). Ces sels sont du type NaCl. La teneur des argiles est forte.
- ✓ Les sols halomorphes à structure dégradée, ce sont des sols salins à alcalis, alluvions légers non calcaires. Ils sont caractérisés par un taux élevé d'argile, une texture fine et une faible perméabilité. L'hydromorphie et la salinité leur confèrent la caractéristique d'être difficilement aménageables.
- ✓ Les sols halomorphes à structure dégradée, alluvions fins calcaires. Ces sols sont caractérisés par une forte teneur en argile. Des fissures se produisent sur la surface en période sèche. Toutes les couches sont riches en calcium et contiennent des taches hydromorphes.

Tableau 1: Statistiques des proportions des particules minérales (A.J.C.I., 1983 ; B.N.E.D.E.R., 1997 et 2004)

		Lac		Fetzara	
		SPE	SV	SH	SHA
Argile %	Moyenne	29.75	30.64	29.29	40.06
	Ecart type	19.92	6.24	32.75	23.53
	Minimum	6.31	21.37	6.13	12.90
	Maximum	55.73	34.90	52.45	53.79
	CV %	67.00	20.00	112.0	59.00
Limon %	Moyenne	27.49	29.38	15.21	27.31
	Ecart type	12.96	3.05	11.19	17.90
	Minimum	14.16	26.17	7.29	6.79
	Maximum	47.26	33.34	23.12	39.73
	CV %	47.00	10.00	74.00	66.00
Sable %	Moyenne	42.59	39.98	55.50	32.63
	Ecart type	30.84	6.37	43.94	41.36
	Minimum	2.78	33.46	24.43	6.48
	Maximum	78.53	48.73	86.58	80.31
	CV %	72.00	16.00	79.00	127.0

Placées sur le triangle des textures, ces trois fractions se répartissent dans 07 classes de texture, dont une texture la limono argileuse représente 50 % (figure 7)

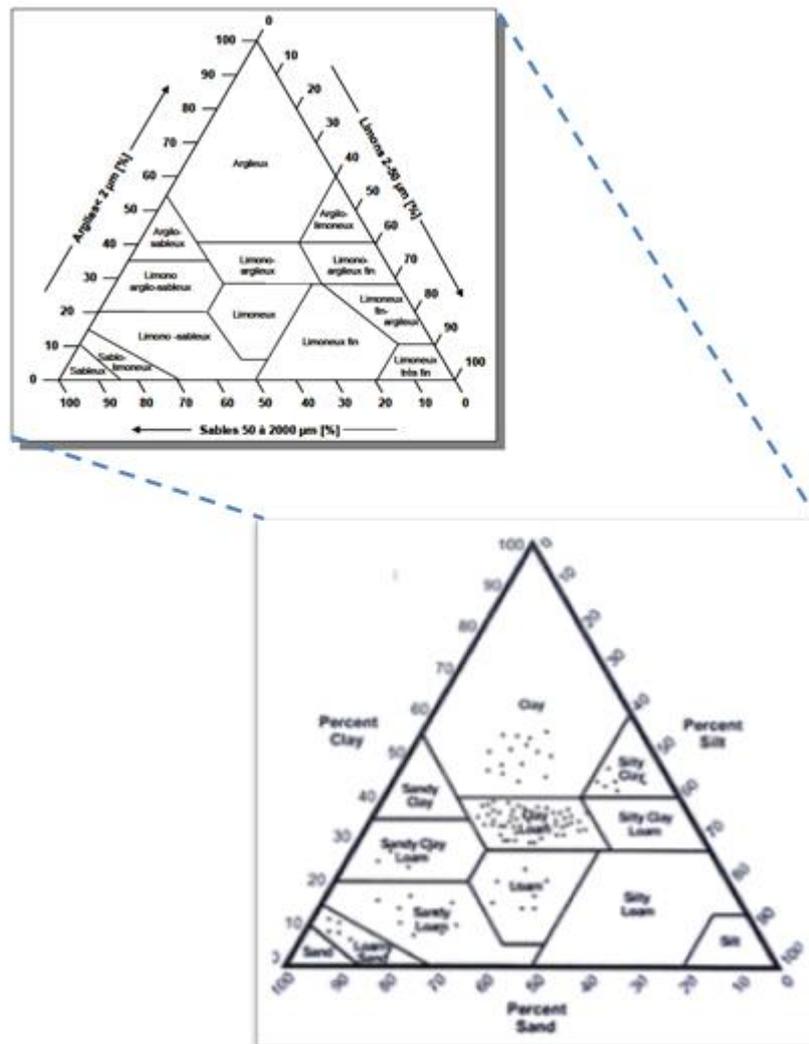


Figure 7: Triangle des textures minérales (d'après USDA, 1975, Zenati, 2010, modifié). Chaque échantillon y est situé en fonction de sa teneur pondérale en sables, limons et argiles, la somme des trois étant ramenée à 100%. La texture du sol est déterminée en traçant pour chaque pourcentage d'argile, de limon et de sable, une droite coupant cet axe et étant parallèle à l'axe précédent. L'intersection des trois droites désigne la texture de l'échantillon. La texture du sol est une propriété stable qui varie lentement et dont l'évolution peut demander plusieurs milliers d'années en fonction de la roche mère.

II-2- Occupation du sol :

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

L'occupation actuelle du sol est divisée entre une occupation naturelle et une occupation résultant de l'action de l'homme.

D'après la géomorphologie de la région, on distingue trois zones :

La montagne : zone de maquis dense,

Le piémont : zone d'extension urbaine en alternance avec les zones de maquis,

La plaine : zone à vocation agricole et industrielle.

a- Le piémont :

Sur le piémont sud de l'Edough, on peut trouver deux types d'occupation du sol coexistant : occupation agricole et occupation humaine. Cette occupation est donc liée à deux principaux facteurs :

- ✓ Le type des formations superficielles qui reflètent la géologie de la région,
- ✓ La pente qui s'adoucit en approchant de la vallée, ce qui favorise l'accumulation des formations superficielles qui permettent la pédogenèse, donc l'agriculture.

a-1- Occupation agricole :

D'après les formations superficielles, on a constaté une occupation agricole très limitée dans la région d'Oued Zied alors que, les autres lieux sont délaissés aux pâturages et aux maquis.

a-2- Occupation humaine :

La croissance industrielle dans la wilaya de Annaba pendant les années 70, a conduit à un exode rural massif des populations vers celle-ci. Cet accroissement de la population dans les grandes communes a provoqué l'extension des zones urbanisées.

Les problèmes des terrains fonciers, limités dans ces communes, aggravent celui du logement.

Une politique des nouvelles cités lancées a pour objectif de contribuer à l'amélioration des conditions de vie pour la population.

C'est pour ces raisons qu'on trouve le long du piémont des nouvelles cités implantées de part et d'autres, qui sont en extension continue. Parmi elles, on cite oued Zied, Hadjar Eddisse et Bergouga.

Les recensements de 1966, 1977 et 1987, ont permis d'apprécier la répartition de la population, qui présente une grande intégralité.

Elle se concentre le plus souvent autour des zones industrielles, terres agricoles et des points d'eau. On distingue trois zones :

a-2-a- Zone faiblement peuplée :

Elle se localise aux alentours du Lac Fetzara et plus précisément au Sud. Elle comprend les Cités de : El Eulma, Cheurfa, El Hashassia, Aziz Ahmed, Sidi Hamed et El Gantra.

Ce sont des zones dépourvues d'axes de communication et où les terres cultivables sont rares.

a-2-b- Zone moyennement peuplée :

Ce sont les Cités : d'El Kerma, Houraicha, Griche, Hadjar Eddisse et Derradji Redjem.

Ce sont des zones agricoles avoisinant des zones industrielles.

a-2-c- Zone fortement peuplée :

Elle correspond aux chefs-lieux des communes de sidi Amar, El Bouni et El Hadjar. Ce sont des zones à vocation agricole et industrielle, où les moyens de communication sont développés.

❖ **Les plaines :**

La zone d'étude fait partie de la zone agricole méditerranéenne. Les cultures qui y sont pratiquées sont principalement des cultures d'hiver pendant la période principale de précipitation, des cultures d'été pendant la période sèche où l'on pratique l'irrigation, et d'autres produits qu'on peut cultiver toute l'année.

Les cultures céréalières : la région d'étude présente des grandes étendues favorables à ce type de pratiques culturales. Elles s'étendent même sur les endroits à topographie chahutée. Blé dur, blé tendre et orge constituent les principales cultures.

Les cultures industrielles : ce sont principalement le tabac et la tomate industrielle. Cette dernière est une spécialité des wilayas d'Annaba, El Tarf et Skikda qui produisent environ 80% de la production nationale.

Les cultures maraîchères et les légumes secs : ils sont moins répandus dans la région d'étude. Parmi ces cultures, on cite la pomme de terre, pastèque, melon, pois chiche et le feuviol.

L'arboriculture : elle est moins présente dans cette région. Elle est représentée essentiellement par des agrumes, les noyaux et les pépins, les oliviers et la verticulture. On note que les oliviers sont des plantations oléicoles à l'état sauvage ou travaillés. Ce type d'arbre parfois associé à des cultures annuelles, a souvent été planté sur des terrains en pente ou en plat.

Les terrains incultes : ils occupent une grande superficie surtout dans la région de Lac Fetzara. La plupart de ces terrains incultes sont des terrains inondés pendant la pluie. Au niveau de la plaine, la région dans son ensemble est vouée aux céréales et à la tomate industrielle. Après les mois humides, en juin, le paysage prend un aspect désertique.

Les terrains nus : ce sont des terrains non occupés par une quelconque végétation. Ces terrains sont généralement situés au nord de la région et au niveau de la lunette sableuse qui sépare le Lac Fetzara et la plaine Ouest d'El Hadjar.

II-3- Conclusion :

La région de notre étude fait partie de l'ensemble géologique du Telle Nord Oriental. La région du lac Fetzara est constituée de quatre types de sol, à savoir :

Sols vertisols, sols peu évolués, sols hydromorphes et sols halomorphes.

Les sols peu évolués sont les sols les plus fertiles, les sols vertisols sont constitués d'argiles gonflantes dont la teneur est plus de 30%, les sols hydromorphes ont un mauvais drainage et une faible perméabilité et enfin, les sols halomorphes occupent la majeure partie du lac et sont riches en sels solubles.

Ces caractéristiques peuvent induire à une modification de la composition chimique des eaux du lac Fetzara.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Chapitre III

Hydroclimatologie de la région d'étude

Chapitre III
Hydroclimatologie de la région d'étude

La disponibilité de la ressource en eau est étroitement conditionnée par le climat et ses variations. Au niveau de la région d'études, ces dernières années ont été particulièrement marquées par des variations des précipitations probablement dues aux effets des changements globaux. Ces derniers ont rendu toute estimation des paramètres climatiques difficilement quantifiable.

III-1- Introduction :

La détermination des paramètres climatiques permet l'estimation de la lame d'eau écoulee ou infiltrée, expliquant ainsi les mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux superficielles et souterraines. Pour cela il est nécessaire de déterminer le bilan hydrique donc la prise en compte des précipitations, des températures, de l'évapotranspiration potentielle ou réelle.....Les précipitations et les températures, agissent directement sur l'écoulement superficiel d'un bassin versant, elles conditionnent l'état d'évaporation, qui agit sur l'équilibre de bilan hydrique, en influençant l'écoulement.

La zone de notre étude est soumise à un climat de type méditerranéen et dépend de deux paramètres principaux :

- Les précipitations,
- La température.

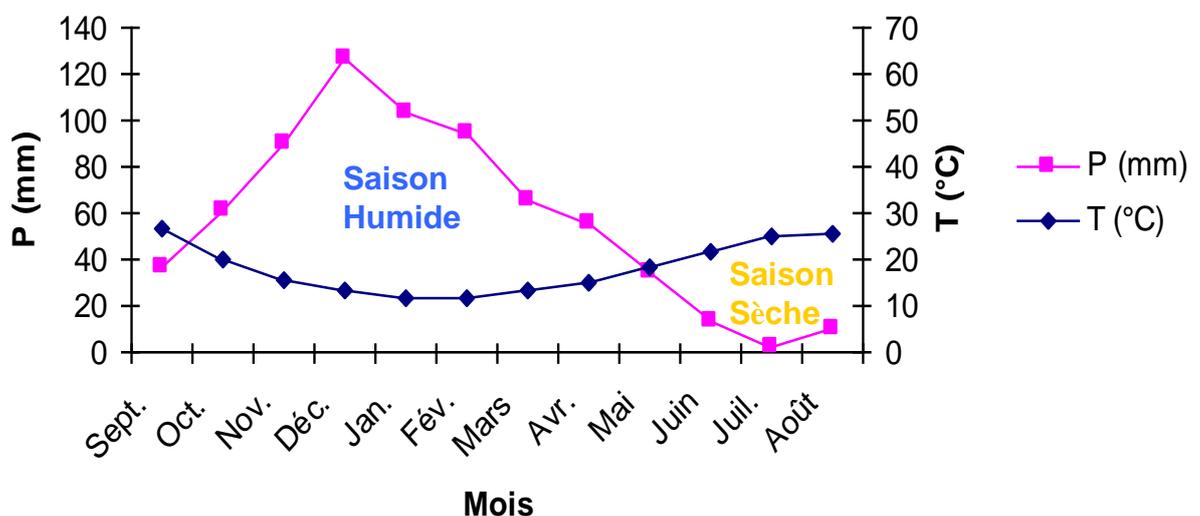


Figure 8: Courbe pluviothermique : station des Salines.

Nous remarquons, selon la (figure 8) la succession de deux saisons, l'une humide, la plus importante s'étalant du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai, la seconde sèche couvrant le reste de l'année, allant du mois de Mai au mois d'Octobre.

III-2- Les stations climatiques :

Pour étudier les variations des caractéristiques climatiques de la région, nous avons utilisé les données des stations entourant le lac. Ces dernières sont au nombre de quatre, il s'agit des stations des salines, de Pont Bouchet, de Berrahal et de Séraïdi.

Les coordonnées de ces stations, sont consignées au tableau (tableau 2) suivant :

Tableau 2 : Les stations météorologiques prises en considération.

Station	X (Km)	Y (Km)	Z (m)	Période d'observation	Distance par rapport au lac
Les Salines	955.80	403.80	03	1980-2008	15 Km au N.E
Pont Bouchet	950.25	402.80	06	1980-2008	12 Km au N.E
Berrahal	923.35	405.56	33	1980-2008	10 Km au N.O
Séraïdi	943.00	412,5	840	1980-2007	15 Km au N.O

III-3- Etude des facteurs climatiques :

III-3-1- Précipitations :

L'analyse des précipitations, donne un aperçu sur les quantités d'eau reçues par la région. Cependant pour connaître l'effet de ces précipitations sur la région, une étude de détail s'impose. La zone d'étude est considérée comme l'une des plus arrosée d'Algérie.

III-3-1-1- Les précipitations moyennes mensuelles :

L'observation du Tableau 3, montre que les mois les plus pluvieux vont du mois d'Octobre jusqu'au mois d'Avril. Les mois les plus secs sont Juin, Juillet et Août.

Tableau 3 : Les P moyennes mensuelles en (mm) calculées pour la période 1980-2008.

Mois\Station	Sep	Oc	No	De	Jan	Fe	Ma	Av	Mai	Juin	Juil	Aout
Salines	36.5	61.5	90.11	126.95	103.0	94.57	65.55	55.38	34.70	13.64	2.32	9.68
Pont Bouchet	32.4	54.9	84.79	114.24	88.25	65.63	61.10	50.01	31.94	12.92	3.49	9.87

Berrahal	26.3	42.4	85.66	112.80	110.71	87.71	59.28	57.34	37.49	10.51	2.88	6.23
Séraïdi	59.0	111.4	171.4	208.1	185.9	131.8	109.4	100.3	53.0	15.7	7.3	19.0

III-3-1-2- Représentation mensuelle des précipitations :

Pour mettre en évidence la variation mensuelle des précipitations, nous avons réalisé un histogramme montrant la variation mensuelle des précipitations, comme exemple nous avons pris la station des salines.

III-3-1-2-1- Histogramme de la station des salines :

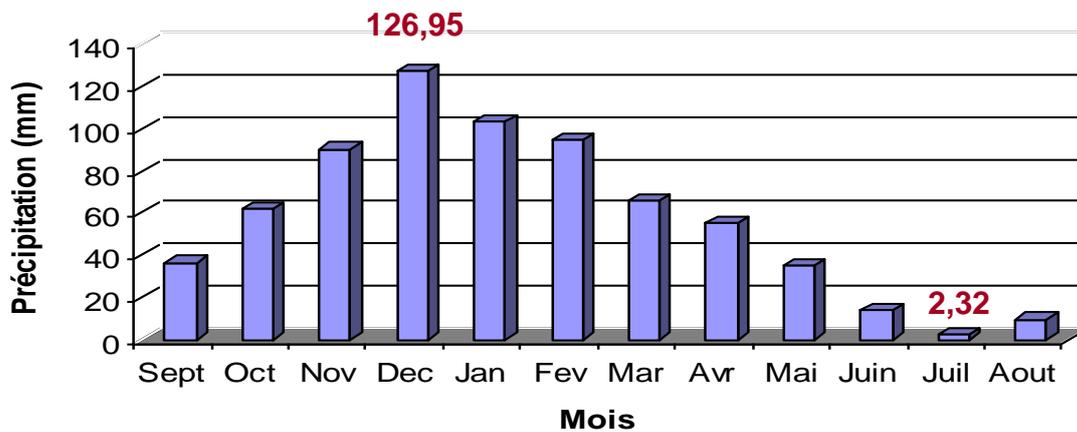


Figure 9 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles de la station des Salines (1980-2008)

L'historgramme précédent (figure 9), montre que la période pluvieuse s'étale du mois d'Octobre jusqu'au mois d'Avril. Par contre, les mois secs sont Juin, Juillet et Août. A ce titre le maximum des précipitations est observé au mois de Décembre pour les quatre stations. Aux salines il atteint 126,95 mm, il est de 114.24mm à Pont Bouchet, de 112.80 mm à Berrahal et atteint 208.1 mm à Séraïdi. Le mois le moins pluvieux est Juillet, les moyennes calculées, se répartissent comme suit : aux Salines (2,32 mm), à Pont Bouchet (3,49 mm), à Berrahal (2,88 mm) et à Séraïdi (7.3mm).

III-3-1-2-2- Coefficient pluviométrique (H) :

Ce coefficient nous permet de distinguer si l'année considérée est excédentaire ou déficitaire. Une année est dite excédentaire (AE) si $H > 1$, par contre elle sera considérée comme déficitaire (AD), dans le cas où $H < 1$.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Ce coefficient est défini, comme étant le rapport de la pluviométrie d'une année (P) sur la pluviométrie moyenne annuelle (P') observée à une station donnée :

$$H = P / P'$$

Avec : H : Coefficient pluviométrique

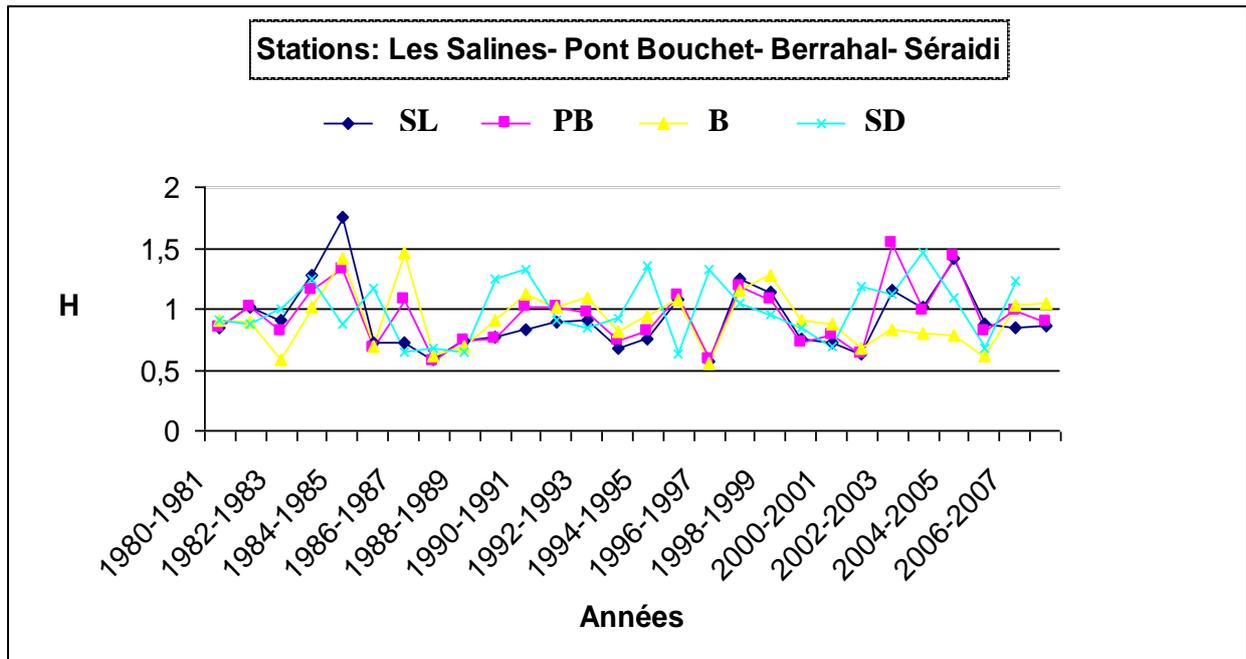
P : Pluviométrie d'une année (mm)

P' : Pluviométrie moyenne annuelle (mm)

Tableau 4: Précipitations moyennes annuelles (mm) et coefficient pluviométrique (H) des stations ;
Salines, pont Bouchet et Berrahal (1980-2008)

Année	Station Des Salines			Station Pont Bouchet			Station De Berrahal			Station de Séraïdi		
	P(mm)	H	Rq	P(mm)	H	Rq	P(mm)	H	Rq	P(mm)	H	Rq
1980-81	633	0,85	AD	557,5	0,85	AD	522,4	0,91	AD	1066,8	0,91	AD
1981-82	760,4	1,02	AE	665,4	1,01	AE	512,9	0,89	AD	1027,9	0,87	AD
1982-83	678,1	0,91	AD	529,8	0,81	AD	331,9	0,58	AD	1176,4	1	AE
1983-84	945,1	1,27	AE	757,3	1,15	AE	582,5	1,01	AE	1458,9	1,24	AE
1984-85	1311,4	1,76	AE	870,8	1,33	AE	815,9	1,42	AE	1024,1	0,87	AD
1985-86	534,2	0,72	AD	437,2	0,67	AD	401,6	0,7	AD	1381	1,17	AE
1986-87	921,7	0,73	AE	707,5	1,08	AE	837,5	1,46	AE	763,6	0,65	AD
1987-88	409,5	0,59	AD	372,5	0,57	AD	357,7	0,62	AD	786	0,67	AD
1988-89	553,8	0,74	AD	487,8	0,74	AD	395,9	0,69	AD	760,2	0,64	AD
1989-90	534,2	0,77	AD	498,5	0,76	AD	522,2	0,91	AD	1453,4	1,24	AE
1990-91	616,3	0,83	AD	672,5	1,02	AE	645,3	1,12	AE	1558,5	1,33	AE
1991-92	668,1	0,9	AD	660	1,01	AE	583	1,02	AE	1067,7	0,91	AD
1992-93	674,8	0,91	AD	638,4	0,97	AE	631,6	1,1	AE	996	0,85	AD
1993-94	497,7	0,67	AD	488,6	0,74	AD	472,7	0,82	AD	1095	0,93	AD
1994-95	559,6	0,75	AD	533,6	0,81	AD	539,2	0,94	AD	1597,1	1,36	AE
1995-96	805,7	1,08	AE	727,5	1,11	AE	619,5	1,08	AE	737,8	0,63	AD
1996-97	422,7	0,57	AD	383	0,58	AD	321,2	0,56	AD	1553,6	1,32	AE
1997-98	926,8	1,25	AE	777,3	1,18	AE	668,7	1,16	AE	1219,6	1,04	AE
1998-99	847,4	1,14	AE	700,5	1,07	AE	726,9	1,27	AE	1113	0,95	AD
1999-00	558,5	0,75	AD	470,5	0,72	AD	519,7	0,91	AD	992	0,84	AD
2000-01	543,9	0,73	AD	516	0,79	AD	503,3	0,88	AD	827,1	0,7	AD
2001-02	471	0,63	AD	410,5	0,63	AD	385,7	0,67	AD	1401	1,19	AE
2002-03	854,3	1,15	AE	1009,2	1,54	AE	476,9	0,83	AD	1331,3	1,13	AE
2003-04	704,4	1,01	AE	648,1	0,99	AE	458,5	0,8	AD	1714,9	1,46	AE
2004-05	987,7	1,42	AE	940	1,43	AE	455,6	0,79	AD	1294,2	1,1	AE
2005-06	612,5	0,88	AD	536,5	0,82	AD	356,6	0,62	AD	807,3	0,68	AD
2006-07	584,5	0,84	AD	651,8	0,99	AE	593,7	1,03	AE	1444,9	1,23	AE
2007-08	578,8	0,86	AD	587	0,89	AD	596,1	1,04	AE	/	/	

Moyenne	743,45		656,43		574,06		1172,2		
---------	--------	--	--------	--	--------	--	--------	--	--



Avec : SL : Station des Salines, PB : Pont Bouchet, B : Berrahal et SD : Séraidi

Figure 10: Variations des coefficients pluviométriques.

(Période 1980 - 2008)

La figure (10) illustre les variations des coefficients pluviométriques (H) des quatre stations. Le coefficient pluviométrique permet de distinguer les années excédentaires et déficitaires enregistrées dans les quatre stations étudiées.

- **Années excédentaires :**

1981, 1984, 1985, 1987, 1998, 1999.

- **Années déficitaires :**

1980, 1982, 1983, 1986, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008.

III-3-1-3- Répartition saisonnière des précipitations :

La subdivision des pluies de l'année pour chaque saison, est faite selon les saisons:

- L'automne, comprend les mois de septembre, d'octobre et de novembre,
- L'hiver comporte les mois de décembre, de janvier et de février,
- Le printemps les mois de mars, d'avril et de mai,

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

➤ L'été comprend les mois de juin, de juillet et d'août.

Chaque saison voir chaque mois se caractérise par ses propres précipitations. De ce fait, il devient évident de voir la contribution de chaque saison dans le total des précipitations, ceci nous amène à déterminer la répartition saisonnière des précipitations et de dresser une classification selon les totaux enregistrés.

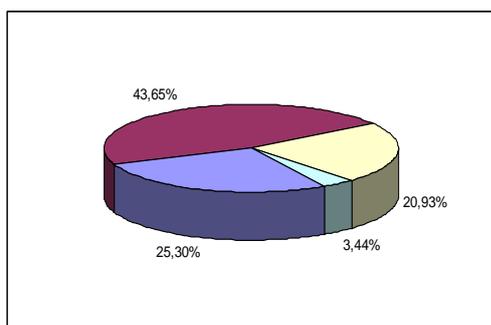
Tableau 5: Répartition saisonnières des précipitations des stations : les Salines, Pont Bouchet et Berrahal (1980-2008)

Stations	Les Salines		Pont Bouchet		Berrahal		Seraidi	
	P (mm)	P %	P (mm)	P %	P (mm)	P %	P (mm)	P %
Automne (A)	188,12	25,30	172,2	26,23	154,42	26,89	314,7	29,15
Hiver (H)	324,57	43,65	268,12	40,84	311,22	54,21	525,8	44,85
Printemps (P)	155,63	20,93	143,05	21,79	154,11	26,84	262,7	22,41
Été (E)	25,64	3,44	26,28	4,00	19,62	3,41	42	3,58
Indices saisonniers	HAPE		HAPE		HAPE		HAPE	
Type de Climat	Hivernal		Hivernal		Hivernal		Hivernal	

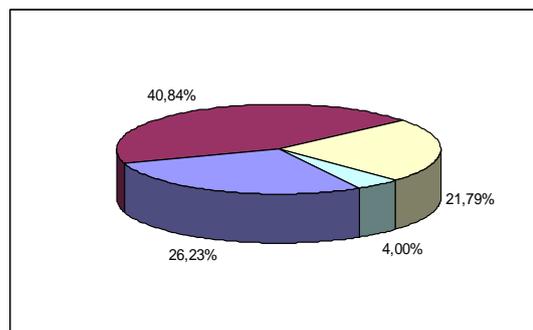
Les résultats obtenus (tableau.5) montrent que la saison hivernale est la plus pluvieuse pour les quatre stations étudiées ; (324,57 mm aux Salines, 268,12 mm à Pont Bouchet, 311,22 mm à Berrahal et 525.8 à Séraïdi), ceci correspond en matière de pourcentage à 43,65 % aux Salines , 40,84 % à Pont Bouchet, 54,21 % à Berrahal et 44.85 % à Séraïdi.

En saison printanière, le maximum des précipitations est de l'ordre de 155,63 mm soit 20,93% pour la station des Salines, 143,05 mm soit 21,79 % pour la station de Pont Bouchet, à la station de Berrahal il est de 154,11 mm soit 26,84 % et il est de 262.7 mm, soit 22.41 % à Séraïdi. L'Automne, cette saison est considérée comme la seconde saison pluvieuse. Les précipitations enregistrées, au niveau de la station des Salines sont de 188.12 mm, soit 25.30%, à la station de Pont Bouchet 172.2 mm soit 26.23, à la station de Berrahal, le total est de 154.42 mm donc 27% et à Séraïdi ce total est de 314.7 mm soit 29.15. La saison estivale, reste la plus sèche, les précipitations enregistrées sont de l'ordre de 25,64 mm soit 3,44 % à la station des Salines, de 26,28 mm soit 4 % à la station de Pont Bouchet, de 19,62 mm soit 3,41 % à la station de Berrahal et de 42 mm, soit 3.58% pour la station de Séraïdi. (figure 11 - a,b,c,d)

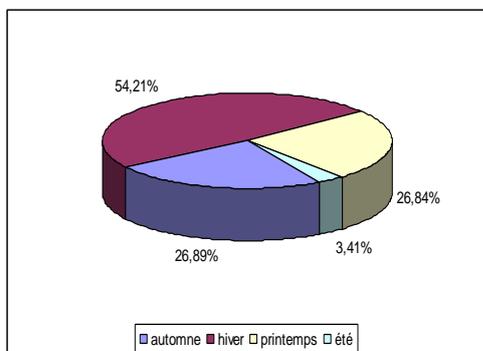
L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?



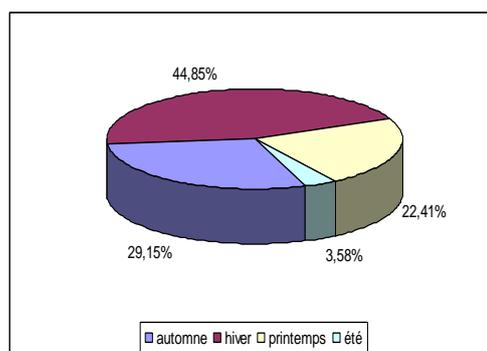
a : station des Salines



b : station de pont Bouchet



c- Station de Berrahal



d- Station de Séraïdi.

Figure 11- (a, b, c, d): Répartition saisonnière des précipitations (%) au niveau des quatre stations

III-3-2- Température :

La température est le second facteur important dans l'étude climatique, car elle agit directement sur le phénomène de l'évapotranspiration et par conséquent le déficit d'écoulement annuel et saisonnier. Les températures utilisées se rapportent à la station des Salines durant 28 années d'observation (1980-2008)

Tableau 6 : Moyennes mensuelles des températures calculées à la station des Salines. En (°C) au cours de la période 1980-2008.

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Moy
Températures Enregistrées	26,50	20	15,64	13,07	11,87	11,74	13,21	15,22	18,26	21,94	25.0	25,78	18,18

L'histogramme suivant (figure 12), montre les variations des moyennes mensuelles des températures. Nous remarquons que les faibles températures sont mesurées au cours des mois de Décembre, de Janvier, de Février et de Mars, le minimum étant de 11,74°C. Les plus

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

fortes valeurs caractérisent les mois de Juin, de Juillet et d'Août avec une valeur maximale de 25,78°C.

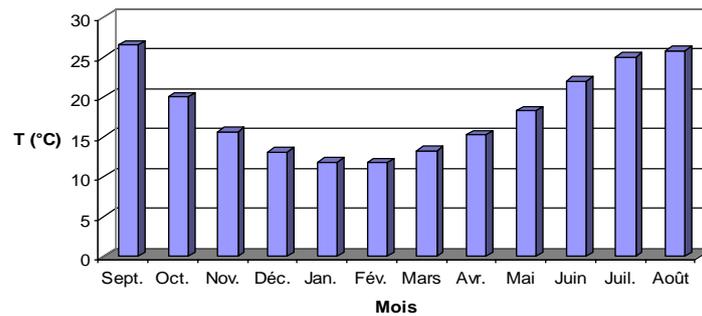


Figure 12- Variation des moyennes mensuelles des Températures (Salines, 1980-2008)

III-3-3- L'humidité :

L'humidité relative est le rapport exprimé en pourcentage de la tension de vapeur au maximal correspondant à la température mesurée au thermomètre sec. En général, les moyennes mensuelles ne descendent pas au-dessous de 70 %.

On a pu remarquer que l'humidité maximale à la station des Salines est de l'ordre de 77,5 % au mois de décembre, par contre l'humidité minimale est de 70,2 % au mois de juillet, avec une moyenne annuelle de l'ordre de 74,65 %.

Le tableau (tableau 7) ci-dessous représente les variations moyennes mensuelles de l'humidité de la station des Salines (1980-2008)

Tableau 7: Humidité moyenne mensuelle (%), station des Salines (1980-2008)

	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août
Les Salines	72,3	74,8	76,2	77,5	79,3	76,5	75	74,2	74,7	73,1	70,2	71,8

III-3-4- Le vent :

Le vent est l'un des éléments les plus déterminants des régimes pluviaux de l'évapotranspiration et par conséquent le climat de la région. Le tableau suivant, donne la vitesse du vent mesurée à la station des Salines (en m/s). Nous remarquons que les vents dominant sont de direction Nord et Nord-Ouest, les vitesses moyennes varient entre 3 et 3,8 m/s.

Tableau 8: Les moyennes mensuelles calculées des vitesses du vent, stations des Salines et Séraïdi (1980-2008)

Station des salines												
Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Aou
Vitesse du vent (m/s)	3,9	4,1	4	3,8	3,6	3,8	4,1	3,8	3,8	3,5	4	4,3
Station de Séraïdi												
Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jui	Aou
Vitesse du vent (m/s)	3,8	3,6	3,5	3,3	2,4	2,1	1,8	1,9	2,5	2,5	3,2	3,8

Les vitesses les plus élevées sont enregistrées aux mois d'Octobre, mois de Mars et au mois d'Août avec des vitesses oscillant entre 4.1 et 4.3 m/s, par contre le mois de Juin reste le mois venteux avec 3.5 m/s. Au niveau de la station de Séraïdi, les mois les moins venteux sont Mars et Avril avec 1.8 à 1.9 m/s, par contre la période allant du mois d'Août au mois d'Octobre, se caractérise par des vitesses atteignant 3.6 à 3.8 m/s.

III-3-5- Caractéristiques climatiques d'aridité :

Emmanuelle DE MARTONNE (1925) a proposé une formule climatologique appelé indice d'aridité, en combinant entre précipitations et températures :

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

Avec A : Indice d'aridité annuelle

P : Précipitations moyennes annuelles en (mm)

T : Températures moyennes annuelles en (°C)

Selon DE MARTONNE :

- Si $A < 5$: le climat est hyper aride,
- Si $5 < A < 10$: le climat est très sec,
- Si $10 < A < 20$: le climat est sec,
- Si $20 < A < 30$: le climat est tempéré,

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

- Si $A > 30$: le climat est humide.

Les résultats obtenus sont condensés dans le tableau 9.

Tableau 9: Indice d'aridité calculé (d'après la formule DE MARTONNE).

Stations	Indice d'aridité (A)	Type de Climat
Les Salines	24,66	Tempéré
Pont Bouchet	21,83	Tempéré
Berrahal	20,09	Tempéré
Séraïdi	46,33	Humide

L'observation du tableau précédent, montre deux types de climat, le premier est de type tempéré et caractérise les stations des Salines, Berrahal, et Pont Bouchet. Le second est de type humide caractérise la station de Séraïdi.

III-3-6- Le bilan hydrique :

Pour estimer le bilan hydrique la méthode de THORNTHAITE est la plus appliquée, car se rapprochant au mieux de la réalité de la zone d'étude. Elle prend en considération la RFU, qui est elle-même tient compte du type de sol, de l'enracinement et des plantes.... Dans la pratique et pour la région, on admet que la RFU, atteint un maximum de 100 mm.

Cette méthode est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (notée par la suite RFU).

On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (la RFU) ; cette eau peut être reprise pour l'évaporation par l'intermédiaire des plantes.

La quantité d'eau stockée dans la RFU est bornée par 0 (la RFU vide) et RFU max (capacité maximale de la RFU qui est de l'ordre de 0 à 200 mm suivant les sols et sous-sols considérés, avec une moyenne de l'ordre de 100 mm).

On admet que la satisfaction de l'ETP a priorité sur l'écoulement, c'est-à-dire qu'avant qu'il n'y ait d'écoulement, il faut avoir satisfait le pouvoir évaporant ($ETP = ETR$). Par ailleurs, la complétion de la RFU est également prioritaire sur l'écoulement.

On établit ainsi un bilan à l'échelle mensuelle, à partir de la pluie du mois P, de l'ETP et de la RFU.

Si $P > ETP$, alors :

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

- $ETR = ETP$
- il reste un excédent ($P - ETP$) qui est affecté en premier lieu à la RFU, et, si la RFU est complète, à l'écoulement Q

Si $P < ETP$:

- on évapore toute la pluie et on prend à la RFU (jusqu'à la vider) l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETR soit :
- $ETR = P + \min(RFU, ETP - P)$
- $RFU = 0$ ou $RFU + P - ETP$
- si $RFU = 0$, la quantité ($DA = ETP - ETR$) représente le déficit agricole, c'est-à-dire sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.

L'établissement du bilan d'eau d'une région nécessite l'évaluation de la répartition des précipitations entre les composantes suivantes :

- l'écoulement.
- L'infiltration.
- L'évapotranspiration potentielle (ETP) et réelle (ETR).

III-3-6-1- L'évapotranspiration :

Dans les études hydrogéologiques, les deux éléments principaux du bilan, évaporation et transpiration sont réunis en un seul terme : L'évapotranspiration.

L'évapotranspiration est la plus importante des paramètres, c'est la somme des quantités d'eau exprimées en mm évaporées par la surface du sol et utilisées par les plantes.

L'évapotranspiration ou l'évaporation totale (E.T) est l'ensemble des phénomènes d'évaporation (processus physique) et de transpiration (phénomène biologique).

On distingue :

- L'évapotranspiration potentielle (ETP).
- L'évapotranspiration réelle (ETR).

III-3-6-1-1- L'évapotranspiration potentielle (ETP) :

On appelle évapotranspiration potentielle (ETP), exprimée en hauteur de lame ou tranche d'eau évaporée, la somme des quantités d'eau pouvant s'évaporer et transpirer sur une surface donnée et pendant une période bien définie, en considérant des apports d'eau suffisants.

Pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle, on utilise la formule de Thornthwaite.

- **Formule de Thornthwaite :**

C.W Thornthwaite a établi une correction entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle, il définit d'abord un indice thermique mensuel (i), où :

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

Où :

$$I = \sum_1^{12} i \quad \Rightarrow \quad i = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.5}$$
$$a = \left(\frac{1.6}{100} \right) I + 0.5$$

Avec :

ETP : évapotranspiration potentielle en mm.

T : Température moyenne mensuelle (1976-2006) en °C.

i : Indice thermique mensuel.

I : Indice thermique annuel.

K : Coefficient d'ajustement mensuel dont les valeurs sous nos climats tempérés.

III-3-6-1-2- L'évapotranspiration réelle (ETR) :

Par définition, on appelle évapotranspiration réelle effective actuelle ou encore déficit d'écoulement (ETR) la somme de l'évapotranspiration et de la transpiration réelle pour une surface donnée et une période définie.

Pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) par la méthode de Thornthwaite est liée au volume de précipitation. 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, le surplus, représentera l'écoulement superficiel.

- 2^{ème} cas : $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$.

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

- 3^{ème} cas : $P < ETP$ et $RFU = 0 \Rightarrow ETR = P$.

Là on aura un déficit qui représente la quantité d'eau à apporter pour l'irrigation (déficit agricole).

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Le bilan hydrique vise à déterminer la répartition des précipitations reçues par une surface, il tient compte de :

P : précipitation brute moyenne mensuelle en (mm).

ETR : Evapotranspiration réelle en (mm).

ETP : Evapotranspiration potentielle en (mm).

I : L'infiltration efficace atteignant les eaux souterraines en (mm).

R : Ruissellement qui rejoint l'oued en (mm).

RFU : Réserve facilement utilisable (le RFU = 100 mm pour les trois stations).

- Pour le calcul du bilan d'eau, la valeur de la RFU a été choisie en fonction de la nature du sol.

- Le sol de la région étudiée étant hétérogène, nous avons estimé les valeurs de la RFU selon la formule de Hallaire qui s'écrit de la manière suivante :

$$RFU = \frac{C-f}{100} \times H \times D + 30 \quad (mm)$$

Avec : RFU : Réserve en eau du sol en (mm).

C : Capacité au champ.

f : Capacité au point de flétrissement.

H : profondeur du sol en (mm).

D : densité apparente, D = 1.

Les valeurs de $C-f$ donnée par Hallaire selon la nature du sol sont :

* $C-f = 5\%$ pour un sol sableux.

* $C-f = 10\%$ à 15% limoneux.

* $C-f = 20\%$ pour un sol argilo-sableux.

Tableau 10 : Estimation des valeurs de la RFU selon la formule de Hallaire

Secteurs	Caractéristiques pédologiques du sol et profondeur d'enracinement	RFU (mm)
La plaine de Annaba	* Sols Argilo-limoneux : $C-f = 15\%$ * Profondeur moyenne d'enracinement : 450 mm	100

Les tableaux ci-dessous résument les bilans des eaux pour les quatre stations, à savoir Les Salines, Pont Bouchet, Berrahal et Séraïdi, établis selon la méthode de Thornthwaite :

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Tableau 11 : Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite De la Station des Salines (1980-81/2006-07)

	T°C	IT	CL	ETPC	P(mm)	BH	CH	VR	RFU	ETPR	Def	Exc
S	23	10,1	1,03	105,2	36,5	-68,7	-0,7	0,0	0,0	36,5	68,7	0,0
O	20	8,2	0,97	76,4	61,6	-14,8	-0,2	0,0	0,0	61,6	14,8	0,0
N	15,6	5,6	0,86	42,7	90,1	47,4	1,1	47,4	47,4	42,7	0,0	0,0
D	12,7	4,1	0,81	27,5	127	99,5	3,6	52,6	100,0	27,5	0,0	46,9
J	11,6	3,6	0,87	24,9	103	78,1	3,1	0,0	100,0	24,9	0,0	78,1
F	11,7	3,6	0,85	24,8	78,3	53,5	2,2	0,0	100,0	24,8	0,0	53,5
M	13,3	4,4	1,03	38,1	65,6	27,5	0,7	0,0	100,0	38,1	0,0	27,5
A	15,2	5,4	1,10	52,1	55,3	3,2	0,1	0,0	100,0	52,1	0,0	3,2
M	18,2	7,1	1,21	80,0	34,8	-45,2	-0,6	-45,2	54,8	80,0	0,0	0,0
J	21,9	9,4	1,22	113,7	14,7	-99,0	-0,9	-54,8	0,0	69,5	44,2	0,0
J	25	11,4	1,24	147,8	2,3	-145,5	-1,0	0,0	0,0	2,3	145,5	0,0
A	25,7	11,9	1,16	145,5	9,7	-135,8	-0,9	0,0	0,0	9,7	135,8	0,0
Annuel	17,8	84,7		878,6	678,9	-199,7				469,6	409,0	209,3

Tableau 12 : Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite de la station des Berrahal (1980-81/2006-07)

	T°C	IT	CL	ETPC	P(mm)	BH	CH	VR	RFU	ETPR	Def	Exc
S	23	10,1	1,03	105,2	28,7	-76,5	-0,7	0,0	0,0	28,7	76,5	0,0
O	20	8,2	0,97	76,4	57,4	-19,0	-0,2	0,0	0,0	57,4	19,0	0,0
N	15,6	5,6	0,86	42,7	92,7	50,0	1,2	50,0	50,0	42,7	0,0	0,0
D	12,7	4,1	0,81	27,5	136,1	108,6	4,0	50,0	100,0	27,5	0,0	58,6
J	11,6	3,6	0,87	24,9	110,1	85,2	3,4	0,0	100,0	24,9	0,0	85,2
F	11,7	3,6	0,85	24,8	83,9	59,1	2,4	0,0	100,0	24,8	0,0	59,1
M	13,3	4,4	1,03	38,1	65	26,9	0,7	0,0	100,0	38,1	0,0	26,9
A	15,2	5,4	1,10	52,1	60,1	8,0	0,2	0,0	100,0	52,1	0,0	8,0
M	18,2	7,1	1,21	80,0	36,4	-43,6	-0,5	-43,6	56,4	80,0	0,0	0,0
J	21,9	9,4	1,22	113,7	12,8	-100,9	-0,9	-56,4	0,0	69,2	44,5	0,0
J	25	11,4	1,24	147,8	3,3	-144,5	-1,0	0,0	0,0	3,3	144,5	0,0
A	25,7	11,9	1,16	145,5	7,3	-138,2	-0,9	0,0	0,0	7,3	138,2	0,0
Annuel	17,8	84,7		878,6	693,8	-184,8				455,9	422,7	237,9

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Tableau 13 : Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite De la station de Séraidi (1980-81/2006-07)

	T°C	IT	CL	ETPC	P(mm)	BH	CH	VR	RFU	ETPR	Déf.	Exc
S	20,3	8,3	1,03	93,0	59	-34,0	-0,4	0,0	0,0	59,0	34,0	0,0
O	17	6,4	0,97	65,9	111	45,1	0,7	45,1	45,1	65,9	0,0	0,0
N	11,8	3,7	0,86	32,5	171,3	138,8	4,3	54,9	100,0	32,5	0,0	83,9
D	8,4	2,2	0,81	17,7	208,1	190,4	10,7	0,0	100,0	17,7	0,0	190,4
J	7,7	1,9	0,87	16,6	185,9	169,3	10,2	0,0	100,0	16,6	0,0	169,3
F	8	2,0	0,85	17,2	131,8	114,6	6,7	0,0	100,0	17,2	0,0	114,6
M	10,3	3,0	1,03	31,3	109,4	78,1	2,5	0,0	100,0	31,3	0,0	78,1
A	12,7	4,1	1,10	46,8	100,3	53,5	1,1	0,0	100,0	46,8	0,0	53,5
M	17	6,4	1,21	82,2	53	-29,2	-0,4	-29,2	70,8	82,2	0,0	0,0
J	21,3	9,0	1,22	119,0	15,7	-103,3	-0,9	-70,8	0,0	86,5	32,4	0,0
J	24,6	11,2	1,24	152,4	7,3	-145,1	-1,0	0,0	0,0	7,3	145,1	0,0
A	24,3	11,0	1,16	139,8	19	-120,8	-0,9	0,0	0,0	19,0	120,8	0,0
Annuel	15,3	69,1		814,2	1172,2	357,6				481,9	332,3	689,9

Tableau 14: Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite De la station de Pont Bouchet (1980-81/2006-07)

	T°C	IT	CL	ETPC	P(mm)	BH	CH	VR	RFU	ETPR	Def	Exc
S	23	10,1	1,03	105,2	34,8	-70,4	-0,7	0,0	0,0	34,8	70,4	0,0
O	20	8,2	0,97	76,4	52	-24,4	-0,3	0,0	0,0	52,0	24,4	0,0
N	15,6	5,6	0,86	42,7	84,6	41,9	1,0	41,9	41,9	42,7	0,0	0,0
D	12,7	4,1	0,81	27,5	113,9	86,4	3,1	58,1	100,0	27,5	0,0	28,3
J	11,6	3,6	0,87	24,9	91	66,1	2,6	0,0	100,0	24,9	0,0	66,1
F	11,7	3,6	0,85	24,8	66,8	42,0	1,7	0,0	100,0	24,8	0,0	42,0
M	13,3	4,4	1,03	38,1	58,7	20,6	0,5	0,0	100,0	38,1	0,0	20,6
A	15,2	5,4	1,10	52,1	51,2	-0,9	0,0	-0,9	99,1	52,1	0,0	0,0
M	18,2	7,1	1,21	80,0	32,4	-47,6	-0,6	-47,6	51,5	80,0	0,0	0,0
J	21,9	9,4	1,22	113,7	12,9	-100,8	-0,9	-51,5	0,0	64,4	49,3	0,0
J	25	11,4	1,24	147,8	2,5	-145,3	-1,0	0,0	0,0	2,5	145,3	0,0
A	25,7	11,9	1,16	145,5	9,5	-136,0	-0,9	0,0	0,0	9,5	136,0	0,0
Annuel	17,8	84,7		878,6	610,3	-268,3				453,3	425,3	157,0

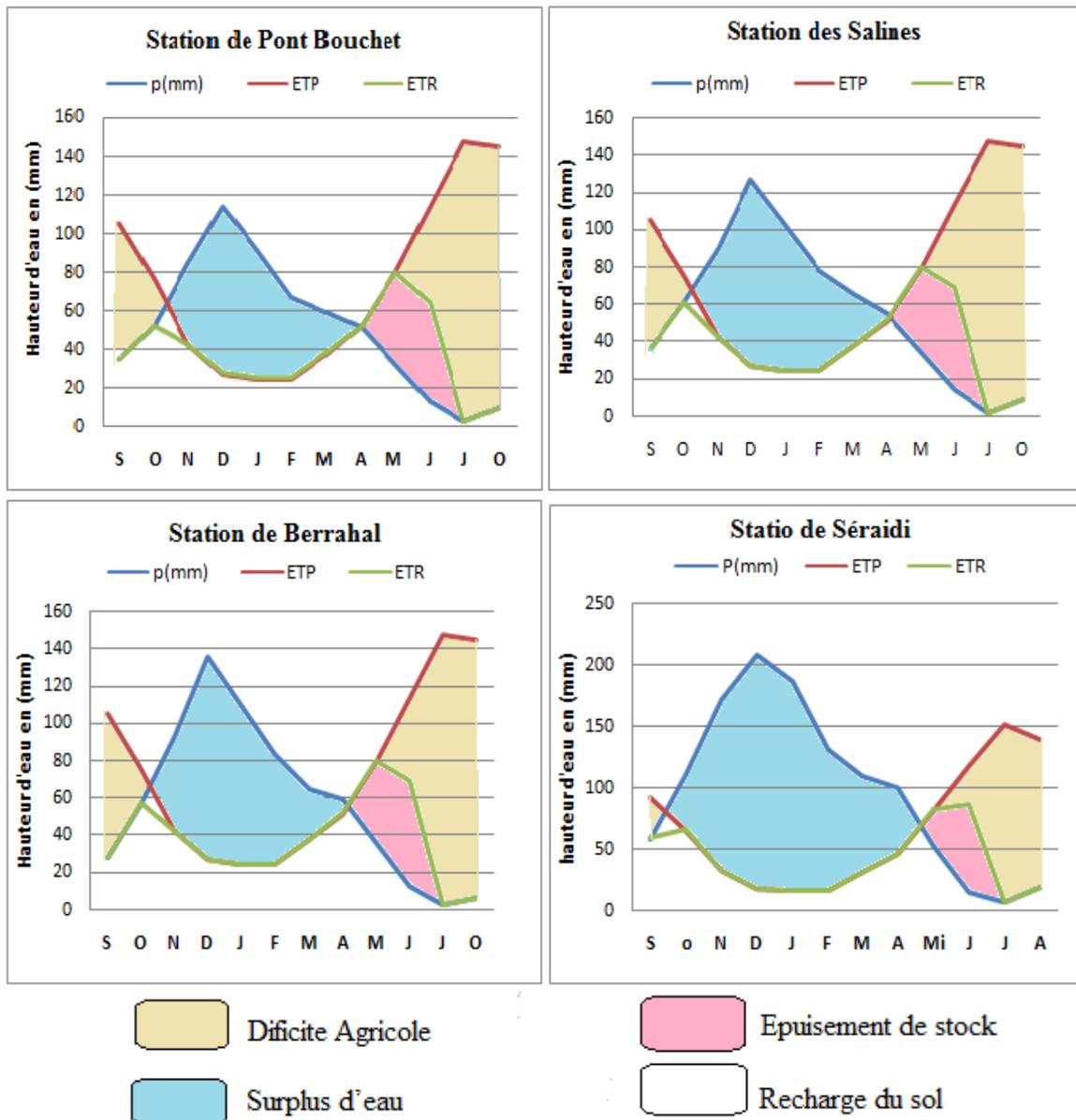


Figure 13- Graphiques du bilan d'eau (THORNTHWAITE)
Stations de Pont Bouchet, les Salines, Berrahal et Séraïdi (1980-81/2006-07)

III-3-7- L'interprétation du bilan hydrique :

L'établissement du bilan hydrique nous permet de connaître les différents paramètres (ETP, ETR, RFU, Def, Exc) qui nous aide à comprendre le fonctionnement des systèmes hydrauliques de surface.

Lorsque la réserve facilement utilisable (RFU) est totale, il y a un surplus d'eau accompagné généralement par un écoulement. Dès que, la RFU diminue, il y a un épuisement du stock au point où la RFU sera complètement vide, il y aura un déficit agricole (DA).

La figure 13 présente les graphismes des bilans d'eau (Thornthwaite) qui illustrent les résultats des tableaux N°11,12,13 et 14 des quatre stations (les Salines, Séraïdi, Berrahal et Pont Bouchet),

a) Station des Salines :

Le bilan d'eau établi par la formule de Thornthwaite montre que l'ETP atteint son maximum au mois de juillet (147.8 mm) et son minimum au mois de février (24.80 mm).

La reconstitution de la RFU s'effectue au mois de novembre (47.4 mm) et atteint son maximum (100 mm) à partir du mois de novembre jusqu'au mois d'avril, à partir duquel on assiste à un épuisement du stock.

L'écoulement commence après le remplissage de la RFU (100 mm) c'est-à-dire au mois de décembre et se termine en avril, avec un maximum au mois de Janvier (78.1 mm) et un minimum au mois d'avril (3.2 mm).

L'excédent égal à (209.03 mm) représentant 30.83 % des précipitations annuelles, alors que l'ETR est de l'ordre de (469.6 mm) représentant 69.17 % des précipitations annuelles.

Le déficit agricole DA débute au mois de juillet et se poursuit jusqu'au mois d'octobre.

b) Station de Berrahal :

Le bilan d'eau établi par la formule de Thornthwaite montre que l'ETP atteint son maximum au mois de juillet (147.8 mm) et son minimum au mois de février (24.80 mm).

La reconstitution de la RFU s'effectue au mois de novembre (50,0 mm) et atteint son maximum (100 mm) à partir du mois de décembre jusqu'au mois d'avril, à partir duquel on assiste à un épuisement du stock.

L'écoulement commence après le remplissage de la RFU (100 mm) c'est-à-dire au mois de décembre et se termine en avril, avec un maximum au mois de Janvier (85.2 mm) et un minimum au mois d'avril 8,0 mm).

L'excédent égal à (237.9 mm) représentant 34.29 % des précipitations annuelles alors que l'ETR est de l'ordre de (455.9 mm) représentant 65.71 % des précipitations annuelles.

Le déficit agricole DA débute au mois de juillet, et se poursuit jusqu'au mois d'octobre.

c) Station de Pont Bouchet :

Le bilan d'eau établi par la formule de Thornthwaite montre que l'ETP atteint son maximum au mois de juillet (147.8 mm) et son minimum au mois de février (24.80 mm).

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

La reconstitution de la RFU s'effectue au mois de novembre (41,90 mm) et atteint son maximum (100 mm) à partir du mois de décembre jusqu'au mois d'avril, à partir duquel on assiste à un épuisement du stock.

L'écoulement commence après le remplissage de la RFU (100 mm) c'est-à-dire au mois de décembre et se termine en avril, avec un maximum au mois de Janvier (66.1 mm) et un minimum au mois de Mars (20,60 mm).

L'excédent égal à (157.0 mm) représentant 25.72 % des précipitations annuelles alors que l'ETR est de l'ordre de (435.3 mm) représentant 72.28 % des précipitations annuelles.

Le déficit agricole DA débute au mois de juillet, et se poursuit jusqu'au mois d'octobre.

d) Station de Séraïdi :

Le bilan d'eau établi par la formule de Thornthwaite montre que l'ETP atteint son maximum au mois de juillet (152.4 mm) et son minimum au mois de janvier (16.60 mm).

La reconstitution de la RFU s'effectue au mois de novembre (45,10 mm) et atteint son maximum (100 mm) à partir du mois de décembre jusqu'au mois d'avril, à partir duquel on assiste à un épuisement du stock.

L'écoulement commence après le remplissage de la RFU (100 mm) c'est-à-dire au mois de décembre et se termine en avril, avec un maximum au mois de Décembre (190,4 mm) et un minimum au mois d'avril 53,5 mm).

L'excédent égal à (689.9 mm) représentant 58.85 % des précipitations annuelles alors que l'ETR est de l'ordre de (481.9 mm) représentant 41.11 % des précipitations annuelles.

Le déficit agricole DA débute au mois de mai, et se poursuit jusqu'au mois septembre.

Conclusion :

L'analyse des données climatiques d'une série d'observation de 28 ans a permis d'attribuer à la région d'étude un climat méditerranéen avec deux périodes bien distinctes :

- une période chaude et sèche.
- une période froide et humide.

Pour le calcul du bilan hydrique, la valeur de la réserve facilement utilisable (RFU) a été choisie en fonction de la nature du terrain (RFU = 100 mm).

Le bilan hydrologique est une façon de compter tous les éléments d'apport et de sortie d'eau au-dessus d'une surface donnée.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de (678.9 mm) de la station des Salines, de l'ordre de (610.2 mm) à la station de Pont Bouchet, de l'ordre de (1172.2 mm) à la station de Séraïdi et de l'ordre de (693.9 mm) à la station Berrahal de ceci dit, la plaine de Annaba est parmi les régions les plus arrosées en Algérie.

L'évapotranspiration potentielle annuelle est de 878,6 mm pour les trois stations : les salines, Pont Bouchet et Berrahal est de (814.2 mm) pour la station de Séraïdi.

L'estimation du bilan d'eau par la méthode de Thornthwaite a montré que, à partir du mois de novembre, l'apport considérable des pluies, la chute de température et la diminution de l'évapotranspiration permettent la recharge du sol mais un déficit agricole enregistré à partir du mois de juin jusqu'au mois de septembre pour la station des Salines, (et jusqu'au mois d'octobre pour la station de Pont Bouchet), et à partir du mois de mai jusqu'au mois de septembre c'est la période des basses eaux et c'est également la saison durant laquelle on irrigue, afin de rattraper ce déficit les agricultures puisent de l'eau des Oueds souvent polluée et font contaminer non seulement leurs cultures mais aussi les eaux souterraines (période correspondant à l'épuisement du stock).

III-5- Hydrologie :

D'une façon générale, l'hydrologie peut se définir comme étant l'étude du cycle de l'eau et l'estimation de ses différents flux. L'hydrologie au sens large regroupe :

- la climatologie, pour la partie aérienne du cycle de l'eau (précipitations, retour à l'atmosphère, transferts, etc. .) ;
- l'hydrologie de surface au sens strict, pour les écoulements à la surface des continents ;
- l'hydrodynamique des milieux non saturés pour les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines (infiltration, retour à l'atmosphère à partir des nappes, etc.);
- l'hydrodynamique souterraine (sensu stricto) pour les écoulements en milieux saturés.

L'hydrologie de surface est la science qui traite essentiellement des problèmes qualitatifs et quantitatifs des écoulements à la surface des continents. Ces problèmes se ramènent généralement à des prévisions (associer à une date, une certaine grandeur) ou des prédéterminations (associer à une grandeur, une certaine probabilité) de débits ou de volume en un point ou sur une surface.

Donc, on ce qui concerne notre région d'étude, le lac Fetzara est alimenté par trois principaux Oueds, à savoir : Oued El Hout au Sud, c'est le plus important cours d'eau alimentant le lac,

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

ce dernier 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 El 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 définis par un régime très irrégulier, torrentiel en hiver et sec en été, ce qui indique une variation importante des apports au lac, ces derniers sont assez importants en saison pluvieuse et sont presque inexistantes en période sèche. Les trois Oueds sont canalisés, leurs eaux sont normalement évacués par l'Oued Medjouba qui se déverse au niveau de l'Oued Seybouse qui débouche dans la mer Méditerranée, un peu plus à l'Est du site (figure 14).

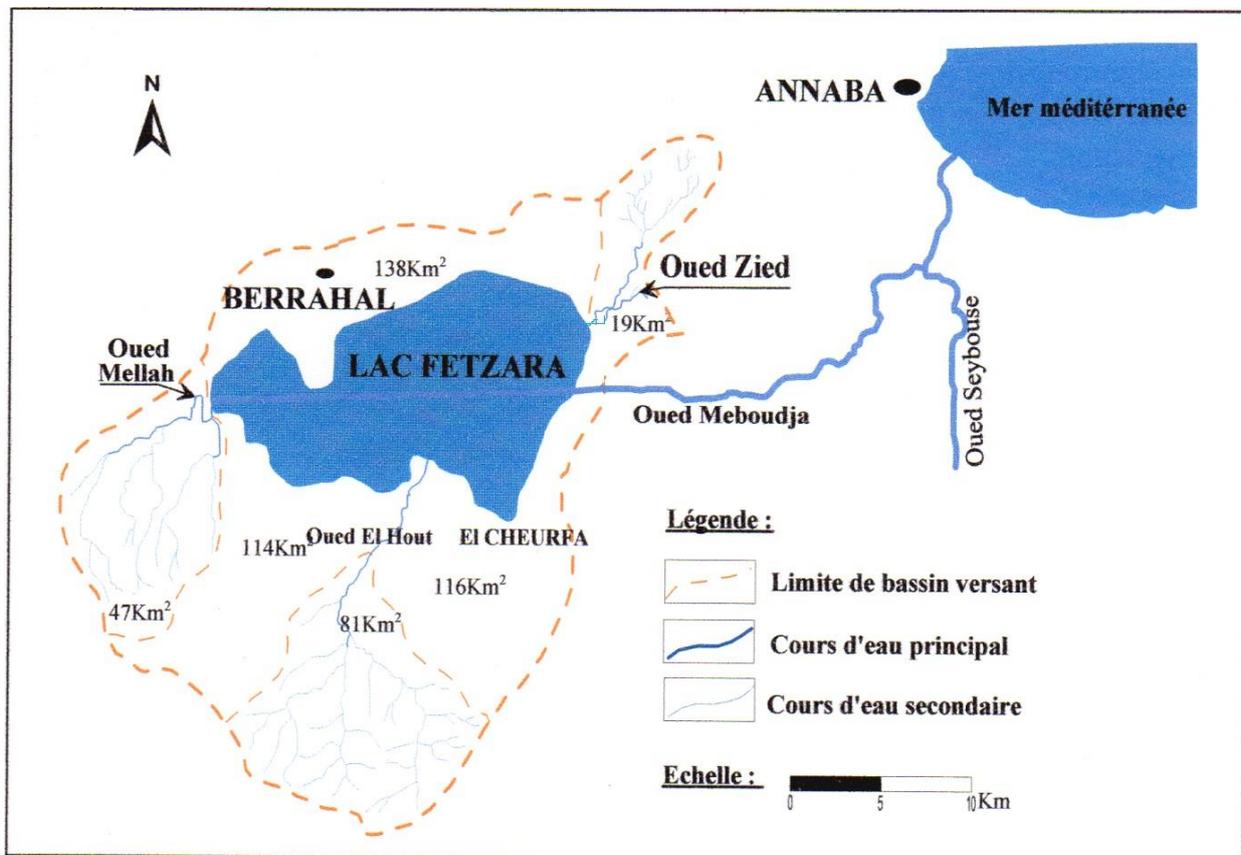


Figure 14: Les principaux sous bassins versant du lac Fetzara (in Zenati, 1999. Modifiée)

Ceci est le résultat de la tentative avortée d'assèchement effectuée par les colonisateurs dans le cadre d'un programme d'envergure ayant touché la majorité des grandes zones humides du pays. Ces « aménagements » dont les effets perdurent aujourd'hui encore, font que le lac s'assèche régulièrement en saison estivale, les eaux de l'Oued Zied continuant seules à alimenter le site.

III-5-1- Réseau hydrographique du lac Fetzara :

Les eaux du Lac Fetzara sont collectées à partir des Oueds El Hout, El Mellah et Zied ainsi que celles qui se déversent le long des pentes périphériques. La superficie submergée en hiver est de l'ordre de 5.800 hectares. 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 puis, ensuite dans l'Oued Seybouse qui débouche dans la mer Méditerranée (D.G.F., 2003).

Durant la saison estivale, le lac est donc complètement sec, ceci est dû principalement à la détérioration de l'écluse du canal principal d'évacuation situé à El Gantra, à l'Est du lac, mais l'évacuation reste insuffisante, provoquant ainsi des phénomènes d'hydromorphie à cause des effets des inondations et aussi une certaine salinisation (in Habes, 2006). Les caractéristiques hydrologiques du lac sont la maîtrise des crues, la rétention des sédiments et des nutriments et la recharge de la nappe aquifère.

Le bassin versant du lac Fetzara est constitué de 30 sous bassins versant petits et moyens (A.J.C.I., 1985), la superficie du bassin versant du lac, y compris les Oueds et les châabets (ruisseaux) représente 515 km², au Sud, le bassin versant dont la ligne de partage des eaux se situe entre 300 et 400 mètres d'altitude est relativement vaste et onduleux avec une légère pente en direction du lac. Au Nord, la ligne de partage des eaux se situe à une hauteur d'environ 100 mètres avec une pente raide, mis à part les versants de l'Oued Zied constitués de montagnes dont la hauteur s'élève à plus de 100 mètres. La ligne de partage des eaux des parties Ouest et Est se situe entre 20 et 30 mètres, le débit d'écoulement est estimé à 210 mm par jour en moyenne (D.G.F., 2003).

Parmi les principaux sous bassins, on cite l'Oued Zied avec une superficie de 19 km² au Nord-Est, El Hout avec une superficie de 81 km² au Sud du lac et El Mellah avec une superficie de 47 km² à l'Ouest du lac ; représentant tous les trois 29% de la superficie totale du bassin versant et faisant partie du réseau hydrographique endoréique (figure 14).

III-5-2- Régime hydrologique du lac Fetzara et de ces affluents:

Les lacs se forment lorsque les eaux qui coulent le long des pentes, cours d'eau ou eaux de ruissellement, rencontrent un obstacle, une contre-pente, qui les empêche de poursuivre leur course. Les eaux envahissent alors la dépression ainsi créée formant des étendues d'eaux parfois immenses. Ces dépressions sont dues le plus souvent aux creusements des sols réalisés par d'anciens glaciers ; (cas du lac Supérieur, du lac Léman et des millions de lacs de toutes tailles du Canada, de la Scandinavie et de la Russie).

D'autres résultent de barrages naturels souvent dus aux dépôts glaciaires, laissés il y a 10 000 ans (cas des lacs Nantua et d'Annecy), mais aussi parfois à des éboulements, à des coulées de laves de volcans ou même à des volcans (Cas du lac Chambon).

Et enfin, d'autres sont dus à des déformations tectoniques et là on peut citer le cas du lac Fetzara.

Puisque le socle de l'Edough a subi une histoire tectonométamorphique dont des déformations synmétamorphiques (Brunel et al, 1989, Monié et al, 1992, Aissa et al, 1994 ; 1995) et aussi des déformations tardives (Aissa, 1995).

Donc, la dépression du lac Fetzara 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.

Le lac Fetzara ne reçoit pas que des eaux de ruissellement, il est alimenté aussi par les eaux de trois Oueds, El Hout, El Mellah et Zied, ainsi les eaux qui traversent les montagnes environnantes et qui se déversent le long des pentes périphériques (D.G.F., 2003).

La superficie submergée en hiver est de l'ordre de 5800 ha (A.J.C.I., 1985). La partie la plus profonde du lac est formée par une sédimentation à une altitude d'environ 10 mètres (D.G.F., 2003). Durant la saison pluvieuse, l'eau remonte jusqu'à la côte de 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 rendent le lac particulièrement intéressant, au vu de la minéralisation renouvelée à chaque saison, ce qui prolifère un milieu favorable pour l'alimentation des oiseaux hivernants et notamment les Anatidés de surface et les foulques.

Durant la période sèche, les précipitations étant presque nulles, le lac se trouve complètement au sec.

Pour connaître le régime des Oueds alimentant le lac Fetzara, les débits de ces derniers ont été estimés par une méthode simple, étant donné, l'absence de stations de jaugeages dans cette région. Cette méthode consiste à choisir des points de prélèvements (05 points), pour chaque point nous avons considéré une section ($L * l$) et mesuré la hauteur d'eau pendant un temps

d'observation. Les valeurs mesurées sont ramenées à l'unité de temps (la seconde), permettant ainsi, le calcul des débits au niveau de chaque Oued. Cette opération a été réalisée pour chaque point et à chaque pas de temps.

Ces mesures nous ont permis d'apprécier la variation des débits des différents Oueds, les débits ont été estimés durant la période de décembre 2004 jusqu'au mois de mars 2005. Sans oublier que nous avons essayé de faire une étude comparative avec les débits qui ont été estimés durant la période de janvier jusqu'au mai 2007, travail effectué par Zahi (in Zahi, 2008).

Durant cette année (2004/2005), la région de notre étude s'est caractérisée par un hiver très pluvieux, avec des précipitations variant entre : 185 mm, 135 mm et 179 mm, pour les mois de décembre 2004, janvier et février 2005. Toutes ces fortes précipitations traduisent de forts débits, on cite par exemple, le cas de l'Oued Meboudja, les débits varient entre : 6,95 m³/s et 16.98 m³/s, dont on remarque une certaine élévation durant : le 07 décembre, 07 janvier et le 11 février avec des débits respectifs de : 12,41 m³/s, 16.98m³/s et 13.63 m³/s. Par contre, l'année (2006/2007) était une année qui s'est distinguée par un hiver plus au moins sec, alors que des fortes précipitations se sont enregistrées en mois de février et mars 2007, ces fortes précipitations subites traduisent une crue en date du 12 mars 2007, qui a engendré une remontée des eaux de ruissellement jusqu'au débordement.

III-5-2-1- Régime de l'Oued El Hout pendant les périodes (2004-2005) et (2007):

D'après l'allure des courbes établies (figure 15), pour la première période (2004-2005), cette dernière montre deux pics, le premier au 07 décembre 2004 avec un débit de : 2.25m³/s et le second au 11 février avec un débit de : 2.69m³/s. L'évolution des débits durant la période d'observation varie de : 0,37m³/s à : 2.69m³/s et bien sûr en prenant compte des précipitations des pluies lors du cycle pluviométrique de décembre 2004 et de janvier 2005, avec une remontée assez considérable des eaux, parfois avec débordement. On remarque une baisse qui débute au mois de mars avec un écoulement assez insignifiant des cours d'eaux.

Tandis que, durant la période qui s'étale entre le 12 et le 25 mars 2007, les débits qui ont été enregistrés, sont assez fort, notant que le pic le plus élevé est de l'ordre de 10,23 m³/s, observé le 12 mars 2007, à l'exception de cette date, la variation des débits oscillait entre 0.0005 et 0.551 m³/s.

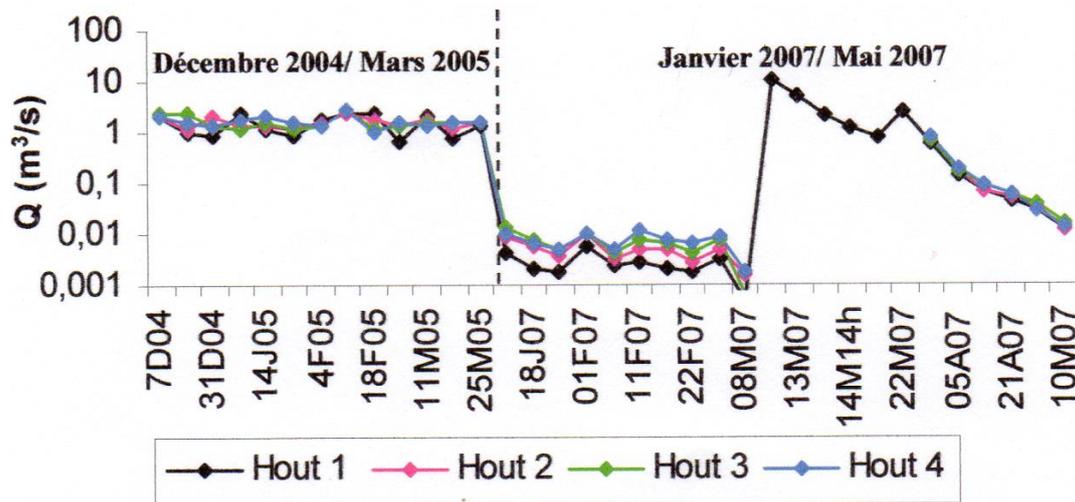


Figure 15 : Courbes d'évaluation de débits de l'Oued El Hout pour les deux périodes (Déc. 2004 – Mars 2005) et (Jan. 2007 – Mai 2007)

III-5-2-2- Régime de l'Oued El Mellah pendant les périodes (2004-2005) et (2007):

L'allure de la courbe (figure 16) des débits enregistre trois pics assez important durant la période d'observation pendant les mois de décembre, janvier et février avec respectivement : $2,19 \text{ m}^3/\text{s}$, $1,49 \text{ m}^3/\text{s}$ et $2,27 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce phénomène est caractérisé par les fortes précipitations du mois de janvier, de février qui a engendré une remontée importante des eaux de ruissellement. Le reste du tracé reflète des valeurs de débits oscillant entre : $0,46 \text{ m}^3/\text{s}$ et $2,68 \text{ m}^3/\text{s}$.

Alors que, pendant la période (Jan. 2007 – Mai 2007), les forts débits sont enregistrés pendant la même période que l'Oued El Hout (figure 15) où la plus forte valeur de débit est enregistrée le 12 mars avec un débit d'ordre de $16 \text{ m}^3/\text{s}$, alors que la plus faible valeur est enregistrée le 22 février avec un débit de $0,00115 \text{ m}^3/\text{s}$. Le tarissement de l'Oued débute à partir de mai 2007.

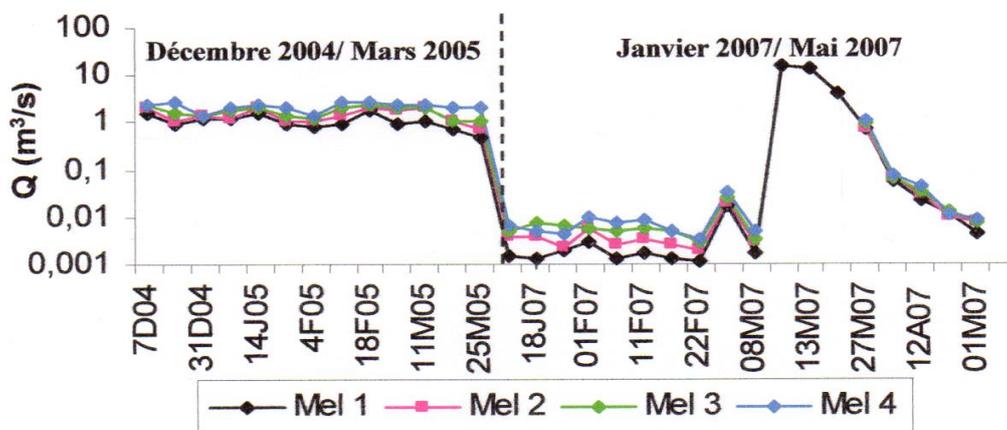


Figure 16: Courbes d'évaluation des débits de l'Oued El Mellah pour les deux périodes (Déc. 2004 – Mars 2005) et (Jan. 2007 – Mai 2007)

III-5-2-3- Régime de l'Oued Zied pendant les périodes (2004-2005) et (2007):

Lors de la période d'observation (Déc. 2004 – Mars 2005) et d'après l'allure des courbes (figure 17), cette dernière correspond presque à celle de l'Oued El Hout (figure 15) avec un pic assez important enregistré lors du mois de février avec une valeur de : $3,49 \text{ m}^3/\text{s}$. Le reste du tracé reflète des débits variant entre : $0,47 \text{ m}^3/\text{s}$ et $3,49 \text{ m}^3/\text{s}$.

Alors que, l'allure des courbes des débits (figures 15-16) correspond à celles des Oueds ; El Mellah et El Hout, montre que le fort débit est enregistré pendant le 12 mars avec une valeur de : $2,92 \text{ m}^3/\text{s}$. Le reste des débits varie entre $0,01284$ et $2,37 \text{ m}^3/\text{s}$.

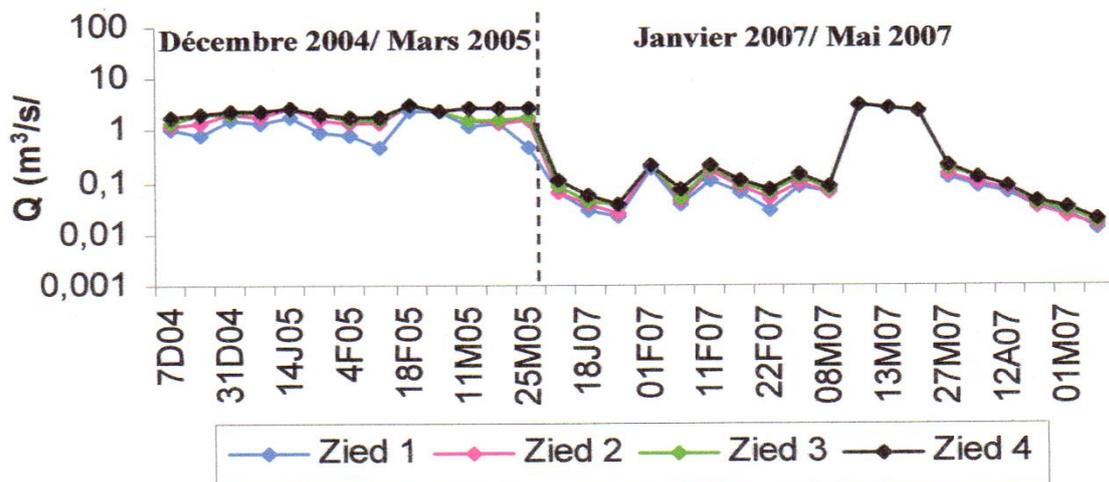


Figure 17 : Courbes d'évaluation des débits de l'Oued Zied pour les deux périodes (Déc. 2004 – Mars 2005) et (Jan. 2007 – Mai 2007)

III-5-2-4- Régime de l'Oued Meboudja pendant les périodes (2004-2005) et (2007):

L'évolution des débits (figure 18) pendant la période (Déc. 2004 – Mars 2005), varie entre : $6,95 \text{ m}^3/\text{s}$ et $16,98 \text{ m}^3/\text{s}$. On remarque une certaine élévation durant : le 07 décembre, 07 janvier et le 11 février avec des débits respectifs de : $12,41 \text{ m}^3/\text{s}$, $16,98 \text{ m}^3/\text{s}$ et $13,63 \text{ m}^3/\text{s}$.

Alors que, la période (Jan. 2007-Mai 2007), les fortes valeurs enregistrées le 12, le 13 et le 22 mars avec des débits respectivement $2,35 \text{ m}^3/\text{s}$, $2,02 \text{ m}^3/\text{s}$ et $3,68 \text{ m}^3/\text{s}$, le reste des valeurs oscillent entre $0,4159$ et $1,23 \text{ m}^3/\text{s}$.

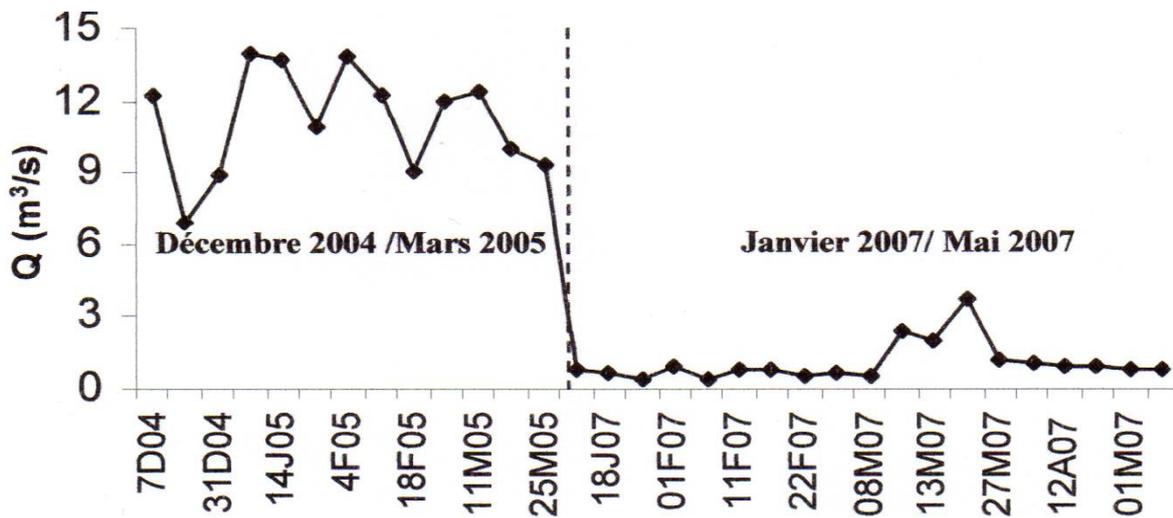


Figure 18 : Courbes d'évaluation des débits de l'Oued Meboudja pour les deux périodes (Déc. 2004 – Mars 2005) et (Jan. 2007 – Mai 2007)

III-5-2-5- Régime de l'Oued Seybouse :

L'Oued Seybouse est le second Oued de l'Algérie, il s'écoule dans une vallée étroite et rectiligne de direction Sud – Nord depuis Bouchegouf jusqu'à Chihani, puis il draine la large plaine d'Annaba (bassin versant de 7045Km²).

La confluence de l'Oued Bouhamdane et l'Oued Cherf donne naissance à l'Oued Seybouse dans la région de Guelma. En outre, Oued Seybouse reçoit Oued Meboudja et ses affluents, Oued Mellah et Oued Bou Athou dans la région d'Annaba.

C'est le collecteur principal des eaux de la région, mais la capacité de drainage est limitée du fait de l'étroitesse de la section d'écoulement, de l'envasement du lit causé par les teneurs importantes en limon. La capacité de drainage naturel est basse d'autant plus que la différence des marais de la méditerranée est d'environ 60cm. Lors du débordement de l'Oued Seybouse, il se produit un contre-courant qui entraîne des dégâts dus à l'inondation à l'aval de l'Oued Meboudja. (A.J.C.I., 1985).

III-6- 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 El Mellah à l'Ouest et Oued Zied au Nord-Est, qui déversent dans ce dernier, par contre les sorties sont régies par l'Oued Meboudja qui est la vidange du Lac.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Cette partie nous a permis de montrer que les apports d'eau vers le Lac sont tributaires des précipitations, étant donné que lorsque les précipitations sont élevées les débits estimés au niveau de chaque Oued le sont aussi et dans ce chapitre une étude comparative a été réalisée selon deux périodes d'observation, une période qui s'est déroulée en 2004-2005 (Habes, 2006) et une autre qui s'est déroulée en 2007 (Zahi, 2008)

Les débits atteignent leurs maximums durant les mois de janvier et de février 2005, où les précipitations dépassent les 130 mm pour la période 2004-2005, avec des valeurs des débits ; 2.69 m³/s, 2.68 m³/s et 3.49 m³/s respectivement pour les oueds El Hout, El Mellah et Zied.

Et durant la crue du 12 mars, crue qui s'est déroulée pendant la période 2007, où les précipitations ont dépassé les 100 mm durant 72 heures (station de Pont Bouchet) avec des débits d'ordre de 10.23 m³/s, 15.99 m³/s et 2.92 m³/s respectivement pour les Oueds El Hout, El Mellah et Zied, par contre l'évolution des débits de l'Oued Meboudja dépend de l'ouverture de la vanne.

On a pu remarquer qu'en période estivale le Lac s'assèche (in Belhamra, 2001), seules les eaux de l'Oued Zied continuent à alimenter le Lac. Donc, la succession de périodes d'assèchement et d'alimentation rend particulièrement intéressant le Lac au vu de la minéralisation renouvelée chaque saison.

Chapitre IV

Hydrogéologie des nappes entourant le lac

Chapitre IV

Hydrogéologie des nappes entourant le lac

Les interactions du lac avec son environnement sont assez mal connues, car les paramètres hydrodynamiques ne sont pas souvent déterminés. Les puits implantés dans cette partie sont de faibles profondeurs et la réalisation d'essais par pompages de longues durées sont irréalisables. Cependant et dans le but de palier à cette carence, nous avons effectué une ébauche de l'hydrogéologie locale. Ce travail repose sur une synthèse des travaux effectués au niveau de cette zone. En effet, plusieurs auteurs ont élaboré des travaux sur l'hydrogéologie du Lac. Déjà en 1994, Rouabhia A et Nouar S, ont dressé, les premières cartes relatives à la piézométrie de la zone. Successivement en 1999, 2001, 2002, 2006, 2009 et en 2010, les résultats obtenus, ont permis aux étudiants de soutenir leur mémoire de magister, (Zenati 1999, Belhamra 2001, Habes 2006 et Zahi 2009) et leur thèse (Debieche 2002), par ailleurs les résultats obtenus par les étudiants de l'université de Tébessa, ont permis la réalisation d'une publication dans le journal Arabian journal geosciences.

Les résultats récoltés, nous permettrons de réaliser une synthèse hydrogéologique.

IV-1- Introduction

La connaissance de l'Hydrogéologie de la région est très intéressante, car elle nous permet d'envisager les processus d'alimentation des aquifères, la détermination du sens d'écoulement et les relations existantes entre nappes-lac-oueds. Notons que cette région renferme plusieurs aquifères de faibles extensions, d'où le problème de la connaissance des limites de ces nappes.

IV-1-1- Hydrogéologie de la région de Annaba:

Dans cette partie, nous allons donner un bref aperçu sur les aquifères de la wilaya de Annaba, ce qui nous permettra de visualiser les nappes présentes et de déduire les processus régissant les écoulements.

IV-1-1-1- Les aquifères dénombrés :

■La nappe des formations superficielles :

Cette nappe est contenue dans des formations sablo-argileuses incluant des lentilles de sables. Des argiles grises compactes en constituent le substratum. Ces lentilles sont plus fréquentes à

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

proximité de l'Oued Seybouse et à la périphérie des affleurements des grès numidiens. La nappe phréatique est globalement libre, sauf en quelques points où elle est captive sous des niveaux d'argiles. L'épaisseur de cette nappe varie de 0 à 18 m.

■ **La nappe des graviers :**

Elle couvre l'ensemble de la zone d'étude et présente de bonnes qualités hydrauliques.

■ **La nappe des alluvions de la haute terrasse :**

Elle s'étend le long des massifs numidiens à l'Ouest et au Sud de la plaine d'Annaba. Ces alluvions graveleuses et caillouteuses à matrice argileuse ont des possibilités aquifères très limitées.

■ **La nappe des cipolins :**

Elle se situe dans les massifs de bordure de Belelieta et de Boukhadra (proche du massif de l'Edough). Elle est contenue dans des lentilles de cipolins, fissurés, existant au sein des gneiss et micaschistes du monoclinale métamorphique du Boukhadra. Ces calcaires sont en contact avec les alluvions de la plaine. Leur superficie est inférieure à 100ha.

■ **La nappe des travertins :**

Elle est mal délimitée. Elle a été localisée dans le secteur compris entre Fardaous, la butte de Daroussa, Chbaïta et la ferme Hallalal Aissa.

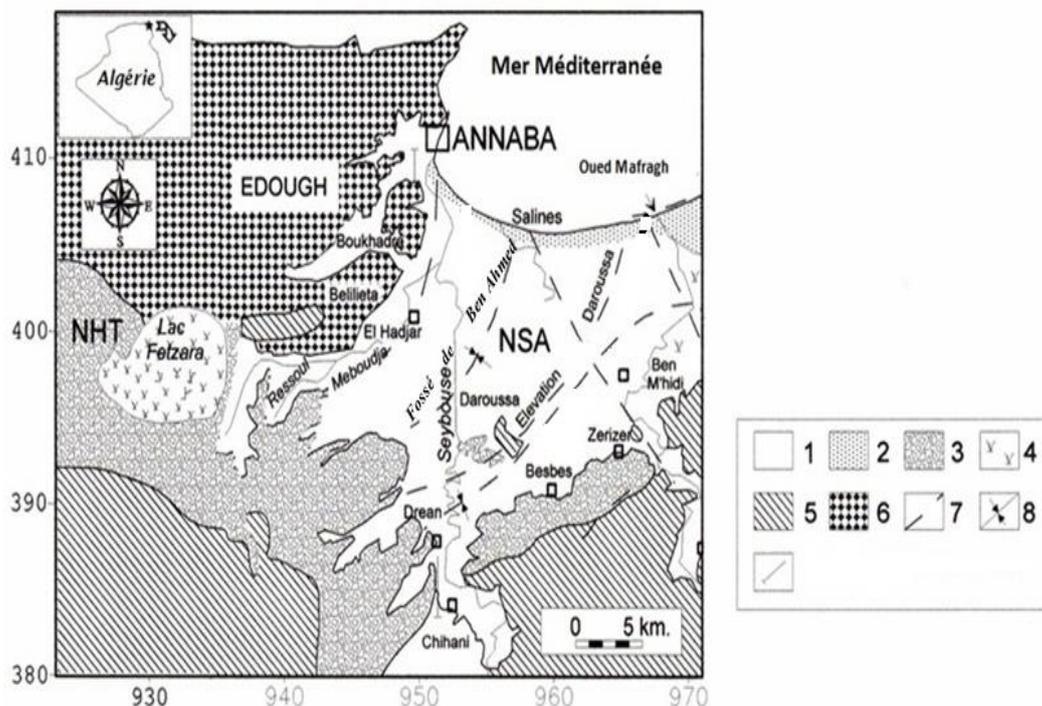


Figure 19: Répartition des aquifères de la région d'Annaba

1 : Quaternaire récent et actuel; 2: Dunes; 3: Quaternaire ancien; 4: Marécage ou lac; 5: Grés et argile numidiens ; 6: Formations métamorphiques ; 7: Faille; 8: Axe des fosses.

A- La nappe superficielle de Annaba (NSA) :

Celle-ci est contenue dans des formations sablo-argileuses incluant des lentilles de sables; des argiles grises compactes en constituent le substratum. Ces lentilles sont plus fréquentes à proximité de l'Oued Seybouse et à la périphérie des affleurements des grès numidiens. La nappe est libre, sauf en quelques points où elle est captive sous des niveaux d'argiles. L'épaisseur de la nappe libre peut atteindre 18m. Cette nappe est captée par des forages (dans sa partie profonde) et par des puits (dans sa partie libre). Ces ouvrages sont en continuelle exploitation.

B- La nappe d'accompagnement du Lac Fetzara (NAL):

Elle s'étend le long des massifs numidiens à l'Ouest et au Sud de Annaba. Ces alluvions graveleuses et caillouteuses à matrice argileuse recèlent des possibilités aquifères assez importantes dans la partie Ouest, avec la zone du lac Fetzara. Plus de 200 puits sont implantés dans cette partie. Cette nappe est captée par des puits servants à l'irrigation ou à l'alimentation en eau potable. Ce qui se traduit par des pompages importants.

IV-1-2- Délimitation des aquifères :

La figure 20 donne un aperçu sur les aquifères alimentant le lac Fetzara, ainsi nous constatons un apport d'eau au lac par les nappes de la région de Berrahal. L'apport par ces nappes reste très faible par contre la qualité des eaux de ces nappes aura un impact sur la qualité des eaux du lac.

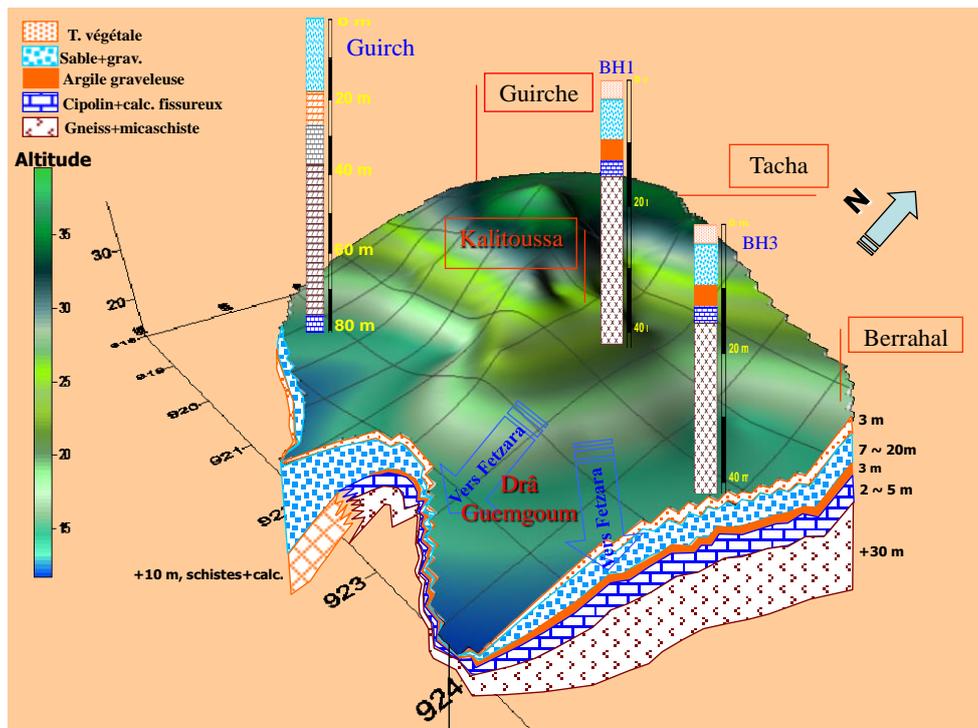


Figure 20: Les aquifères situés à l'Ouest du lac Fetzara (in Khelfaoui, 2007)

IV-2- Géométrie des aquifères :

Les études géophysiques réalisées dans la région par Sonatrach (1966) et Strojexport (1975) montrent la superposition de deux nappes. La première superficielle dans laquelle sont implantés les puits des agriculteurs et la seconde profonde captée par les forages.

La première nappe peut être considérée comme discontinue dans l'espace, elle apparaît dans différentes zones et prend différentes appellations.

La nappe profonde présente la particularité d'être captive au niveau de la zone Nord par contre vers le Sud au niveau de Dreaan, elle devient libre et se confond avec la nappe précédente.

Ce milieu aquifère se caractérise par une hétérogénéité des dépôts, constitué par les sables du cordon dunaire au niveau de la bordure Nord, par contre le reste de la zone est constitué par les formations alluvionnaires ou par les formations métamorphiques. L'analyse des coupes lithologiques de forage a permis d'identifier la structure profonde des principaux aquifères (latéralement et verticalement).

La figure 21, donne un aperçu sur la nature de ces horizons aquifères de l'Ouest vers l'Est.

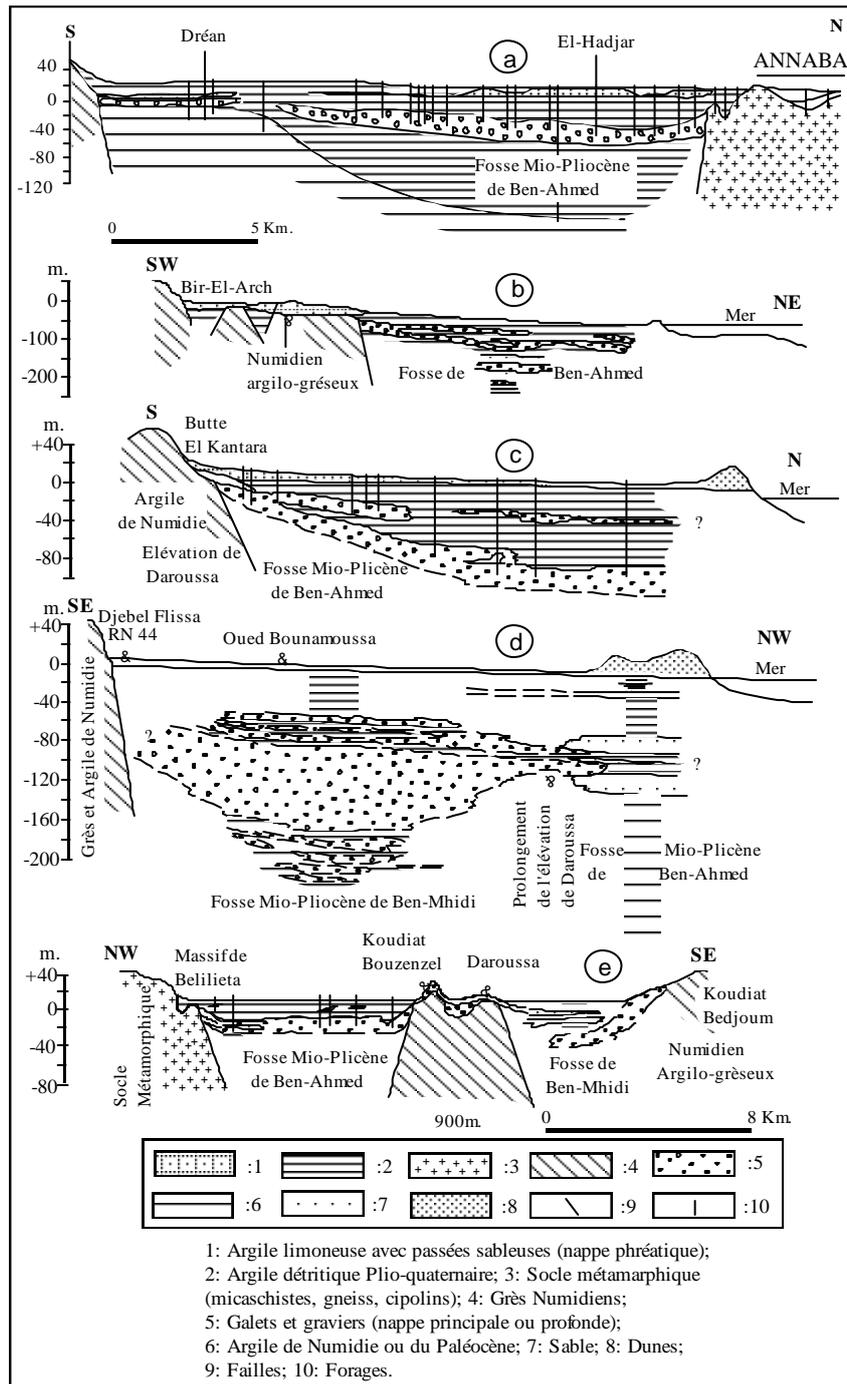


Figure 21 : Coupes montrant la nature lithologique des aquifères de Annaba (zone Est) (in Hani 2003)

- La nappe superficielle :

Cette nappe est contenue dans des formations sablo-argileuses incluant des lentilles de sables. Des argiles grises compactes en constituent le substratum. La répartition des lentilles sableuses est très irrégulière et discontinue. Ces lentilles sont néanmoins plus fréquentes à proximité de l'Oued Seybouse et à la périphérie des affleurements des grès numidiens. La nappe phréatique est globalement libre, sauf en quelques points où elle est captive sous des niveaux d'argiles. L'épaisseur de cette nappe peut atteindre 18 m (Fig. 22).

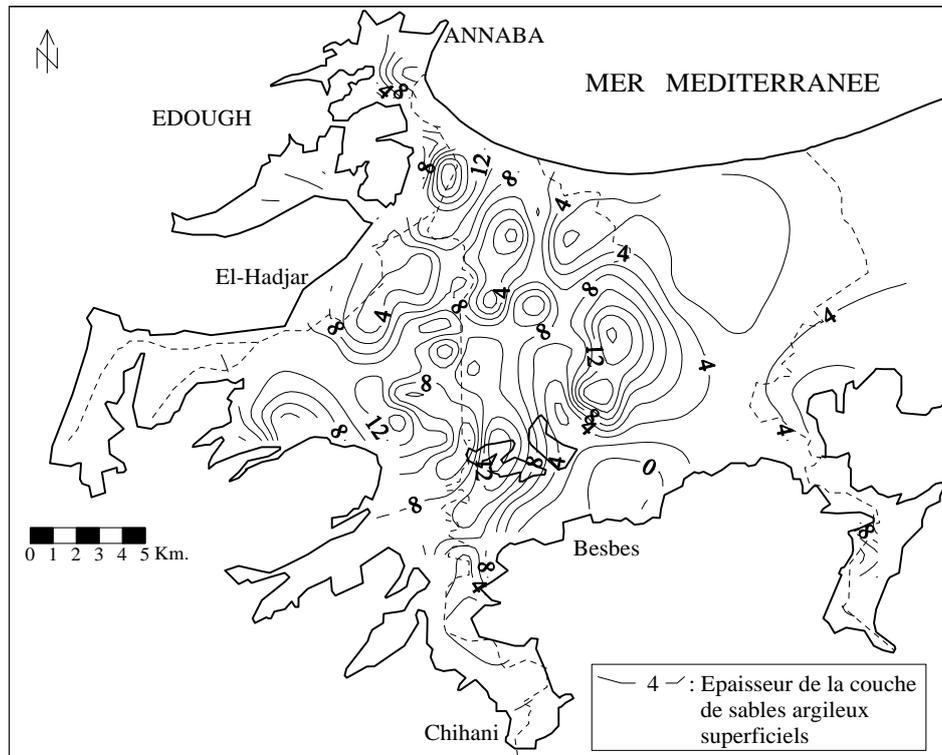


Figure 22 : Carte des isopaches de la nappe phréatique. (in Aoun, 2010)

-La nappe des graviers (ou nappe profonde) :

Constituée par une alternance de couches grossières de graviers et galets et de couches argilo-sableuses. Cet empilement plus au moins régulier est lié au remplissage hétérogène des fosses de Ben Ahmed et de Ben M'hidi (fig. 21). L'observation des cartes (fig.23 & 24), montrent un affleurement des niveaux graveleux au Sud de Drean et de Asfour. Ces niveaux se trouvent en effet à une profondeur de 8 à 14 m et plongent vers le Nord pour atteindre la cote de 100 m environ en bordure de mer. L'épaisseur des graviers et des galets est très variable, elle passe en effet de quelques mètres en bordure Ouest du système, à près de 25 m selon l'axe de la fosse de Ben-Ahmed orientée Sud-Nord, puis elle diminue à moins de 10 m sur l'élévation de Daroussa (fig. 21). Elle croît de nouveau à 80 voire 90 m selon l'axe de la fosse de Ben-M'hidi d'orientation Sud-Ouest – Nord-Est. Entre la butte de Boukhadra et El-

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Khous, un autre niveau à éléments grossiers, de près de 8 m d'épaisseur, a été localisé à une profondeur de 35 à 40 m. En bordure des massifs numidiens de Bouteldja, l'épaisseur des graviers atteint près de 20 m (Djabri et al. 2000).

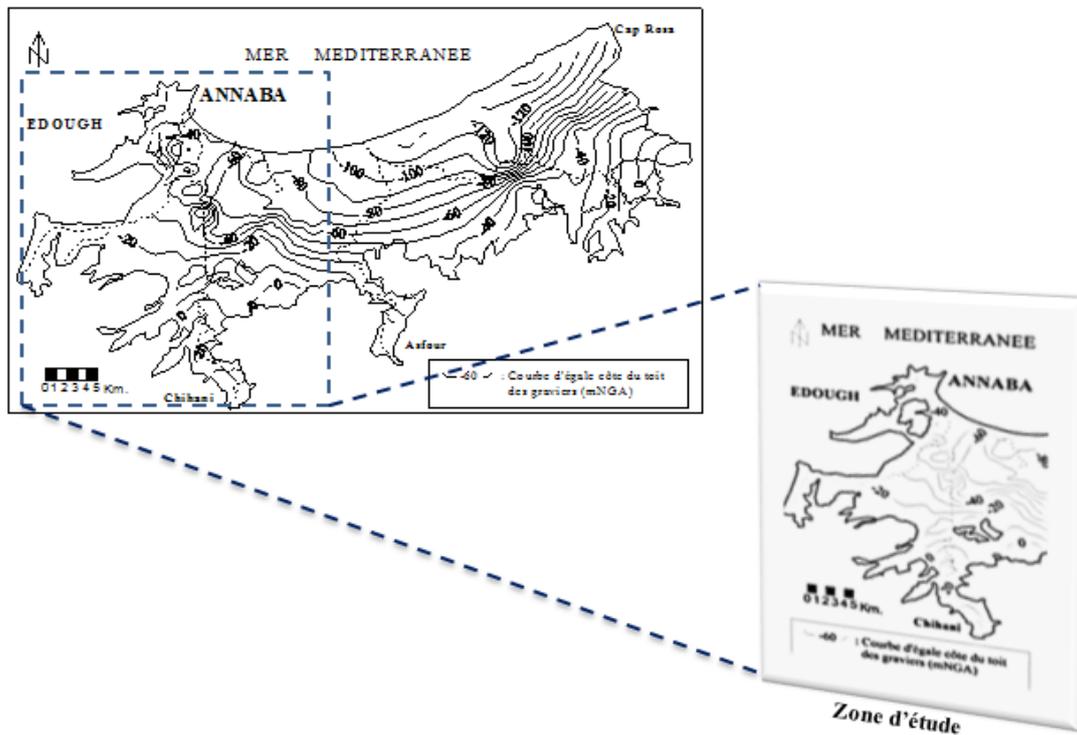


Figure 23 : Carte des isobathes du toit de la nappe des graviers. (in Hani, 2003, modifiée)

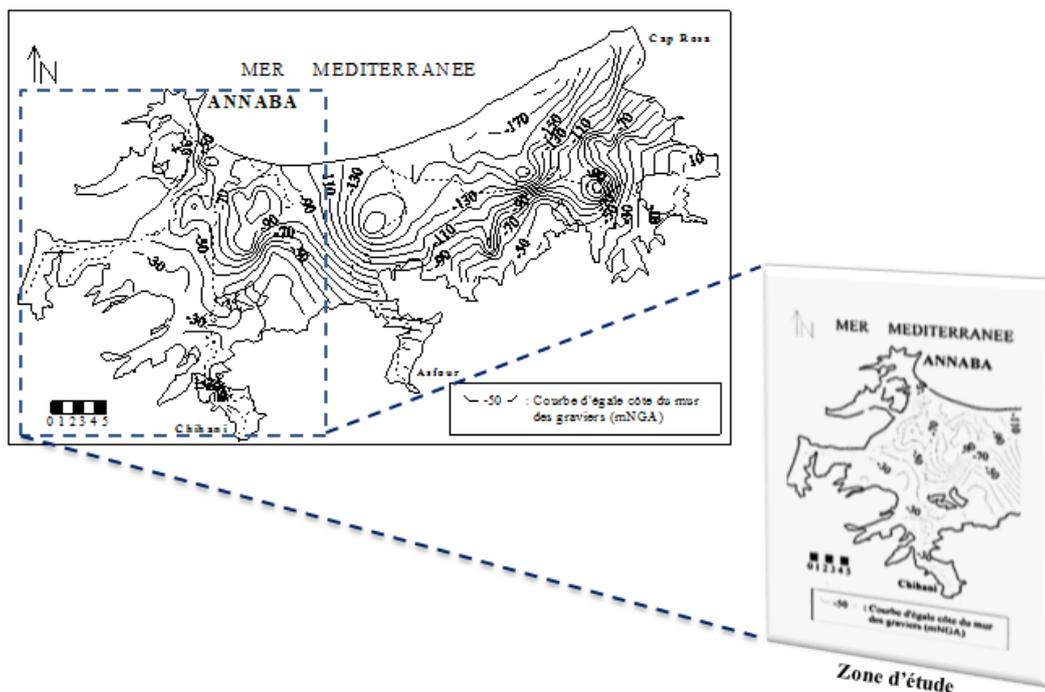


Figure 24 : Carte des isobathes du substratum de la couche de graviers. (in Hani, 2003, modifiée)

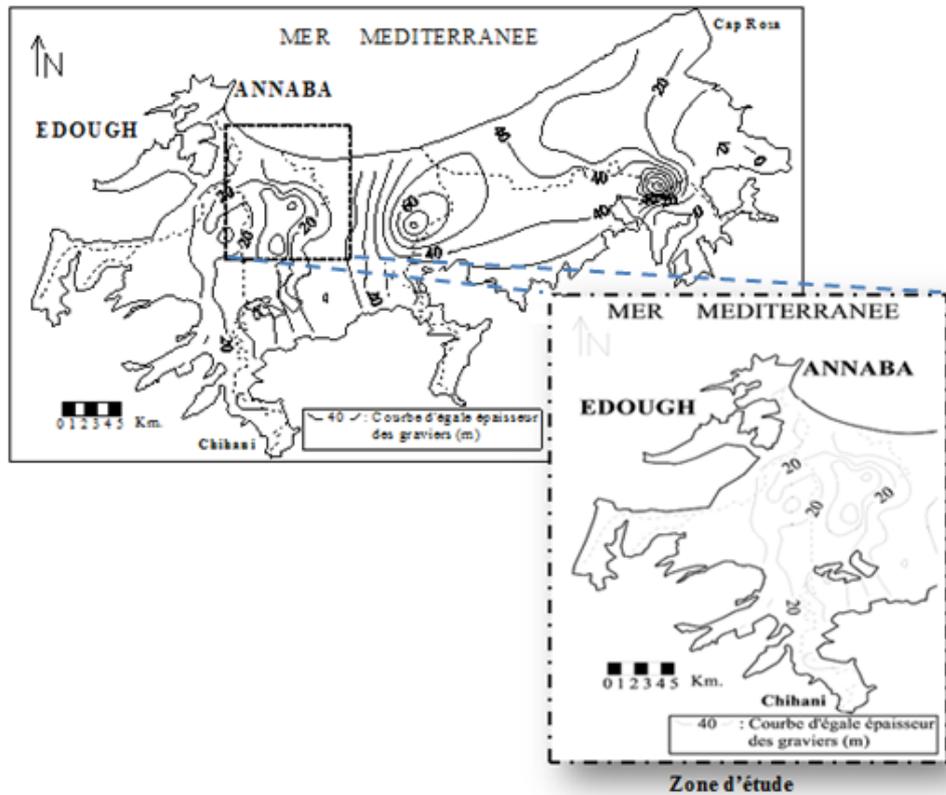


Figure 25 : Carte des isopaches des couches de graviers et galets. (in Hani, 2003, modifiée)

Ces deux nappes sont généralement séparées par un horizon semi-perméable constitué d'argile sableuse, de silt, d'argile et de lit sableux. L'épaisseur de cette couche est variable ; elle passe de 0 m sur les bordures Sud et Ouest à plus de 75 m dans la partie côtière de l'aquifère (fig. 25).

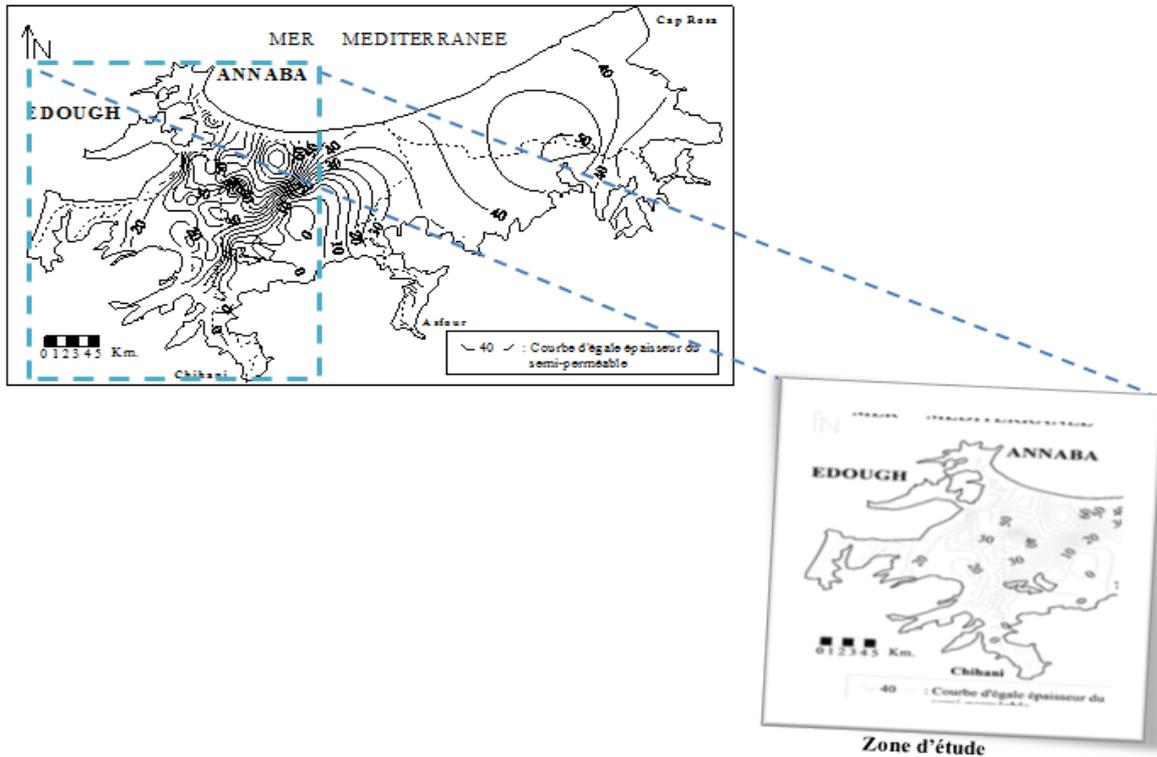


Figure 26 : Carte des isopaches du niveau semi-perméable. (in Hani, 2003, modifiée)

Cette couche joue un rôle important dans le transfert hydraulique entre la nappe superficielle et les couches profondes. Elle joue également un rôle essentiel dans le transfert de la pollution de surface vers les nappes (Nafâa, 1985 ; Khérici, 1985 ; Khérici, 1993 ; Debièche, 2002 ; Hani, 2003).

IV-3- Les caractéristiques hydrodynamiques :

Les observations de terrain ou des résultats acquis lors de différentes études (Khérici, 1993 ; Djabri, 1996 et Debieche, 2002) indiquent que l'aquifère phréatique de la plaine de Annaba présente des caractéristiques hydrodynamiques médiocres. A ce titre, les résultats obtenus par des essais par pompage sont condensés dans le tableau suivant.

Tableau 15 : Résultats de deux pompages d'essai effectués dans la nappe phréatique.

Coordonnées		Transmissivité ($m^2 \cdot s^{-1}$)	Coefficient d'emménagement	Epaisseur de la nappe (m)	Perméabilité ($m \cdot s^{-1}$)
X	Y				
957.15	401.550	$2 \cdot 10^{-6}$	-	5	$4 \cdot 10^{-7}$
957.250	399.8	$8 \cdot 10^{-5}$	2%	5	$1.6 \cdot 10^{-5}$

a- La nappe des graviers :

L'interprétation des données de pompages d'essai faites par A. Hani (2003), en tenant compte des limites naturelles et de la particularité des terrains de la zone d'étude (hétérogénéité du milieu). Ainsi, dans la nappe des graviers les valeurs de transmissivité les plus élevées sont situées le long de la Seybouse et les plus faibles à l'Ouest dans la région d'El-Kerma. Les valeurs du coefficient d'emménagement sont en moyenne de 11.5 % pour la nappe libre. Pour la nappe captive des graviers, elles varient de 10^{-4} à 10^{-3} dans le secteur de Drean-Chihani où elle devient libre.

Le dépouillement des données a également permis de définir la perméabilité de l'horizon semi-perméable qui varie de 10^{-8} à 10^{-7} m/s.

Le tableau 16, donne des indications sur les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe des graviers

Tableau 16: Résultats du pompage effectué dans le secteur central de la plaine de Annaba.

Paramètres	Méthode			Méthode automatique (6 ^{ème} itération)
	Descente (Jacob)	Remontée (Jacob)	Descente (Theis)	
Transmissivité ($m^2.s^{-1}$)	3.5×10^{-3}	4.0×10^{-3}	3.5×10^{-3}	3.5×10^{-3}
Coefficient d'emménagement	3.6×10^{-4}	-	4.3×10^{-4}	4.0×10^{-4}

b- Les nappes entourant le lac Fetzara :

Le lac Fetzara est entouré de plusieurs nappes (fig. 27), ces dernières sont souvent de faible extension, elles peuvent avoir des relations hydrauliques avec le plan d'eau.

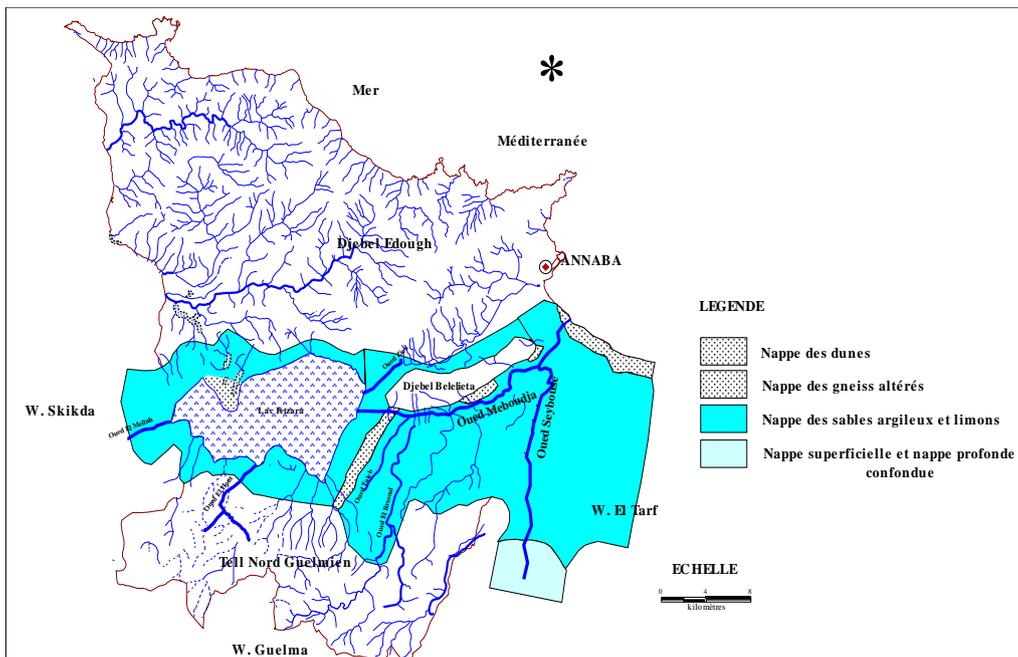


Figure 27 : Nappes entourant le Lac Fetzara (in Zenati, 1999)

Cette répartition est liée à l'hétérogénéité des formations affleurant dans cette zone. En effet, les formations métamorphiques et les formations sédimentaires sont présentes dans cette partie. Les premières sont caractérisées par la présence des Gneiss et des cipolins, ces derniers sont souvent très durs et renferment parfois des nappes localisées à faibles débits (Forage El Bouni moins de 2 l/s), au niveau des formations sédimentaires les nappes sont contenues dans les formations perméables (sable, graviers...), ces nappes ont une extension limitée à cause des changements de faciès observés sur le terrain.

IV-4- Descriptions des nappes :

IV-4-1- Nappe profonde des graviers :

C'est la nappe la plus intéressante, elle est située en dessous de l'aquifère superficiel. Les études géophysiques menées par Strojexport en 1972 et 1975 ont montré que la nappe profonde des graviers s'étend sur tout le système aquifère, entre El Kerma (Annaba) à l'Ouest et Bouteldja à l'Est. Seul le centre des marécages de M'Krada laisse encore quelques incertitudes, car aucun forage n'a pu être réalisé pour confirmer les études géophysiques. Cependant, certains forages (6917, 6902, 6920) ont montré en effet l'existence des formations graveleuses présentant les mêmes caractéristiques hydrauliques que celles de la plaine centrale. (Figure 20)

La nappe des graviers est limitée :

- Au Nord : une limite à potentiel imposé par la mer.
- Au Sud : une limite d'alimentation par la nappe des terrasses et les grès numidiens.
- A l'Ouest : une limite d'alimentation par les nappes secondaires des cipolins fissurés et des gneiss altérés des massifs de Bouhamra et de Belelieta.
- A l'Est : le manque de sondage au niveau des marécages de M'Krada, laisse des incertitudes sur la nature de la limite Est, mais elle reste toujours supposée étanche.

Le réservoir de la nappe est constitué par des graviers, sables et galets plio-quaternaires et encaissé dans un bassin d'effondrement. Le toit de la nappe est semi-perméable à imperméable, formé d'argiles sableuses ou d'argiles. A travers ce toit intervient le phénomène de drainance dans la zone centrale. Ce toit disparaît complètement et laisse place à une nappe libre au Sud de Drean et El Asfour et au pourtour de la butte de Daroussa.

L'épaisseur de l'horizon aquifère varie de quelques mètres à 90 m. La perméabilité de cette nappe varie de 10^{-4} m/s à 10^{-5} m/s. La transmissivité de l'aquifère oscille entre 3.10^{-2} et $3.5.10^{-3}$ m²/s dans la région de Drean, entre 4.10^{-2} et 5.10^{-3} m²/s, au Nord de Ben M'Hidi et dans la région de la Mafragh et entre 1.10^{-3} et 2.10^{-3} m²/s dans la région de Bouteldja. Les coefficients d'emménagement sont parfois très faibles, de l'ordre de 10^{-4} dans les zones où la nappe est captive et atteignent 10^{-2} dans les zones où elle est libre. (In Zenati, 1999)

IV-4-2- Nappes superficielles :

L'observation de la carte (figure 27), montre l'emplacement des nappes superficielles présentes dans la région. Nous distinguons :

a- Nappe des gneiss altérés :

Elle est de faible extension, se localisant au niveau de la région Nord-Ouest, sur le flanc Est des massifs métamorphiques de Bouhamra et de Belelieta. Sa faible extension est due à la nature des formations gneissiques souvent de faibles perméabilités, en effet cette dernière oscille entre 10^{-6} et 10^{-5} m/s. La nappe est alimentée par les eaux de pluie ; son épaisseur est d'environ 15 m quand elle existe.

b- Nappe du cordon dunaire :

La nappe du cordon dunaire s'étend entre Annaba et Oued Mafragh dont la largeur oscille entre 0.5 à 2 km. Elle est limitée :

- Au Sud par les argiles sableuses de la nappe phréatique.
- Au Nord par la mer Méditerranée.

La nappe est constituée de sables dunaires éoliens et repose sur un substratum argileux. Elle a pour intérêt d'isoler la nappe phréatique de la plaine des venues d'eau marine. Cette nappe est alimentée par l'infiltration des pluies (porosité efficace 10 %). L'épaisseur mouillée moyenne oscille entre 5 et 15 m et la perméabilité entre 10^{-4} et 10^{-3} m/s. (B. Gaud 1976).

c- Nappe des sables argileux et limons :

Elle est très présente au niveau de la région :

- Dans la zone Ouest, cette nappe entoure le lac Fetzara et elle est discontinue.

Elle est limitée :

- Au Sud par le Tell Nord Guelmien,
- Au Nord par la retombée brutale du massif de l'Edough,
- A l'Est par les sables dunaires d'El Ganthra (bordure du lac Fetzara),
- A l'Ouest par la plaine de Guerbes.
- Dans la partie Est, on trouve la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El Hadjar, elle s'étend jusqu'à la rive gauche de l'Oued Seybouse.

Elle apparaît comme un plan incliné régulier vers la mer. Elle fait partie de la nappe phréatique Annaba – Bouteldja. Cette dernière est limitée :

- Au Sud par les alluvions de haut niveau et les grès numidiens.
- Au Nord par les sables du cordon dunaire et le massif dunaire de Bouteldja
- A l'Est par les argiles et les grès numidiens.
- A l'Ouest par les sables dunaires d'El Ganthra et les formations primaires (gneiss, micaschiste).

Ces deux régions communiquent entre elles à travers la lunette sableuse, dont la texture est différente (sables). La lithologie de cette nappe est constituée par des alluvions récentes et actuelles (sables, limons, argiles) avec une texture argilo-sableuse et argilo-limoneuse. L'épaisseur de l'aquifère varie généralement entre 2 et 10 m, dont les potentialités hydrauliques sont très limitées. La capacité d'infiltration de l'eau dans le sol est moyenne, de l'ordre de 0.05 à 0.10 m/j. Son alimentation se fait par les précipitations, les crues des Oueds, l'apport à partir de la nappe des graviers et par les bordures latérales de la nappe des dunes.

L'Oued Seybouse assure l'alimentation de la nappe par l'intermédiaire de son lit. Ce phénomène d'infiltration est estimé à $400 \text{ hm}^3/\text{an}$ (Tlemçani et Houd, 1988).

En allant du Nord de Drean vers la mer, entre la nappe superficielle et la nappe des graviers, se forme un horizon semi-perméable argilo-sableux qui constitue à la fois le substratum semi-perméable de la nappe superficielle et le toit de la nappe des graviers.

Les études antérieures [B. Gaud (1976) et K Nafaa (1985)] montrent que la nappe des graviers est soit partiellement alimentée par une drainance à partir de la nappe superficielle de la région qui s'étale entre El Hadjar et Allélick, soit elle peut alimenter verticalement la nappe superficielle qui se trouve entre Allélick et la mer.

Le débit de drainance a été estimé à $4,75 \text{ l/s}$ au Nord d'El Hadjar et à $9,85 \text{ l/s}$ dans la région d'El Hadjar.

Plusieurs essais par pompage ont été réalisés dans la nappe superficielle pour déterminer les paramètres hydrodynamiques. Les résultats montrent que la nappe présente une perméabilité oscillant entre $5.5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ et $14 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$.

On estime généralement qu'un aquifère est très intéressant à exploiter si sa transmissivité est au moins égale à $150 \text{ m}^3/\text{j/m}$. Les résultats montrent que la transmissivité varie entre $2.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et $4.2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ dans la plaine Ouest d'El Hadjar. En revanche, la nappe qui entoure le lac a une transmissivité variant entre $0.13 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. A l'exception de certaines régions où la productivité est intéressante, la nappe présente dans l'ensemble une productivité très faible et ne peut être exploitée que pour l'irrigation.

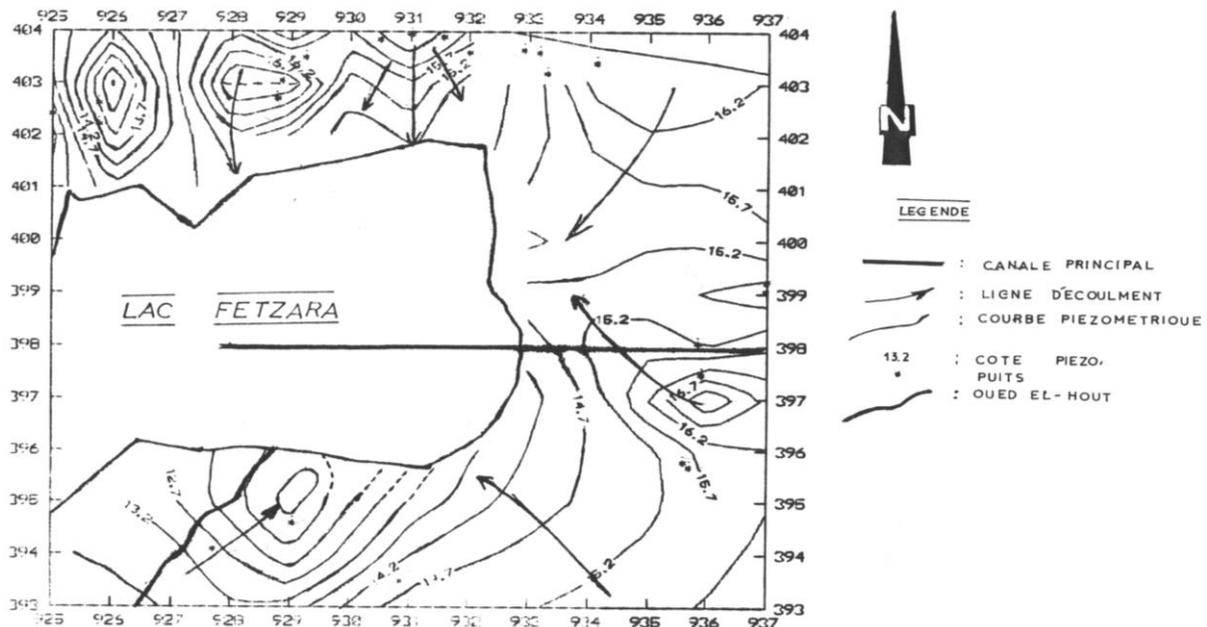
IV-5- Chronique des piézométries :

Le choix des périodes de prélèvement et la sélection des puits tiennent compte des objectifs de l'étude qui consistent à caractériser la qualité de l'eau souterraine, dans une zone affectée par des pollutions naturelle (eau saline) et anthropique et par d'autres considérations hydrologique, climatologique et d'études antérieures. Pour cette raison, nous allons faire une synthèse des travaux déjà réalisés sur la zone d'étude.

IV-5-1-Piézométrie réalisée par Bouaziz A et Rouabhia A (1993) :

Dans le cadre de leur mémoire d'ingénieur, une piézométrie de la région a été réalisée. L'observation de la carte (fig. 28) montre une absence de puits au niveau de la zone Est, par

ailleurs nous remarquons que les écoulements sont dirigés vers le lac avec parfois des lignes de partage des eaux. A ce moment le niveau piézométrique varie entre 11 et 17 mètres.



La relation lac-nappe est caractérisée par le drainage du lac par la nappe à l'Est. Le gradient hydraulique est de l'ordre de 0,003. Au Sud, l'écoulement converge vers le puits 22 qui constitue le centre de la zone convergente et du drainage du lac. On remarque que la nappe alimente l'Oued El Hout et ce dernier alimente le lac, étant donné que c'est l'un des affluents du lac.

IV-5-2-Piézométrie réalisée par N Zenati (1997 & 1998)

Zenati N, a réalisé plusieurs campagnes piézométriques, les cartes issues de ces mesures, montrent des variations du niveau dans la nappe. En observant les cartes se rapportant aux années 1997 et 1998, nous remarquons que la morphologie piézométrique est identique, alors que les périodes de mesure ne sont pas les mêmes, en effet deux campagnes de mesure correspondent à une période de hautes eaux (mois de Mai 1997 et mois de Mars 1998) et une autre campagne se rapporte à une période de basses eaux (mois de Septembre 1997). Cette similitude de la morphologie piézométrique, nous a amené à interpréter, la carte se rapportant au mois de Mai 1997.

L'observation de la carte (fig. 29) montre des zones d'alimentation au Nord-Ouest, au Sud-Ouest du lac et au Nord de la plaine Ouest d'El Hadjar. Les courbes isopièzes sont

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

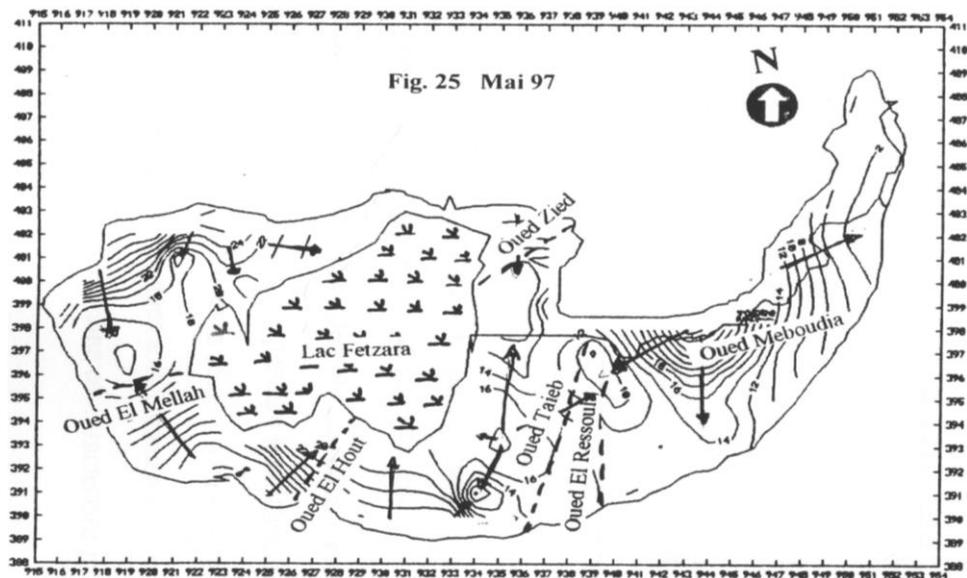
divergentes, donc à concavité orientée vers l'amont et à faible espacement, ce qui indique un écoulement rapide.

L'alimentation de la région Sud du lac Fetzara provient du Tell Nord Guelmien, alors que l'alimentation de la région Nord de la nappe et du lac, se fait à partir des massifs de l'Edough et de Belelieta. Nous remarquons une individualisation de deux lignes de partage des eaux, la première située dans la zone Sud-Ouest, où l'écoulement souterrain se diverge respectivement vers les Oueds Hout et Mellah. Ce qui tend à expliquer la relation entre la nappe et les cours d'eau.

La seconde située entre Hadjar Edisse et Bergouga, à cet endroit, l'écoulement devient rapide, provoquant une dispersion des eaux, ce qui laisse supposer l'apparition d'une ligne de partage des eaux de faible extension.

En examinant toujours la morphologie de la carte, nous remarquons la présence de dépressions piézométriques caractérisées par des axes d'écoulement convergents. Elles se localisent au Sud-Est de la plaine de Cheurfa, au Nord de la région d'El Ganthra et au Sud de la plaine de Hadjar Edisse. Ce déséquilibre hydrodynamique est dû au pompage intensif.

A l'Ouest du lac Fetzara, on note la présence d'une dépression qui serait engendrée par les apports latéraux issus des massifs du Nord-Ouest (Edough) et par la ligne de partage des eaux au Sud-Ouest. L'observation faite, indique la présence de deux types d'échanges entre la nappe et le lac. Le premier met en évidence une alimentation du lac par la nappe et les bordures. Quant au second, il montre un drainage du lac par l'Oued Meboudja.



Légende :  lac — 3 — Courbes isopièzes

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

- Sens d'écoulement - - - - Cours d'eau secondaire
— Cours d'eau principal ○○○ Lignes de partage des eaux

Echelle : 1cm → 2,6 Km

Figure 29 : Carte piézométrique du mois de mai 1997 (in N. Zenati, 1997)

La nappe d'accompagnement du lac Fetzara :

La carte élaborée au cours de la même période que la précédente par krigeage porte sur 145 puits nivelés, fait apparaître deux sens d'écoulement (fig.30):

- le premier est orienté vers le lac et met en évidence une alimentation du lac par la nappe,
- le second est orienté vers l'Oued Meboudja et met en évidence la relation lac-oued-nappe.

Les eaux sortant du lac (très minéralisées) par le biais de l'Oued Meboudja (canal de vidange du lac) vont alimenter la nappe, entraînant probablement une modification de la composition chimique des eaux.

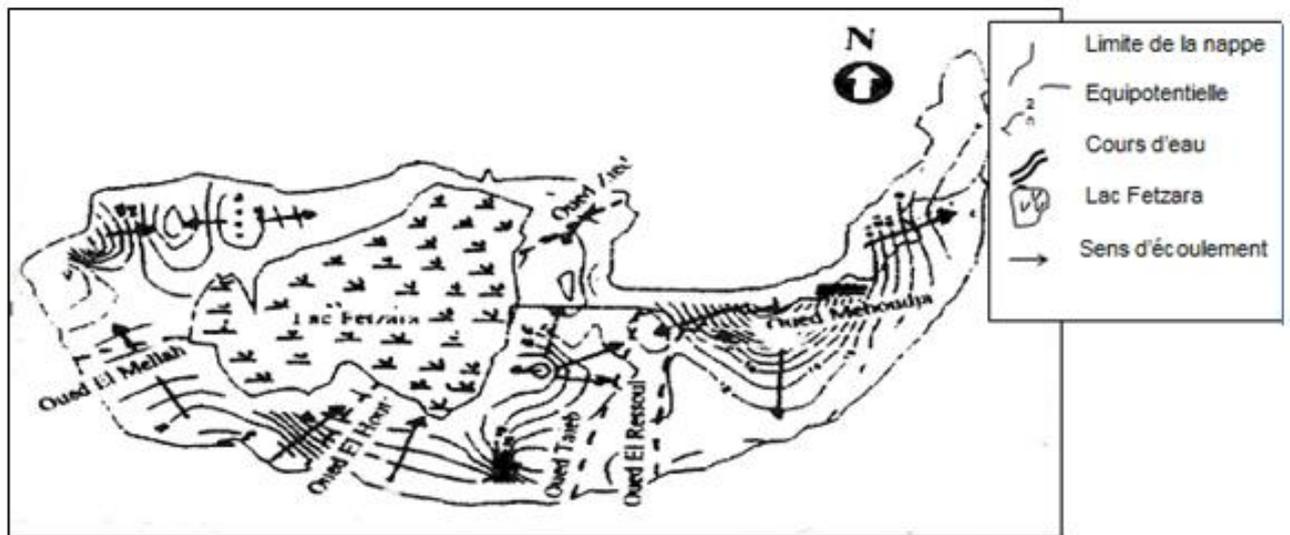


Figure 30 : Carte piézométrique de la nappe d'accompagnement du lac Fetzara (MHT)

IV-5-3- Piézométrie réalisée par TH. Debieche (2000) :

Les travaux réalisés par T. H. Debieche, ont surtout porté sur la zone située entre El Hadjar et Hadjar Edisse, suivant l'Oued Meboudja, là où se rejettent les eaux du complexe Arcelor-Mittal Still. L'Oued est en relation avec le lac, en effet il sert de canal de vidange du lac, de ce fait les eaux de l'Oued proviennent du lac.

La carte piézométrique tracée (fig. 31) qui se rapporte au mois de Décembre 2000, montre des courbes isopièzes fermées vers l'amont (socle métamorphique et zone de Dreaan) et

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

ouvertes vers l'aval (partie Nord et Est de la zone d'étude), ce qui peut indiquer une alimentation à partir des bordures vers la plaine. Deux formes locales de la piézométrie sont observées :

- un dôme au centre de la plaine dû à l'effet de l'alimentation supplémentaire de la nappe (causé par les précipitations tombées au cours de cette période, elles étaient de l'ordre de 73,5 à 152 mm/mois)
- une dépression due à l'effet du pompage intensif au niveau des puits, confirmant ainsi une exploitation pour divers besoins à partir des eaux des nappes situées dans la zone de Hadjar Edisse. Le gradient hydraulique est très faible au centre de la plaine, il varie entre 4,92 et 7,41 10^{-4} indiquant l'existence d'une forte perméabilité, par contre vers les bordures ce rapport augmente, il est de 2,52 à 2,88 10^{-3} indiquant une faible perméabilité ou une pente importante des terrains.

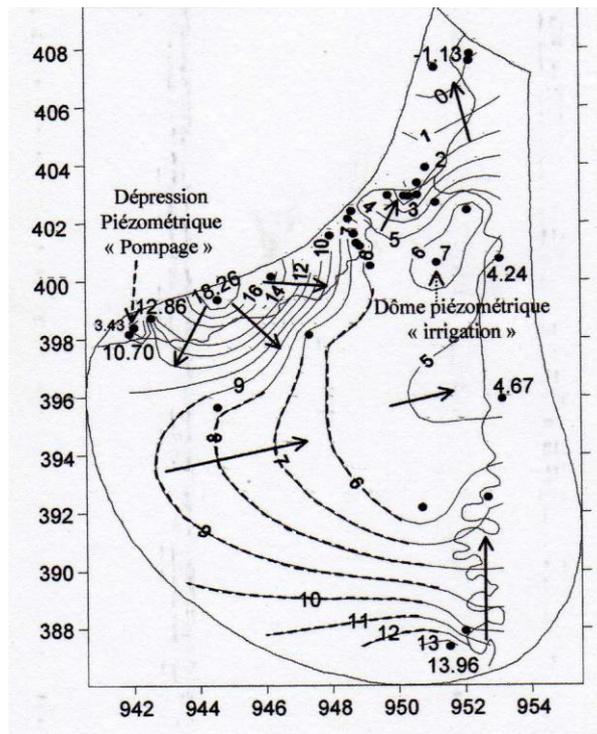


Figure 31: Piézométrie réalisée par TH. Debieche (2000)

IV-5-4- Piézométrie réalisée par S. Habes (2006) :

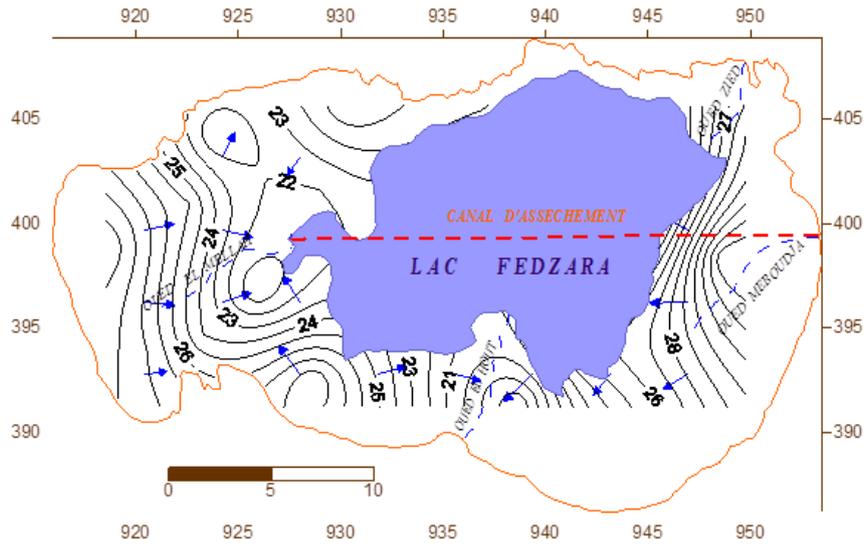


Figure 32-a: Piézométrie de la nappe entourant le lac Fedzara période des hautes eaux (Décembre 2004)

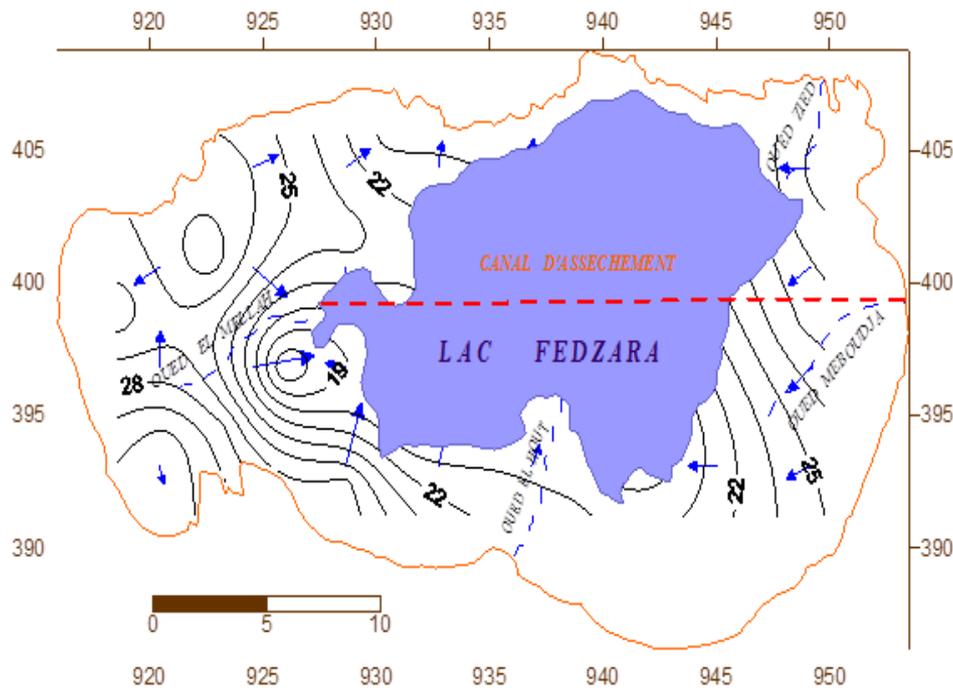


Figure 32-b: Piézométrie de la nappe entourant le lac Fedzara période des basses eaux (Mars 2005)

L'allure générale des courbes isopièzes montre que la nappe suit le modèle topographique (fig. 32 a-b). La morphologie de la surface piézométrique montre des zones d'alimentation au Nord-Ouest et au Sud-Ouest du lac.

D'après l'allure des courbes, on remarque que l'écoulement reste convergent vers le lac dans ses parties Nord et Sud. Les courbes isopièzes sont serrées au Nord du lac donc au piémont de l'Edough et sont plutôt espacées du côté Sud-Est (Cheurfa) où le gradient hydraulique diminue.

L'alimentation de la région Sud du lac provient du Tell Nord Guelmien, alors que l'alimentation de la région Nord de la nappe s'effectue à partir des massifs de l'Edough et de Belelieta.

A l'Ouest du lac, on note la présence d'une dépression malgré l'absence de pompage, cette situation serait engendrée par les apports qui se font par les massifs du Nord-Ouest et par la ligne de partage des eaux au Sud-Ouest, à titre d'information que durant la période humide, la région est carrément inaccessible.

IV-5-5- Piézométrie réalisée par F. Zahi (2008) :

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Au cours de son travail de magister, Zahi F. a réalisé plusieurs campagnes de mesure piézométriques. Le premier constat réalisé met en évidence une homogénéité des surfaces piézométriques, cette dernière serait due aux précipitations tombées au cours des mois de mesure ; décembre 2006 (**110,97 mm**) et mars 2007 (**203,7 mm**).

L'observation des cartes réalisées (fig. 33 a & b) met en évidence une similitude de la morphologie piézométrique.

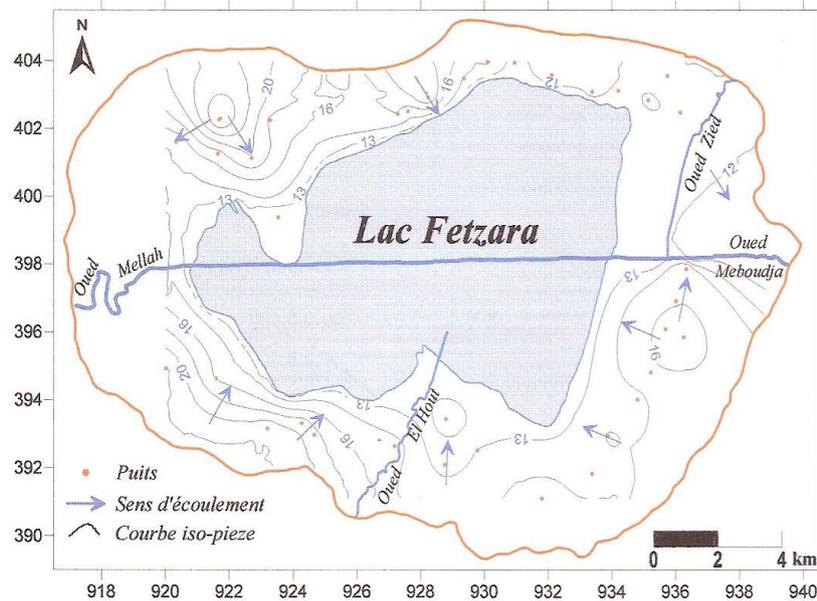


Figure 33-a : Carte piézométrique de la nappe entourant le lac Fetzara du mois de Décembre 2006
(in F. Zahi, 2008)

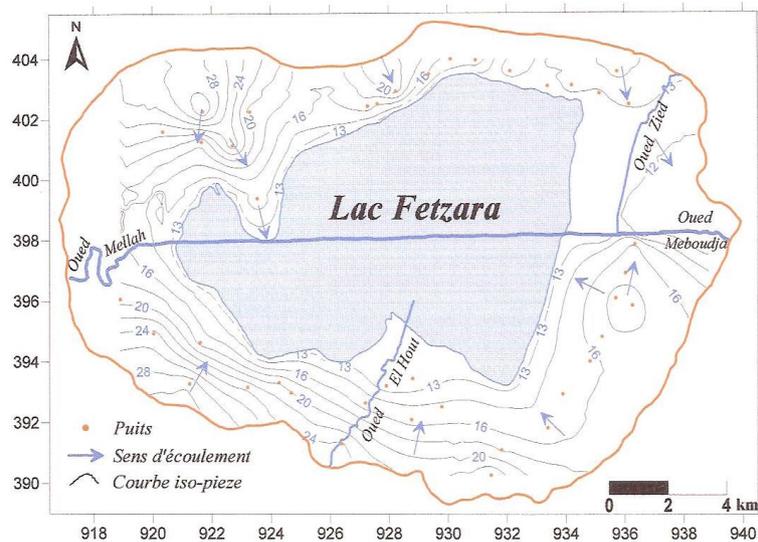


Figure 33-b : Carte piézométrique de la nappe entourant le lac Fetzara du mois de Mars 2007
(in F. Zahi 2008)

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

L'observation des cartes (fig. 33 a & b) montre que l'écoulement des eaux se fait suivant l'allure topographique. Les lignes de courant sont dirigées vers le lac Fetzara, dans sa partie centrale, par contre au niveau de la zone Est l'écoulement est dirigé vers l'Oued Meboudja.

Les courbes isopièzes sont serrées au niveau des bordures Nord et au Nord-Ouest du lac, ce qui traduit un fort gradient hydraulique de l'ordre de $0.66 \cdot 10^{-2}$, à l'approche du lac l'espacement des courbes devient important, ce qui signifie une baisse du gradient, il atteint $0.25 \cdot 10^{-2}$.

Ce changement de vitesse d'écoulement traduit un changement de la perméabilité. Au niveau des zones Sud et Sud-Est, on observe une répartition inverse par rapport à la précédente, les courbes espacées de 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. La carte piézométrique se rapportant au mois de Mars 2007 (fig. 33b), montre la même allure que la précédente, cependant l'écoulement est 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. 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 (piémont de l'Edough). Les précipitations enregistrées au cours de ce mois (203,7 mm) masquent l'effet des pompes observés au niveau des cartes précédentes.

IV-5-6- Piézométrie réalisée par A.K Rouabhia et al (2008) :

Les étudiants de l'université de Tébessa, avec le concours de Mr Rouabhia AEK, ont réalisé un travail sur le lac Fetzara. Ce travail a conduit à une publication dans la revue *Arabian Journal of Geosciences*. La carte réalisée (fig. 34) montre une convergence des écoulements vers le lac et vers les zones de pompes, comme celle située au niveau de la zone Ouest qui est la zone d'Oued El Hout. Notons que les lignes de partages des eaux sont présentes et suivent la topographie de la région.

Les courbes isopièzes ont une concavité dirigée vers l'amont (Djebels ; Belelieta, Edough et Tell Nord Guelmien) considérée comme zones d'alimentations et l'écoulement se diverge vers les plaines d'El Hadjar et Hadjar Edisse. L'espacement des courbes isopièzes varie d'une région à l'autre. Cette variation est fonction de l'écoulement et donc du coefficient de perméabilité. Il est plus faible dans les régions de Berka Zergua, Nord-Ouest et Sud-Ouest du Lac Fetzara. On remarque des écoulements souterrains divergeant, se faisant vers l'Ouest et vers le lac, vers le Nord-Ouest, vers l'Ouest et vers l'Est. Par ailleurs, des dépressions piézométriques sont observées au niveau des régions de l'Oued El Mellah, El Ganthra et Hourraicha dues à l'effet de pompage intensif au niveau de ces régions. Ces eaux sont utilisées pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation pour la région entourant le lac Fetzara. On remarque aussi, que l'Oued Meboudja provoque un resserrement local des courbes isopièzes, avec un écoulement rapide qui peut être produit par les apports latéraux et la relation mixte qui existe entre la nappe et l'Oued Meboudja.

Le gradient hydraulique, varie d'une période à une autre et dépend de la recharge et l'exploitation de la nappe. Il est fort au niveau des piémonts des montagnes, variant entre $3.7 \cdot 10^{-3}$ et $2.8 \cdot 10^{-2}$ indiquant une vitesse d'écoulement rapide. Par contre, ce rapport diminue vers les plaines, il oscille entre $2.2 \cdot 10^{-3}$ et $3.5 \cdot 10^{-3}$, ce qui s'explique par une pente et une vitesse faible.

IV-5-8-Piézométrie réalisée par S. Habes (2010) :

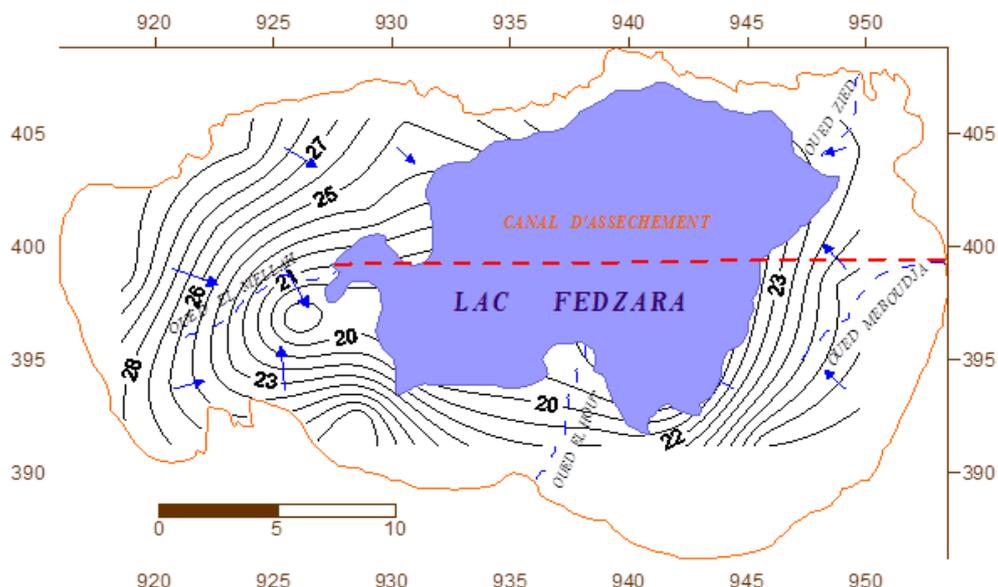


Figure 36-a: Carte piézométrique de la nappe entourant le lac Fetzara (Janvier 2010)

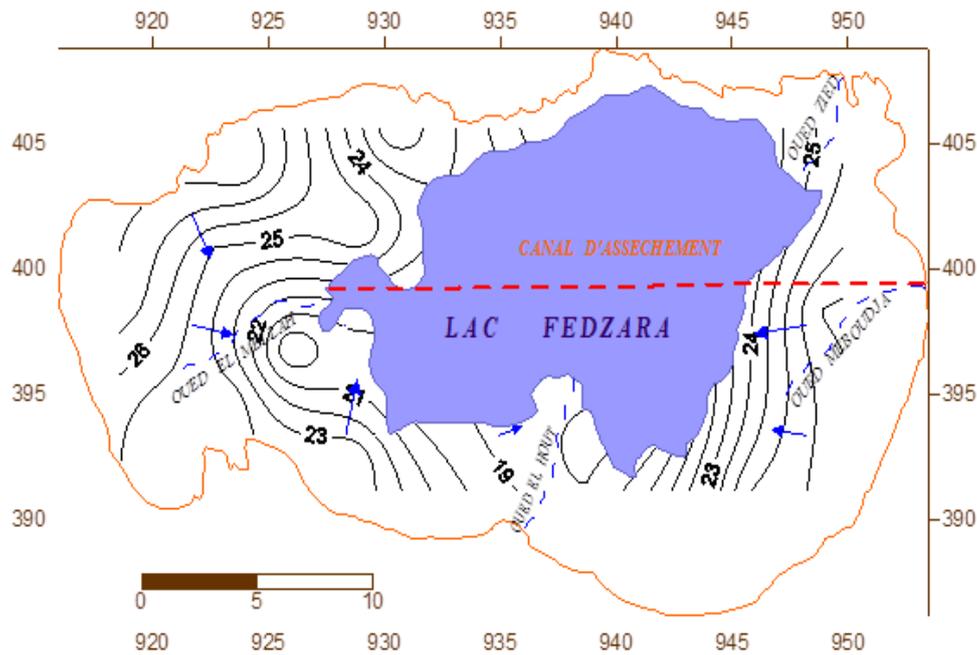


Figure 36-b : Piézométrie de la nappe entourant le lac Fedzara (Mai 2010)

D'après l'observation des deux cartes (Jan 2010-Mai 2010), on remarque que les courbes isopièzes ont la même allure que les précédentes, avec un écoulement dirigé vers le lac, 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.

Les courbes isopièzes sont serrées au Nord du lac et elles sont espacées au Sud (El Eulma). Cette différence d'allure traduit un changement du gradient hydraulique, traduisant donc un changement de perméabilité, donc de faciès. L'alimentation de la nappe se fait principalement par les infiltrations.

IV-6- Battement de la nappe profonde :

IV-6-1- La nappe des graviers

Cette nappe est positionnée entre un substratum argileux et un toit imperméable à semi-perméable qui disparaît dans la partie Sud (Drean et Chihani). La perméabilité de cette nappe varie de 10^{-5} à 10^{-4} m/s, la transmissivité est de $3,5 \cdot 10^{-3}$ à $3 \cdot 10^{-2}$ m²/s dans la région de Drean, elle est de $4,6 \cdot 10^{-3}$ à $5 \cdot 10^{-3}$ m²/s dans la partie Nord. Le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 10^{-4} dans la partie captive et atteint 10^{-2} dans la partie libre (in Zenati, 1999). Cette nappe est fortement exploitée. Pour réaliser les mesures piézométriques TH Debieche a choisi

16 forages dont 13 sont situés au niveau de l'Oued Seybouse et 3 au niveau de l'Oued Meboudja

IV-6-1-1- Chronique des Piézométries de la nappe profonde (in Debieche 2002) :

Dans son travail, TH Debieche a élaboré deux cartes piézométriques. La première a été réalisée pendant la période des basses eaux (juin) et la deuxième pendant la période des hautes eaux (décembre) (fig. 37 a & b)

L'observation de ces cartes montre un écoulement de direction S-N, avec une forme divergente des isopièzes par rapport à l'Oued Seybouse au niveau de la partie Sud, où la nappe est peu profonde, mettant en évidence une alimentation de la nappe à partir de l'Oued.

La période des basses eaux montre des niveaux variant entre 4,22 et 8,10 m et un gradient de l'ordre de $1,25 \cdot 10^{-3}$. Par contre, pendant la période des hautes eaux, les niveaux d'eau sont compris entre 0,73 et 9,19 m, le gradient hydraulique est de l'ordre de $1,11 \cdot 10^{-3}$.

Deux dépressions sont observées au centre de la plaine pendant la période des basses eaux, dues à l'effet de pompage intensif qui abaisse le niveau piézométrique de la nappe (-23,08 ; -7,03).

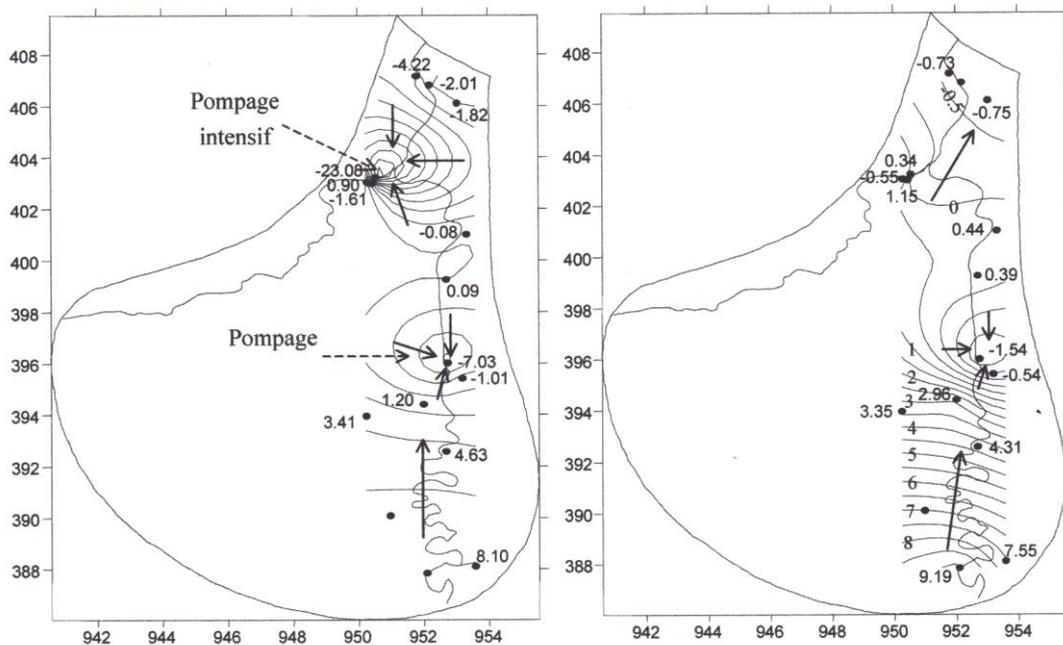


Figure 37 a & b : Cartes piézométriques de la nappe des graviers (In TH Debieche 2002)

IV-6-1-2- Chronique des Piézométries de la nappe profonde (in Hani 2003) :

L'aperçu relatant l'évolution des niveaux piézométriques (fig. 38) a été réalisé par A. Hani (2003), montre une baisse des niveaux piézométriques confirmée par la présence de côtes inférieures au niveau de la mer, la courbe de côte zéro prend une plus grande extension, ce qui laisse supposer une invasion, cette baisse est beaucoup plus prononcée en période de basses eaux où les apports en eau par les précipitations sont faibles ou quasiment inexistantes.

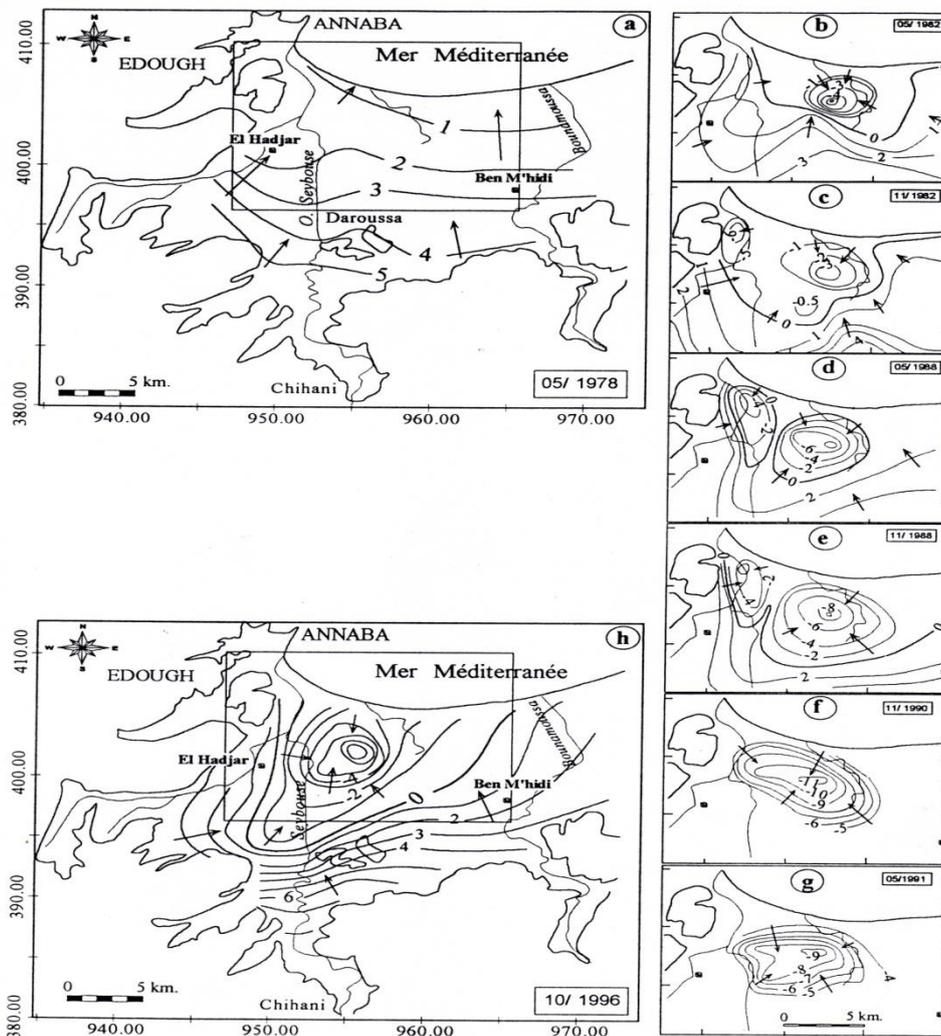


Figure 38 : Chronique des piézométries de la nappe des graviers (in Hani 2003)

Cette évolution montre une baisse très sensible des niveaux piézométriques, exposant ainsi la nappe à une invasion marine, se traduisant par un accroissement de la salinité des eaux. Cette situation entraîne un mélange des eaux provenant de diverses origines, ce qui tend à compliquer l'explication de l'origine de la salinité des eaux.

IV-6-2- Battements du niveau de la nappe des graviers (in Debieche 2002) :

Le niveau piézométrique de cette nappe évolue en fonction de plusieurs paramètres :

- les précipitations,
- les conditions d'exploitation et la nature du toit de la nappe.

Plusieurs cas d'évolution sont observés :

- cas de la partie amont de la nappe, les variations piézométriques sont très influencées par les pluies enregistrées au mois d'avril et au mois de novembre (124,1mm en mois d'avril et 194mm en mois de novembre);
- Au niveau de la plaine d'El Hadjar, le niveau de la nappe est uniquement influencé par les fortes pluies, pour lesquelles la nappe présente une remontée du niveau piézométrique (fig. 37 b, décembre) ;
- au niveau de la partie aval, le niveau ne présente aucune réponse immédiate à la pluie, car la nappe est profonde.
- Dans une zone en exploitation, on assiste à un phénomène de Yoyo entre la descente (en pompage) et la remontée (arrêt du pompage), avec des variations brutales du niveau piézométrique;
- le pompage en continue aboutit à un abaissement du niveau piézométrique, puis à une stabilité provoquant un niveau d'équilibre entre le débit du pompage et les arrivées d'eaux à partir de la nappe.

IV-7- Bilan hydrodynamique du système aquifère global: Oued - Nappe superficielle – Nappe des graviers :

Le système aquifère présente deux types de nappes (fig. 39) :

- Les eaux de surface: les entrées principales sont représentées par les apports d'eau qui proviennent de l'ensemble du bassin versant de la Seybouse, les apports du lac Fetzara à travers l'Oued Meboudja, ainsi que les différents rejets urbains et industriels qui se déversent directement au niveau de l'Oued. Par contre, les sorties sont évacuées par l'exutoire de l'Oued qui se jette directement au niveau de la mer.

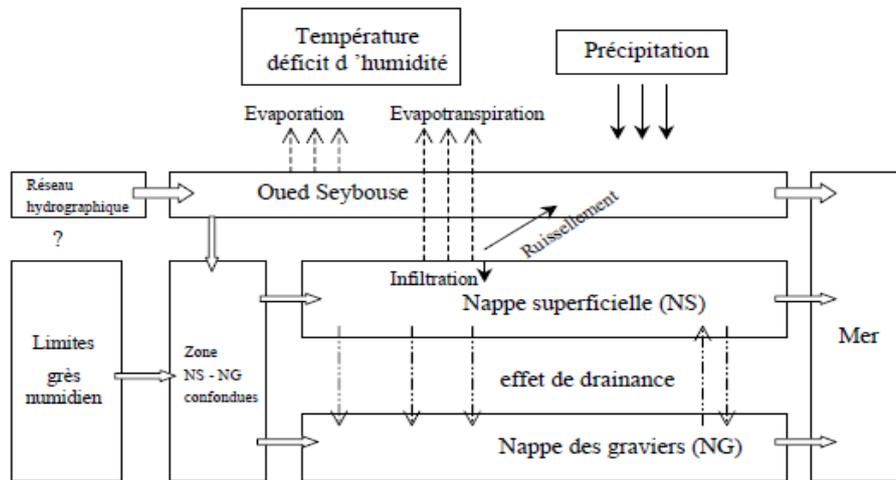


Figure 39: Schéma montrant les interactions et les échanges dans le système aquifère de Annaba (in Debieche, 2002)

Tableau 17 : Paramètres intervenant dans l'établissement du bilan hydrodynamique entre oued - nappe superficielle – nappe des graviers (in Debieche, 2002).

	Entrées		Sorties	
Oued	- Pluies		- Evaporation	
	- Ruissellement		- Déversement de l'oued dans la mer	
	- Apports du réseau	O. Seybouse O. Meboudja	- Infiltration de l'oued vers la nappe des graviers et la nappe superficielle	
	- Infiltration depuis la nappe superficielle			
Nappe superficielle (NS)	- Rejets urbains et industriels		- Pluies	
	- Pluies		- Evapotranspiration	
	- Irrigation par	Barrage de Chafia Nappe des graviers Oued	- Exploitation par les puits	
	- Infiltration a partir de l'oued Seybouse (Drean-Chihani)		- Perte vers l'oued Seybouse	
	- Alimentation souterraines		- Drainance (NS - NG)	
Nappe des graviers (NG)	Socle métamorphique Grès numidien		- Fuite vers la partie Est	
	- Pluies à nappes confondues		- Fuites vers la mer (Exutoire)	
	- Infiltration de l'oued Seybouse au niveau de la zone de confluence (Drean-Chihani)		- Exploitation par les forages	
	- Drainance (NS - NG)		- Drainance (NG - NS)	
	- Alimentation souterraines		- Fuites vers la mer (Exutoire)	

Le précédent tableau 17, donne un aperçu sur les paramètres intervenant dans l'établissement du bilan. Leur quantification aboutit aux résultats suivants :

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Tableau 18: Bilan hydrodynamique oued – nappe superficielle – nappe des graviers dans la basse plaine de la Seybouse (in Debieche, 2002, modifié)

	Entrées		Equation	% d'erreur	V (10 ⁶ m ³ .an ⁻¹)	V Total
Oued	- Pluies		$V = P \cdot S_{\text{oued}}$	2	2,068	964,797
	- Ruissellement		$V = Hr \cdot S_T$	2	31,493	
	- Rejets urbains et industriels		$V = Q_{\text{u.i.}} \cdot t$	10	63,115	
	- Apports du réseau hydrographique	O. Seybouse	$V = Q_s \cdot t$	10	722,984	
		O. Meboudja	$V = Q_M \cdot t$	10	144,218	
- Infiltration depuis la nappe superficielle		$V = (K I S_{\text{séparé}}) \cdot t$	5	0,467		
Nappe superficielle (NS)	- Pluies		$V = I_{\text{efficace}} \cdot S_T$	2	16,7024	24,66
	- Irrigation par	Barrage de Chafia	$V = Q \cdot t$	10	4,86	
		Nappe profonde	$V = Q \cdot t$	10		
		Oued	$V = Q \cdot t$	10		
	- Drainance (NG ---> NS)		$V = K \cdot ((H_{\text{NC}} - H_{\text{NS}})/E) \cdot S_T$	10		
	- Infiltration à partir de l'oued Seybouse (Drean - Chihani)		$V = T \cdot L \cdot i$	5	0,394	
- Alimentation souterraines par les bordures	Socle métamorphique	$V = T \cdot L \cdot i$	5	0,1237		
	Grès numidien	$V = T \cdot L \cdot i$	5	0,07889		
Nappe des graviers (NG)	- Pluies sur nappes confondues		$V = I_{\text{efficace}} \cdot S_{\text{conf}}$	2	0,96	17,2
	- Infiltration de l'oued Seybouse au niveau de la zone de confluence (Drean - Chihani)		$K \cdot I \cdot S_{\text{oued}}$	5	0,196	
	- Drainance (NS ---> NG)		$V = K \cdot ((H_{\text{NS}} - H_{\text{NC}})/E) \cdot S_T$	10		
	- Alimentation souterraines par les bordures	Socle métamorphique	$V = T \cdot L \cdot i$	10	15,5	
		Grès numidien	$V = T \cdot L \cdot i$	10	0,587	

	Sorties		Equation	% d'erreur	V (10 ⁶ m ³ .an ⁻¹)	V Total
Oued	- Evaporation		$V = ETP \cdot S_{\text{oued}}$	2	3,062	941,348
	- Déversement de l'oued dans la mer		$V = Q \cdot t$	10	937,89	
	- Infiltration de l'oued vers la nappe captive et la nappe superficielle		$V = K \cdot I \cdot S$	10	0,394	
Nappe superficielle (NS)	- Exploitation par les puits		$V = (Q_{\text{exp}} - (I_{\text{eff}} \cdot S)) \cdot t$	10	2	24,4
	- Perte vers l'oued Seybouse		$V = K \cdot I \cdot S_{\text{Seybouse}}$	5	0,408	
	- Drainance (NS ---> NG)		$V = K \cdot (H_{\text{NS}} - H_{\text{NC}})/E) \cdot S_T$	10	22	
	- Fuite vers la partie Est		$V = T \cdot L \cdot i$	5	0,174	
	- Fuites vers la mer (Exutoire)		$V = T \cdot L \cdot i$	5	0,173	
Nappe des graviers (NG)	- Exploitation par les forages		$V = Q_{\text{pompage}} \cdot t$	10	4,86	17,8
	- Drainance (NG ---> NS)		$V = K \cdot (H_{\text{NC}} - H_{\text{NS}})/E) \cdot S_T$	10		
	- Fuites vers la mer (Exutoire)		$V = T \cdot L \cdot i$	5	13	

Débit global (10⁶ m³.an⁻¹)			
	Oued	Nappe superficielle	Nappe Profonde
Entrées	964.8	24.66	17.21
Sorties	941.35	24.41	17.84
Différence	23.45	0.25	-0.63

Légende : V, volume ; P, précipitation ; H, hauteur d'eau ; Q, débit ; s, Seybouse ; M, Meboudja ; urb., urbain ; ind., industriel ; I, infiltration ; K, perméabilité ; t, temps ; i, gradient hydraulique ; E, épaisseur ; T, transmissivité ; L, largeur ; NG, nappe des graviers ; NS, nappe superficielle ; r, ruissellement

D'autres échanges et apports d'eau peuvent se produire entre l'Oued et la nappe, ils constituent dans des endroits des entrées et dans d'autres des sorties.

- Les eaux souterraines: les entrées principales sont représentées par les apports des pluies efficaces, des infiltrations à partir des bordures (socle métamorphique de la partie Ouest et le grès Numidien de la partie Sud) et les infiltrations qui proviennent du réseau hydrographique vers la nappe. Par contre, les sorties sont liées à l'évapotranspiration, les fuites des eaux souterraines vers l'extension Est de la nappe.

D'autres échanges peuvent se produire entre la nappe libre et la nappe des graviers par l'effet de drainance et entre l'Oued et les deux nappes par effet d'échange Oued – Nappe.

Le calcul du bilan hydrodynamique des trois unités (tableau 18) a été fait avec une erreur qui varie entre 2 et 10 %. Elle est due à l'incertitude des mesures, des épaisseurs et des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères. L'alimentation principale de l'Oued est représentée par le réseau hydrographique ($867 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$) et la sortie principale est présentée par le déversement de l'Oued vers la mer ($938 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$). Pour la nappe superficielle, l'entrée principale est constituée par les pluies efficaces ($16,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$) et la sortie principale est présentée par la drainance de la nappe libre vers la nappe des graviers ($22 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$). Et enfin pour la nappe des graviers, l'entrée principale est présentée par l'effet de drainance ($22 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$) et la sortie par les fuites souterraines de la nappe profonde vers l'extension Est de la nappe ($13 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$).

Le calcul du bilan hydrodynamique des trois unités (tableau 18), montre que le renouvellement d'eau le plus important est observé au niveau des eaux de surface par un volume de $941 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$, suivi par la nappe superficielle ($24,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$) et enfin la nappe des graviers ($17,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$). Ce calcul du volume d'eau de renouvellement indique que les deux nappes ainsi que les eaux de l'Oued présentent un capital hydraulique de haute valeur puisque les ressources renouvelables sont importantes.

IV-8- Carte des Transmissivités de la nappe des graviers:

La carte des valeurs de transmissivité (Fig. 40), obtenue par krigeage, montre un secteur de fortes valeurs correspondant à deux zones bien distinctes, la première située le long de la vallée de la Seybouse et coïncidant avec l'axe de la fosse de Ben-Ahmed ; et la seconde dans la partie orientale du massif dunaire. Dans ce secteur, les sables éoliens qui surmontent les alluvions de la fosse d'effondrement de Ben M'hidi présentent des caractéristiques

hydrodynamiques exceptionnelles. Les plus faibles valeurs de T sont situées à l'Est de Ben M'hidi et s'étendent sur toute la partie littorale du massif dunaire. La variation de la répartition des caractéristiques hydrodynamiques va se répercuter sur le contact mer nappe, ce dernier sera plus rapide et donc important dans les zones où les valeurs de T sont élevés et long dans les secteurs à faibles valeurs de T.

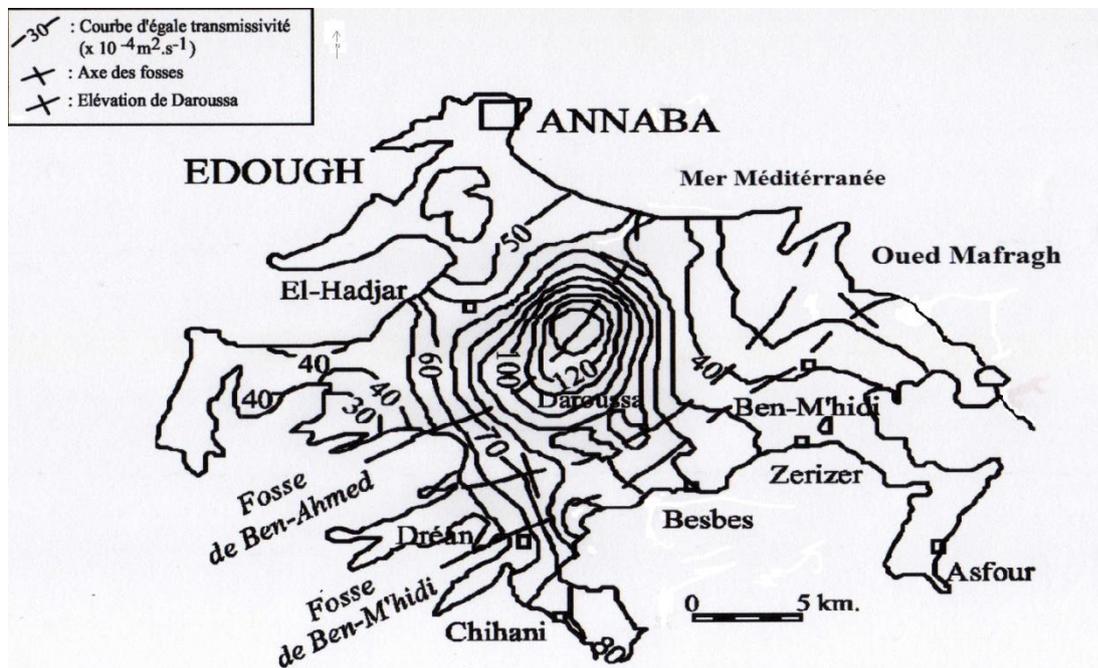


Figure 40: Carte des Transmissivités obtenue par krigeage ordinaire (In Hani, 2003, modifiée)

IV-9- Apports des sondages mécaniques :

Plusieurs forages ont été réalisés au niveau des nappes entourant le lac, ce qui nous a permis de déterminer les champs de captages suivants : El Eulma, Berrahal, Oued El Aneb et Kheraza. Chaque champ de captage est caractérisé par la lithologie des formations captées et leurs profondeurs. Ainsi nous distinguons :

IV-9-1- Champ de captage d'El Eulma : situé au Sud Est du lac, on a recensé les deux forages suivants.

Forage (FII) El Eulma (120m de profondeur) :

Coupe lithologique :

- 0 – 18 m → argile jaune
- 18 – 28 m → graviers à matrice argileuse
- 28 - 60 m → galet de grés
- 60 - 75 m → graviers de grés avec présence de sable
- 75 - 95 m → galet de grés
- 95 – 120 m → marne grise

IV-9-2- Champ captant de Khoualed :

Forage Khoualed (50m de profondeur) :

Coupe lithologique :

- 0 - 5 m → argile noire sableuse
- 5 - 6 m → sable grossier
- 6 - 11 m → argile sableuse beige
- 11 - 15 m → argile noire légèrement graveleuse
- 15 - 19 m → gravier de grés à matrice argileuse
- 19 - 24 m → argile jaune grise
- 24 - 36 m → graviers et galets de grés
- 36 - 50 m → marne

Au niveau de cette zone on note une discontinuité des parties aquifères. Les niveaux captés quoi qu'ayant la même lithologie sont situés à différentes profondeurs. Ce décalage est probablement imputable à la tectonique. Les formations rencontrées sont sédimentaires.

IV-9-3- Champ captant de Berrahal : situé au Sud-Ouest du lac, comporte cinq (05) forages.

Forage Berrahal I(BH 1) (80 mètres de Profondeur),

Coupe lithologique :

- 0 – 03 m → terres végétales
- 03 – 06 m → sable très fin jaune
- 06 - 07 m → graviers fin
- 07 - 10 m → sable fin jaune limoneux

- 10 - 13 m —> argile graveleuse
- 13 - 15 m —> cipolin blanc
- 22 - 49 m —> gneiss micaschiste légèrement argileux
- 49 - 60 m —> graviers à matrice argileuse
- 60 - 77 m —> cipolin légèrement argileux blanc
- 77 - 80 m —> gneiss

Forage Berrahal I(BH2), (85 mètres de profondeur),

Coupe lithologique :

- 0 - 03 m —> terres végétales
- 03 - 06 m —> sable très fin jaune
- 06 - 07 m —> graviers fin
- 07 - 10 m —> sable fin jaune limoneux
- 10 - 13 m —> argile graveleuse
- 13 - 15 m —> cipolin blancs
- 22 - 49 m —> gneiss micaschiste légèrement argileux
- 49 - 60 m —> graviers à matrice argileuse
- 60 - 77 m —> cipolin légèrement argileux blanc
- 77 - 80 m —> gneiss

Forage Berrahal I(BH3): (77 mètres de profondeur),

Coupe lithologique :

- 0 - 03 m —> terres végétales
- 03 - 06 m —> sable très fin jaune
- 06 - 07 m —> graviers fin
- 07 - 10 m —> sable fin jaune limoneux
- 10 - 13 m —> argile graveleuse
- 13 - 15 m —> cipolin blanc
- 22 - 49 m —> gneiss micaschiste légèrement argileux
- 49 - 60 m —> graviers à matrice argileuse
- 60 - 77 m —> cipolin légèrement argileux

Forage Berrahal I(BH4), (80 mètres de profondeur),

Coupe lithologique :

- 0 – 03 m —→ terres végétales
- 03 – 06 m —→ sable très fin jaune
- 06 - 07 m —→ graviers fin
- 07 - 10 m —→ sable fin jaune limoneux
- 10 - 13 m —→ argile graveleuse
- 13 – 15 m —→ cipolins blancs
- 22 – 49 m —→ gneiss micaschiste légèrement argileux
- 49 – 60 m —→ graviers à matrice argileuse
- 60 – 77 m —→ cipolin légèrement argileux blanc
- 77 – 80 m —→ gneiss

Forage Gherch: (80 mètres de profondeur),

Coupe lithologique :

- 0 – 20 m —→ sable fin argileux
- 20 – 28 m —→ schiste avec passage de calcaire et sable
- 28 – 38 m —→ calcaire schisteux parfois à passage sableux
- 38 – 78 m —→ schiste altéré avec passage calcaire et présence de paillettes des micas
- 78 – 80 m —→ calcaire cipolins

On remarque que les cinq forages atteignent presque la même profondeur, donc captant le même aquifère. Les formations rencontrées sont soit métamorphiques soit sédimentaires.

IV-9-4- Champ captant d'Oued El Aneb : situé à l'Ouest du lac et caractérisé par l'implantation de deux (02) forages.

Forage (D1) Draa Errich (100 mètres de profondeur),

Coupe lithologique :

- 0 – 12 m —→ argile
- 12 – 17 m —→ sable gréseux
- 17 – 63 m —→ micaschiste

- 63 – 83 m —> gniess
- 83 – 95 m —> micaschiste
- 95 – 100 m —> cutting de gniess

Forage (DII) Draa Errich (75 mètres de profondeur),

Coupe lithologique :

- 0 – 12 m —> argile
- 12 – 17 m —> sable gréseux
- 17 – 63 m —> micaschiste
- 63 – 75 m —> gneiss

Les deux forages captent le même niveau aquifère constitué par les sables gréseux. La variation des profondeurs notée est due aux techniques de forages. Les formations rencontrées sont soit métamorphiques, soit sédimentaires.

IV-9-5- Champ captant de Kheraza : situé au Nord-Ouest du lac, reconnu par cinq (05) forages.

Forage (K3) (98 mètres de profondeur),

Coupe lithologique:

- 0 – 37 m —> argile grise
- 37 - 38 m —> gneiss altéré
- 38 - 48 m —> argile grise
- 48 - 63 m —> argile blanche
- 63 – 66 m —> argile grise
- 66 – 80 m —> gneiss altéré
- 80 – 86 m —> sable fin grés
- 86 – 98 m —> argile sableuses grise

Forage (K6), (82 mètres de profondeur),

Coupe lithologique:

- 0 – 38 m —> argile noire vaseuse contenant des sables très fin
- 38 – 41 m —> gneiss et mica schiste

41 – 48 m —> argile noire vaseuse

48 – 65 m —> cipolin très dur

65 – 67 m —> sable gris très fins

67 – 82 m —> cipolin gris bleutés

Forage (K7), (75 mètres de profondeur),

Coupe lithologique :

0 – 5 m —> argile brune jaune légèrement limoneux

5 – 6 m —> limon légèrement graveleux

6 – 11 m —> vase avec débris de coquillages

11 – 18 m —> sable très fin gris

18 – 30 m —> gneiss altéré à matrice argileuse

30 – 36 m —> argile (vase) noire

36 – 40 m —> gneiss

40 – 46 m —> sable fin graveleux

46 – 58 m —> argile brune avec débris de coquillages

58 – 60 m —> gneiss compacts

60 – 62 m —> argiles gneissiques

62 – 70 m —> gneiss avec coquillage

70 – 82 m —> gneiss compacte (cipolin)

82 – 92 m —> gneiss altéré

92 – 95 m —> cipolin

Forage (K8), (70 mètres de profondeur),

Coupe lithologique:

0 – 02 m —> sable

02 – 06 m —> argile jaune

06 – 30 m —> argile grise sableuse

30 – 39 m —> sable argileux

39 – 49 m —> argile grise

49 – 70 m —> gneiss fissuré

Forage (K9), (70 mètres de profondeur),

Prof : 70 m

Coupe lithologique :

- 0 – 31 m —→ argile grise
- 31 – 34 m —→ sable argileux
- 34 – 54 m —→ graviers de grés avec sable grossier
- 54 – 70 m —→ grés fissurés

On remarque que les forages réalisés dans cette zone atteignent presque tous le même niveau et captent les sables et les graviers. Les formations rencontrées sont soit métamorphiques soit sédimentaires.

On remarque que les formations rencontrées à l'Est du Lac diffèrent de celles rencontrées à l'Ouest du Lac. Cependant les profondeurs sont voisines, elles oscillent autour de 100 mètres en moyenne.

IV-10- Conclusion :

L'ensemble de cette étude, nous a permis de déterminer les relations existantes entre le lac et les nappes. Par ailleurs, l'observation des cartes piézométriques se rapportant à différentes dates montre la variation des niveaux piézométriques mettant en évidence une fluctuation des nappes, cette dernière se répercute sur le niveau d'eau dans le lac.

L'observation des informations recueillies à partir des sondages mécaniques montre une discontinuité de la lithologie entre les parties Est et Ouest du lac.

Notons qu'au niveau de la plaine, nous avons recensés deux types d'aquifères, le premier profond éloigné du lac et le second libre souvent entourant le lac et l'alimentant. Par ailleurs, les eaux de surface sont à l'origine de l'alimentation du lac par les Oueds Hout, Mellah et Zied, à l'encontre de l'Oued Meboudja qui joue le rôle d'un canal de vidange du lac.

Les débits extraits ne sont pas très importants à cause des variations lithologiques, à titre indicatif, le forage réalisé à l'entrée d'El Bouni, captant les cipolins a donné un débit de 0.5 l/s, ce qui est insuffisant et de ce fait il a été abandonné.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

*Chapitre V :
Hydrochimie des eaux du lac et de son
environnement
(Oueds et nappes)*

Chapitre V :
Hydrochimie des eaux du lac et de son environnement
(Oueds et nappes)

En Algérie, la salinité des eaux reste l'une des principales pollutions des eaux. Cette salinité est souvent mal maîtrisée car ses origines sont multiples et peuvent être d'origines naturelles ou anthropiques, ce qui complique d'avantage la compréhension des mécanismes régissant cette pollution. Nous pouvons noter que le mode de salinisation dépend des facteurs suivants :

- géographique (côtier ou continental),
- géologique (nature de l'aquifère, les sédiments traversés par les eaux et leurs minéralogies,
- le climat de la zone d'étude influence directement la salinité des eaux,
- l'intrusion marine, par le biais de la surexploitation des nappes crée un déséquilibre de l'interface eau douce eau salée,
- le retour des eaux d'irrigation, en effet les eaux en traversant le sol, acquièrent une nouvelle composition qui peut entraîner une variation de la salinité.

L'Algérie en matière d'affleurement de formations évaporitiques occupe le troisième rang mondial, ce qui dénote qu'une grande quantité d'eau présentera une salinité importante. L'affleurement des formations évaporitiques touche toutes les régions du pays, ce qui rend difficile la tâche des chercheurs.

Les processus de la salinisation sont récapitulés dans le schéma suivant montrant les mécanismes de salinisation des eaux de la région du lac Fetzara.

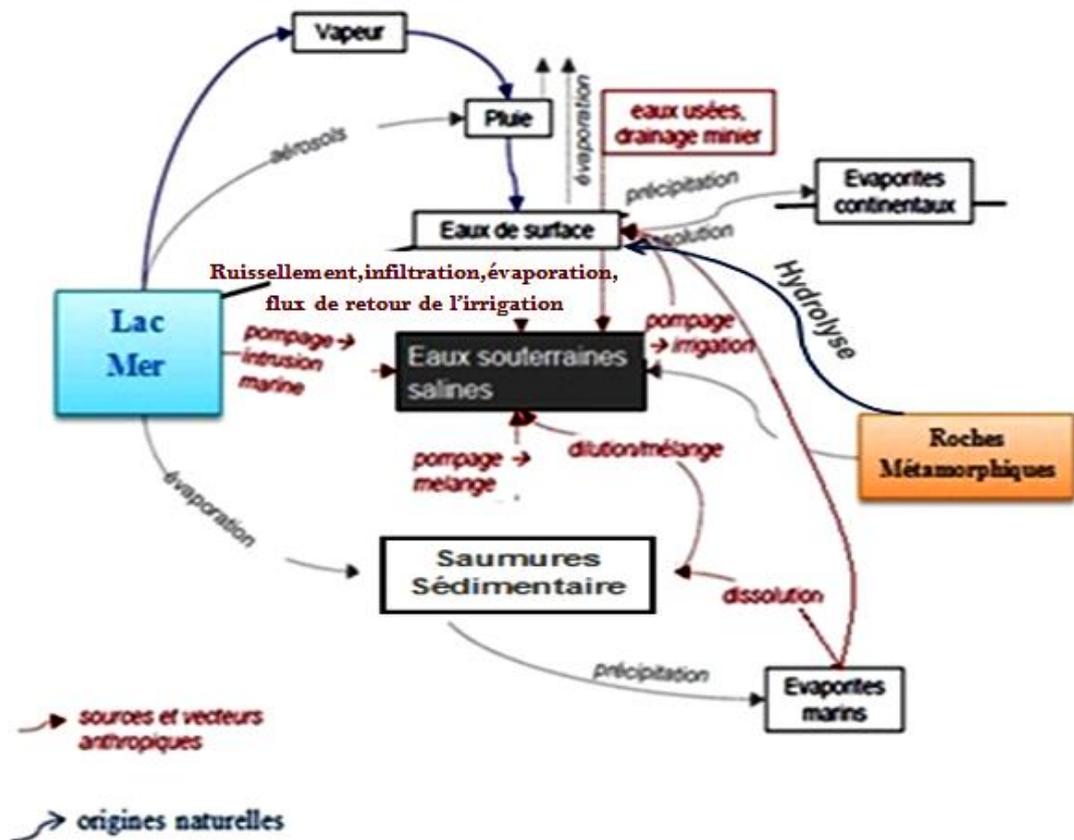


Figure 41: Mécanismes naturels et anthropiques régissant la salinité des eaux du lac Fetzara (in BRGM, 2010 modifiée)

Le précédent schéma montre que la salinité peut avoir soit une origine anthropique, soit une origine naturelle. Parmi les origines anthropiques, nous pouvons noter le retour des eaux d'irrigation, les rejets qu'ils soient industriels ou urbains. La surexploitation particulièrement au niveau des puits situés aux alentours du lac et à proximité de la mer, pouvant entraîner un déséquilibre de l'interface eau douce eau salée, entraînant un accroissement de la salinité des eaux. L'origine naturelle est générée par le contact eau roche. Dans ce cas, la salinité se fera soit par le biais des facteurs climatiques (évaporation, infiltration, érosion). Ces facteurs agissent directement (échange de base) ou indirectement (hydrolyse).

Nous allons nous intéresser aux différents facteurs régissant cette salinité. Nous nous intéresserons successivement aux eaux superficielles et eaux profondes, ce qui nous permettra de déterminer l'impact des eaux superficielles sur les eaux profondes.

V-1- Introduction :

Le lac Fetzara est alimenté par des eaux issues de différentes zones, ce qui engendre des variations dans la qualité des eaux.

Dans sa partie Ouest le lac est alimenté par les eaux issues du ruissellement des précipitations tombées sur le massif de l'Edough, cette alimentation se fait de deux manières :

- soit directement, par percolation des eaux sur le massif,
- soit indirectement par le biais de l'Oued Zied.

Les Oueds Mellah et El Hout constituent les autres sources d'alimentation du lac.

Par ailleurs en période pluvieuse le lac est également alimenté par les eaux de pluies.

Cette diversité des alimentations du lac, conduit à une diversité de la qualité des eaux. Notre travail sera scindé en deux grandes parties, la première portera sur les eaux superficielles (Lac et Oueds), la seconde portera sur les eaux souterraines (puits gros diamètres).

V-2- Qualité des eaux superficielles

V-2-1- Diagramme de Piper

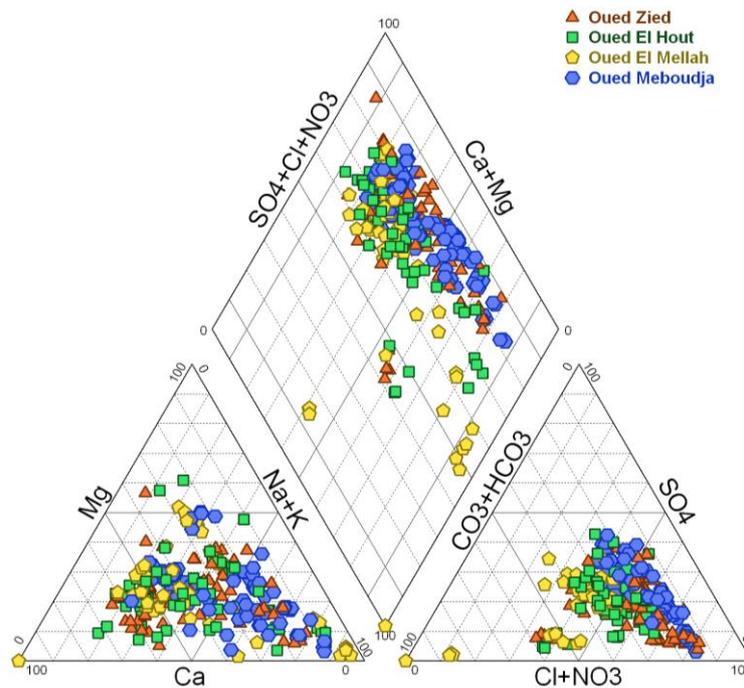


Figure 42 : Diagramme de Piper eaux superficielles.

L'observation du diagramme de piper montre que les eaux se répartissent autour de deux principaux pôles: le pôle chloruré sulfatée calcique et magnésien et le pôle chloruré sodique

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

potassique ou sulfaté sodique. Notons que le pole carbonaté sodique et potassique est très peu représenté seulement quelques échantillons (10 échantillons). Cette première représentation montre une hétérogénéité de la composition chimique des eaux, pour mieux expliquer les origines de cette composition chimique, nous avons réalisé plusieurs scénarios, à partir de l'analyse en composantes principales. Ces dernières portent sur les eaux superficielles et sur les eaux profondes. Par ailleurs, nous avons réalisé une ACP, pour chaque Oued, ce qui nous permettra de mettre en évidence les différentes compositions des eaux et aussi d'expliquer leurs origines. Pour l'interprétation, de l'ACP, nous nous contenterons de l'analyse de la matrice de corrélation et du cercle ACP, ces deux paramètres suffisent à mettre en évidence les différences dans les liens entre les éléments chimiques. Nous avons utilisé les mêmes analyses que celles utilisées pour l'élaboration du diagramme de Piper.

V-2-2- Apports de l'analyse en composantes principales :

L'analyse réalisée porte sur 306 échantillons et 8 variables. L'inertie totale obtenue est de 68.60%, fournissant ainsi un maximum d'informations.

- **Observation de la matrice de corrélation :**

L'observation du tableau indique des coefficients de corrélations positifs et d'autres négatifs, mettant en évidence des corrélations inverses.

-le nombre d'échantillons utilisé dans la matrice étant de 306, le coefficient de corrélation à prendre en considération est $r = 0.22$

Tableau 19 : Matrice de corrélation eaux superficielles.

	Ce	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4
Ce	1							
Ca	0.32	1						
Mg	0.45	0.50	1					
Na	0.68	0.40	0.60	1				
K	-0.01	-0.22	-0.25	-0.07	1			
HCO3	0.49	0.31	0.60	0.62	0.05	1		
Cl	0.71	0.41	0.71	0.84	-0.05	0.60	1	
SO4	0.50	0.54	0.52	0.53	0.17	0.44	0.45	1

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

La valeur du coefficient de corrélation, nous permet de dégager les associations suivantes, récapitulées dans le tableau suivant.

Tableau 19' : Récapitulation des corrélations

Eléments corrélés	Valeur de r	Eléments corrélés	Valeur de r	Eléments corrélés	Valeur de r
Ce-Ca	0.32	Ca-K	-0.22	Na-HCO ₃	0.62
Ce-Mg	0.45	Ca-HCO ₃	0.31	Na-Cl	0.84
Ce-Na	0.68	Ca-Cl	0.41	Na-SO ₄	0.53
Ce-HCO ₃	0.49	Ca-SO ₄	0.54	HCO ₃ -Cl	0.60
Ce-Cl	0.71	Mg-Na	0.66	HCO ₃ -SO ₄	0.44
Ce-SO ₄	0.50	Mg-K	-0.25	Cl-SO ₄	0.45
Ca-Mg	0.50	Mg-HCO ₃	0.60		
Ca-Na	0.40	Mg-Cl	0.71		

Dans leurs majorités les coefficients sont positifs, ce qui indique un lien direct entre les éléments. Cependant, on note deux coefficients négatifs mettant en évidence une opposition entre les éléments considérés.

- **Observation du cercle ACP :**

Le cercle ACP (fig. 43), formé par les axes F1F2 (68.7%), montre selon l'axe F1 (53.64%) horizontal, une opposition entre les eaux fortement minéralisées, constituant la partie négative de l'axe et les eaux faiblement minéralisées riches en potassium, occupant la partie négative de l'axe.

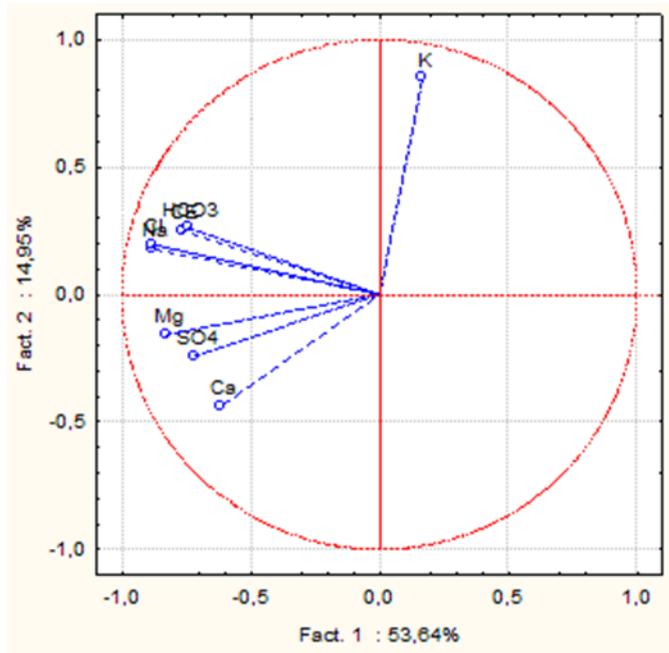


Figure 43 : Cercle ACP, eaux superficielles.

Selon l'axe F2 (14.95%), on remarque une compétition entre les eaux sulfatées et les eaux bicarbonatées ou chlorurées. Notons que ces dernières sont riches en potassium. Cette compétition montre que les eaux s'écoulant vers le lac proviennent de divers horizons. En effet, les eaux occupant la partie positive de l'axe sont issues de la zone Ouest (Massif de l'Edough et Kheraza). Les eaux arrivant au lac traversent les formations métamorphiques et les sables. L'interaction eau-roche provoque une dissolution entraînant un enrichissement en chlorures, bicarbonates et potassium (in Majour, 2010), par contre les eaux occupant la partie négative proviendraient des eaux charriées par l'Oued El Hout, drainant la plaine de Cheurfa, elle-même alimentée par les monts d'Ain Berda, dont les eaux sont riches en sulfates (in Djabri, 2007).

V-3- Caractéristiques des eaux à l'entrée et à la sortie du lac :

Dans la partie précédente, nous avons remarqué une variation de la composition chimique des eaux, d'où notre interrogation sur l'impact de la géologie sur la qualité des eaux. Pour lever cette ambiguïté, nous avons réalisé quatre (04) ACP, chacune d'entre elles se rapporte à un Oued, les trois premières (Oued El Hout, Oued Mellah et Oued Zied) caractérisent les entrées par contre la quatrième (Oued Meboudja) concerne les sorties.

V-3-1- Caractéristiques des eaux entrant dans le lac :

- **ACP des eaux de l'Oued Mellah :**

Le traitement réalisé porte sur une matrice de 63 échantillons et 8 variables.

- **Matrice de corrélation :** l'observation du tableau suivant, montre deux types de corrélations :

-la première directe, $r > 0$, donc directe,

-la seconde indirecte $r < 0$, donc inverse.

Tableau 20 : Matrice de corrélation Oued Mellah

	Ce	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4
Ce	1							
Ca	0.27	1						
Mg	0.13	0.09	1					
Na	0.41	0.17	0.61	1				
K	0.36	0.35	-0.10	-0.05	1			
HCO3	0.49	0.21	0.55	0.59	0.25	1		
Cl	0.31	0.34	0.81	0.82	0.10	0.69	1	
SO4	0.55	0.47	0.29	0.57	0.10	0.43	0.47	1

Pour le nombre d'échantillons utilisés le coefficient de corrélation sera $r = 0.46$, ce qui nous permet de dégager les associations suivantes :

Tableau 21 : récapitulation des corrélations

Eléments corrélés	Valeur de r	Eléments corrélés	Valeur de r	Eléments corrélés	Valeur de r
Ce-HCO3	0.49	Mg-HCO3	0.55	Na-SO4	0.57
Ce-SO4	0.55	Mg-Cl	0.81	HCO3-Cl	0.69
Ca-SO4	0.47	Na-HCO3	0.59	Cl-SO4	0.47
Mg-Na	0.61	Na-Cl	0.82		

Nous remarquons que les corrélations inverses sont insuffisantes.

- **Cercle ACP :**

L'observation du cercle ACP formé par les axes F1F2 (56.82%) de l'information, montre selon l'axe F1 (36.83 %) horizontal, une opposition entre les eaux fortement minéralisées (partie négative de l'axe) et les faiblement minéralisées occupant la partie positive de l'axe. Selon l'axe F2 (20%) vertical, on note une compétition entre les eaux bicarbonatées sodiques ou magnésiennes et les eaux chlorurées calciques, riches en potassium. Les sulfates occupent presque le centre et par conséquent n'interviennent pas dans la compétition.

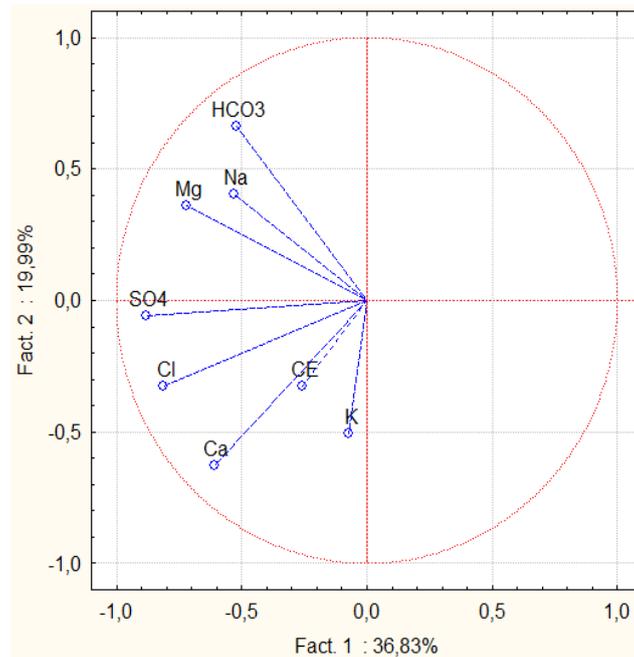


Figure 44 : cercle ACP, Oued Mellah.

- **ACP des eaux de l'Oued El Hout :**

Le traitement réalisé porte sur 67 échantillons et 8 variables.

- **Matrice de corrélation :**

L'observation du tableau suivant, montre deux types de corrélations :

- la première directe $r > 0$, donc directe,
- la seconde indirecte $r < 0$, donc inverse.

Tableau 22 : Matrice de corrélation Oued EL Hout

	Ce	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4
Ce	1							
Ca	0.27	1						
Ma	0.13	0.09	1					
Na	0.41	0.17	0.61	1				
K	0.36	0.35	-0.10	-0.05	1			
HCO3	0.49	0.21	0.55	0.59	0.25	1		
Cl	0.31	0.34	0.81	0.82	0.10	0.69	1	
SO4	0.55	0.47	0.29	0.57	0.10	0.43	0.47	1

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Pour le nombre d'échantillons utilisés le coefficient de corrélation sera $r = 0.44$, ce qui nous permet de dégager les associations suivantes :

Tableau 22' : Récapitulation des corrélations

Eléments corrélés	Valeur de r	Eléments corrélés	Valeur de r	Eléments corrélés	Valeur de r
Ce-HCO3	0.49	Mg-HCO3	0.55	Na-SO4	0.57
Ce-SO4	0.55	Mg-Cl	0.81	HCO3-Cl	0.69
Ca-SO4	0.47	Na-HCO3	0.59	Cl-SO4	0.47
Mg-Na	0.61	Na-Cl-	0.82		

Nous remarquons que les corrélations inverses sont insuffisantes

- **Cercle ACP :**

L'observation du cercle ACP formé par les axes F1F2 (67.75%) de l'information, montre selon l'axe F1 (48.07 %) horizontal, une opposition entre les eaux fortement minéralisées (partie négative de l'axe) et les faiblement minéralisées occupant la partie positive de l'axe. Selon l'axe F2 (20%) vertical, on note une compétition entre les eaux chlorurées sodiques ou magnésiennes et les eaux sulfatées calciques, riches en potassium. Les bicarbonates occupent presque le centre et par conséquent n'interviennent pas dans la compétition.

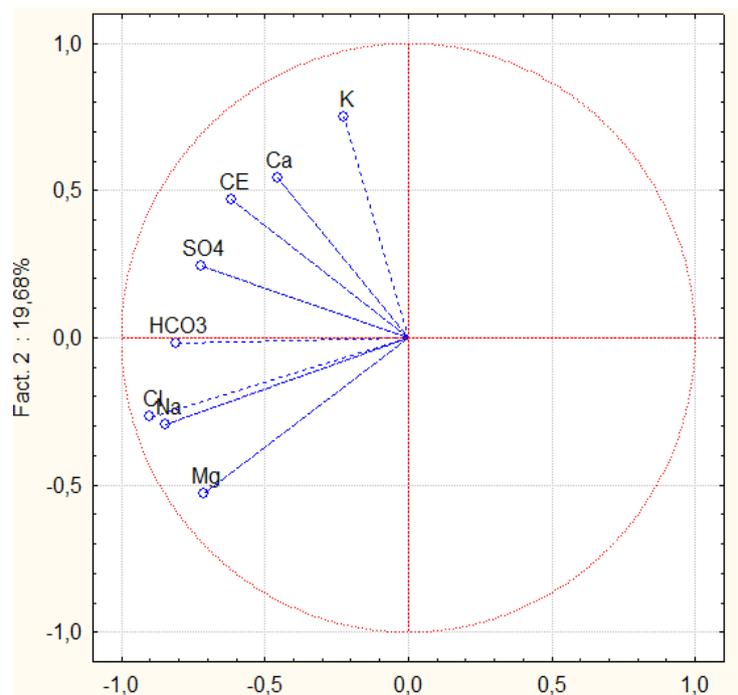


Figure 45: Cercle ACP, Oued El Hout

- **ACP des eaux de l'Oued Zied:**

Le traitement réalisé, porte sur 67 échantillons et 8 variables.

- **Matrice de corrélation :**

L'observation du tableau suivant, montre deux types de corrélations :

-la première directe, $r > 0$, donc directe,

-la seconde indirecte $r < 0$, donc inverse.

Tableau 23 : Matrice de corrélation Oued Zied

	Ce	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	Cl	SO ₄
Ce	1							
Ca	0.40	1						
Mg	0.50	0.56	1					
Na	0.81	0.53	0.61	1				
K	0.10	0.19	-0.11	0.21	1			
HCO ₃	0.57	0.41	0.60	0.74	0.06	1		
Cl	0.79	0.62	0.79	0.94	0.11	0.75	1	
SO ₄	0.32	-0.09	0.06	0.39	0.15	0.09	0.27	1

Pour le nombre d'échantillons utilisé, le coefficient de corrélation sera $r = 0.44$, ce qui nous permet de dégager les associations suivantes :

Tableau 23' : Récapitulations des corrélations

Eléments corrélés	Valeur de r	Eléments corrélés	Valeur de r	Eléments corrélés	Valeur de r
Ce-Mg	0.50	Ca- Na	0.53	Mg-HCO ₃	0.79
Ce-HCO₃	0.57	Ca-Cl	0.79	Na-HCO ₃	0.74
Ce-Cl	0.79	Mg-Na	0.61	Na-Cl	0.94
Ca-Mg	0.56	Mg-HCO ₃	0.60	HCO ₃ -Cl	0.75

Nous remarquons que les corrélations inverses sont insuffisantes

- **Cercle ACP :**

L'observation du cercle ACP formé par les axes F1F2 (70.39%) de l'information totale, montre selon l'axe F1 (54.60 %) horizontal, une opposition entre les eaux fortement minéralisées (partie négative de l'axe) et les faiblement minéralisées occupant la partie positive de l'axe. Selon l'axe F2 (15.79%) vertical, on note une compétition entre les eaux

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

sulfatées sodiques riches en potassium et les eaux bicarbonatées calciques ou magnésiennes. Les chlorures occupent presque le centre et par conséquent n'interviennent pas dans la compétition.

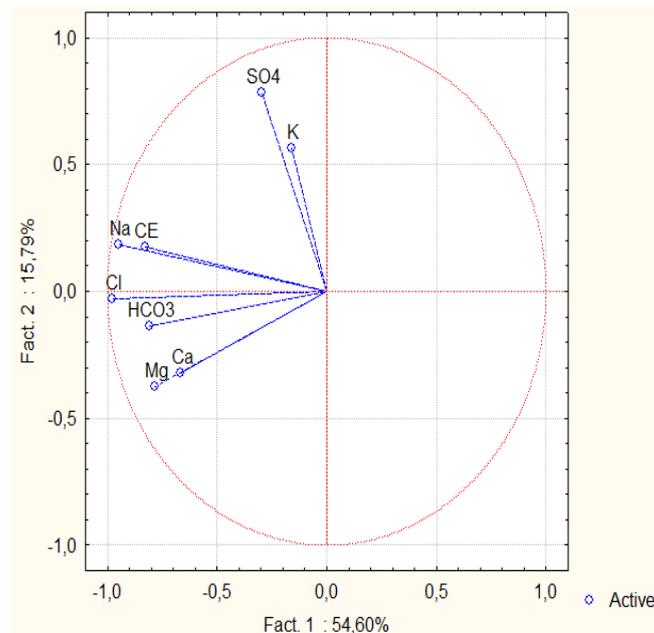


Figure 46 : Cercle ACP, Oued Zied

Nous remarquons que les eaux alimentant le lac, présentent des différences significatives, ces dernières dépendent de la nature des terrains traversés. En effet, les eaux alimentant le lac traversent tantôt les formations métamorphiques de l'Edough, tantôt les formations sédimentaires, leurs conférant des compositions chimiques différentes. Une partie de ces eaux va séjourner dans le lac, avant sa sortie par le biais de l'Oued Meboudja.

V-3-2- Qualité des eaux à leur sortie du lac: comme pour l'entrée des eaux au lac, pour leur sortie nous avons réalisé une ACP, ce qui nous a permis de faire une comparaison de la composition chimique des eaux.

- **ACP des eaux de l'Oued Meboudja :**

Le traitement réalisé, porte sur 109 échantillons et 8 variables.

- **Matrice de corrélation :**

L'observation du tableau suivant, montre deux types de corrélations :

- la première directe, $r > 0$, donc directe,
- la seconde indirecte $r < 0$, donc inverse.

Tableau 24 : Matrice de corrélation Oued Meboudja

	Ce	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4
Ce	1							
Ca	0.11	1						
Mg	0.43	0.63	1					
Na	0.66	0.32	0.70	1				
K	-0.14	-0.04	-0.16	-0.08	1			
HCO3	0.60	0.41	0.75	0.88	-0.08	1		
Cl	0.62	0.24	0.72	0.88	-0.07	0.87	1	
SO4	0.17	0.57	0.46	0.39	0.03	0.42	0.20	1

Pour le nombre d'échantillons utilisés (109), le coefficient de corrélation sera $r = 0.36$ ce qui nous permet de dégager les associations suivantes :

Eléments corrélés	Valeur de r						
Ce-Mg	0.43	Ca-Mg	0.63	Mg-HCO3	0.75	Na-Cl	0.88
Ce-Na	0.66	Ca-HCO3	0.41	Mg-Cl	0.72	Na-SO4	0.9
Ce-HCO3	0.60	Ca-SO4	0.57	Mg-SO4	0.46	HCO3-Cl	0.87
Ce-Cl	0.62	Mg-Na	0.70	Na-HCO3	0.88	HCO3-SO4	0.42

Nous remarquons que les corrélations inverses sont insuffisantes.

- **Cercle ACP :**

L'observation du cercle ACP formé par les axes F1F2 (71.28%) de l'information totale, montre selon l'axe F1 (54.26 %) horizontal, une opposition entre les eaux fortement minéralisées (partie négative de l'axe) et les faiblement minéralisées, riches en potassium, occupant la partie positive de l'axe. Selon l'axe F2 (17.02%) vertical, on note une compétition entre les eaux chlorurées et bicarbonatées sodiques aux eaux sulfatées calciques à magnésiennes riches en potassium.

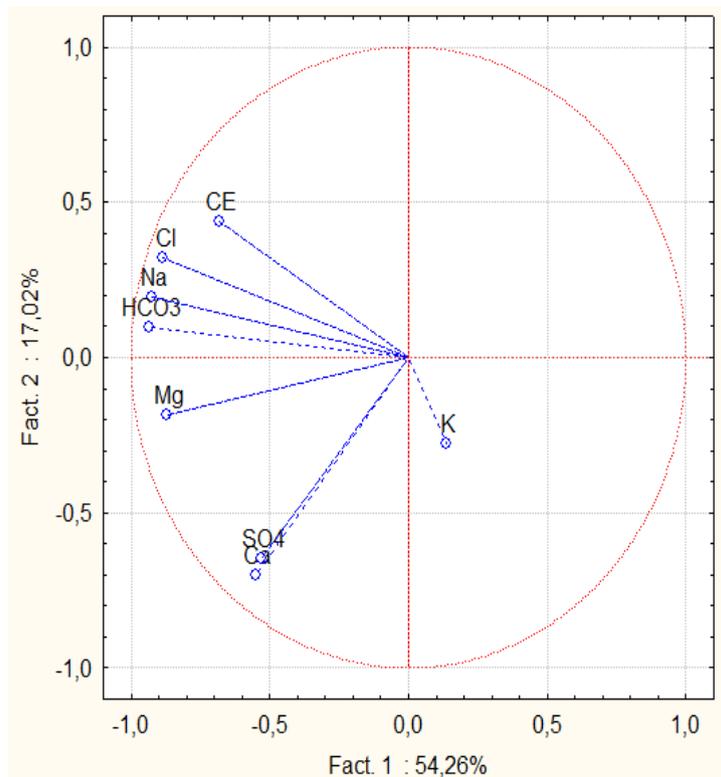


Figure 47 : Cercle ACP, Oued Meboudja.

A la sortie des eaux du lac (Oued Meboudja), nous remarquons une variation des liens entre les éléments chimiques, les eaux sont chlorurées sodiques, ce qui indique une interaction entre les eaux et la matrice du lac, conduisant au faciès observé. Pour expliquer les origines des éléments chimiques, nous avons utilisé la méthode des rapports :

V-4- Méthode des rapports :

- Le couple Na^+ - Cl^- :

Ces deux éléments chimiques dans les eaux naturelles sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl). L'évolution de Na^+ est étudiée en fonction des teneurs en chlorure, car ce dernier est considéré comme un traceur stable et son déplacement n'est pas retardé dans l'écoulement de l'eau.

- **Les eaux du Lac Fetzara**

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Le graphe (fig. 48) montre une tendance des points à l'alignement. Cependant, le pôle sodique ne semble pas dominer. D'une manière générale, un lien plus prononcé semble exister entre

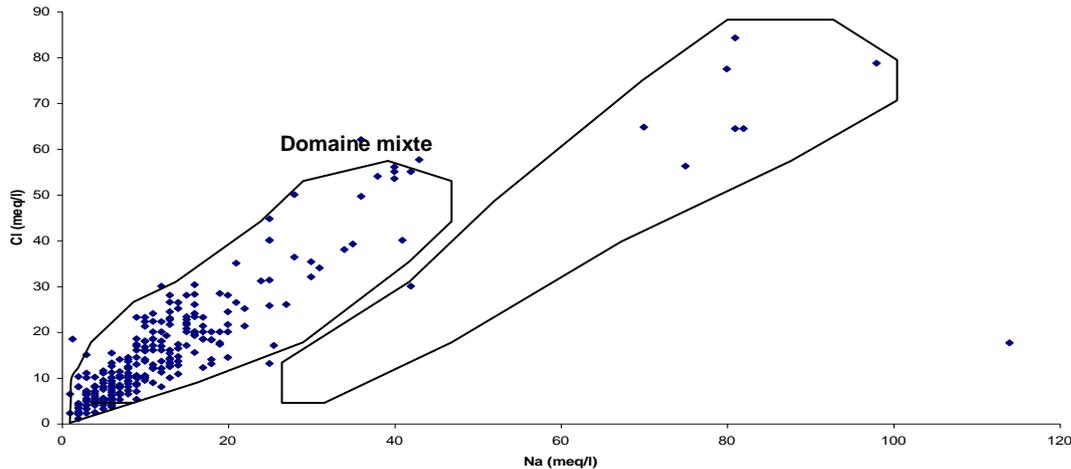


Figure 48 : Relation Cl et Na, eau du Lac Fetzara (Meq/l)

les deux éléments Na et Cl. Cette répartition serait engendrée par les facteurs régissant la qualité des eaux du lac tel que : le climat (évaporation), la matrice argileuse...

La projection des points sur le diagramme $\text{Ca}^{2+}/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}) - \text{Na}^+/\text{Cl}^-$ (fig. 49) indique qu'une partie des échantillons reste à l'état d'équilibre, les autres échantillons mettent en évidence un échange de base ou un excès de calcium.

Ce premier aperçu montre que le chimisme des eaux des deux zones considérées n'est pas régi par les mêmes facteurs. L'échange de base est plus important au niveau de la plaine de

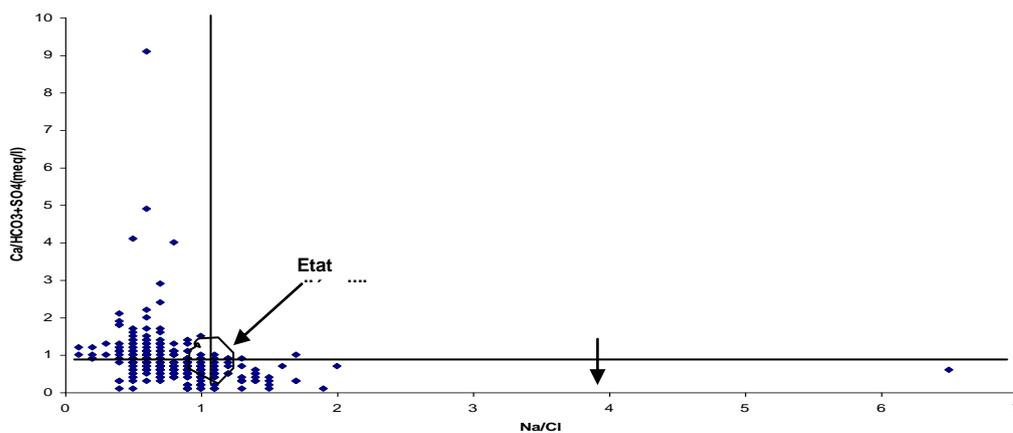


Figure 49: Echange de base, eau du Lac Fetzara (meq/l)

Annaba; par contre, les facteurs climatiques (démontré par les isotopes) et la matrice argileuse influencent la qualité des eaux du lac Fetzara.

- **Les éléments Ca^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-} :**

On examine ici l'origine du calcium en fonction des bicarbonates et des sulfates. Ces deux éléments chimiques indiquent deux origines principales qui sont les carbonates et le gypse.

- **Pour la région du lac Fetzara :**

Le graphe réalisé (fig. 50) montre deux tendances identiques cependant, le pôle carbonaté est bien marqué, montrant un apport d'eau à partir du massif de l'Edough où affleurent les calcaires métamorphiques (cipolins).

La combinaison des trois éléments Ca^{2+} , SO_4^{2-} et HCO_3^- aboutit au graphe $\text{Ca}^{2+}/(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$. Les eaux de la région du lac Fetzara (fig. 50) montrent la même tendance, avec un

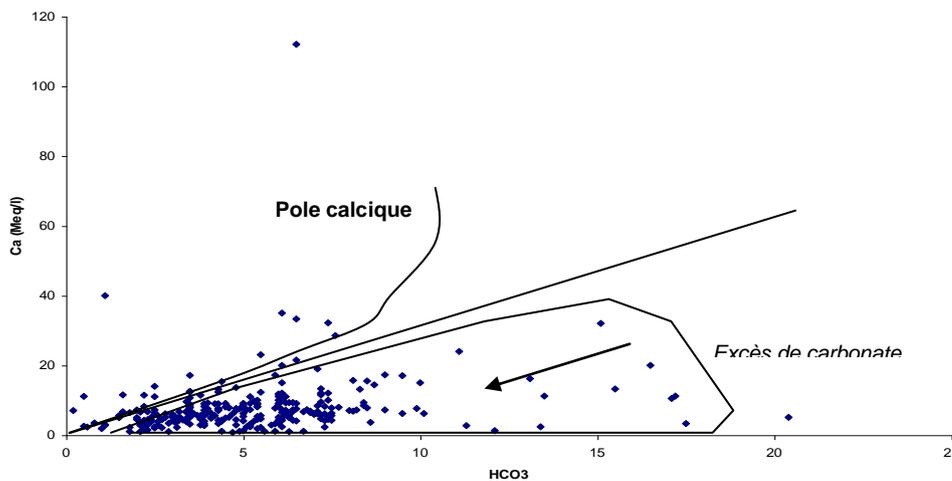


Figure 50 : Relation entre Ca et HCO₃, eau du Lac (meq/l)

pôle carbonaté bien marqué, montrant la dissolution des formations carbonatées (marbres) dans cette partie de la zone d'étude.

Ces représentations montrent que la dissolution des carbonates issus du massif de l'Edough est importante pour les eaux du lac Fetzara.

Cette première interprétation a montré que la salinité des eaux est liée à la dissolution des formations évaporitiques, des formations carbonatées et à l'échange de base particulièrement important.

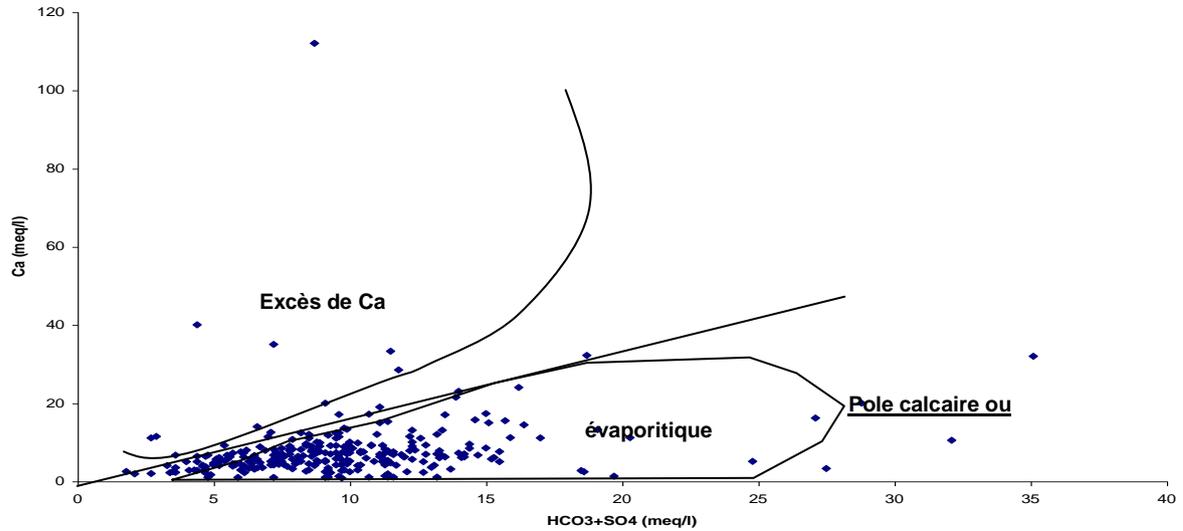


Figure 51 : Origine du Calcium au niveau de la nappe d'accompagnement du Lac

V-5- Aspects qualitatifs et quantitatifs des apports et des exhaures :

Les variations décrites au préalable, sont engendrées par la qualité des apports et des exhaures. Ainsi, avant leur arrivé au lac, les eaux subissent d'autres modifications, qui dépendent en premier de la nature des terrains traversés. Le schéma suivant montre le cheminement des eaux dans les Oueds. Nous notons que l'Oued Zied draine les eaux du massif de l'Edough, constitué de formations métamorphiques par contre les autres cours d'eau traversent également des formations sédimentaires, ce qui entraîne des variations de la composition chimique des eaux. Pour avoir une idée précise sur les variations de la qualité des eaux. Nous avons calculés les flux transitant par chaque Oued.

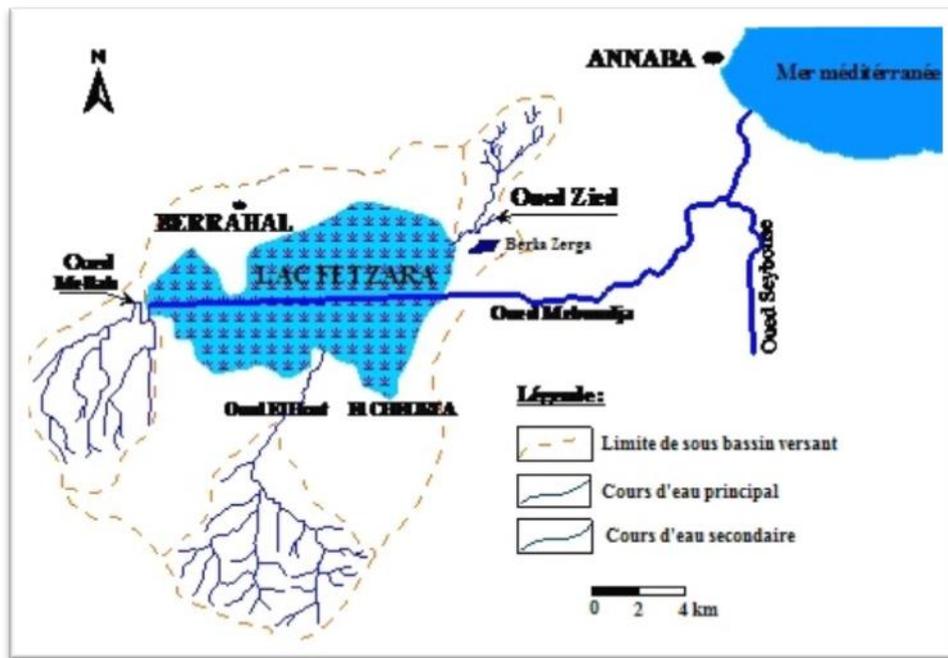


Figure 52: Carte des oueds à l'entrée et à la sortie du lac Fetzara

V-5-1- Flux transitant par les Oueds:

Pour réaliser ce travail, nous avons sélectionné au niveau de chaque Oued, cinq points de mesure, ainsi un point a été rattaché à la partie amont, un autre caractérise la partie aval et les trois autres sont situés entre les deux précités. Pour estimer les flux transitant par les Oueds nous avons utilisé la méthode suivant :

V-5-2- Méthode de calcul des flux transitant par le Lac Fetzara :

Chaque épisode pluvieux a fait l'objet d'une analyse chimique et une moyenne des concentrations a été calculée en les rapportant à la surface du sous bassin versant du lac. Les quantités des éléments apportés par les précipitations sont calculées par la formule suivante:

$$T = Q * C$$

Avec :

T = Quantité de l'élément en kg/an,

Q = Volume d'eau en m³/an,

C = Concentration moyenne de l'élément en kg/m³

Les résultats obtenus sont condensés dans le tableau 25. On remarque que les flux sont faibles et par conséquent les eaux de pluies participent faiblement au chimisme de l'eau du lac.

V-5-3- Masses transitant par les Oueds :

Les concentrations obtenues à partir des analyses chimiques réalisées au mois d'avril 2004 ont été couplées aux débits mesurés au cours du même mois, ce qui a permis le calcul des flux pour chaque cours d'eau et pour chaque point déterminé, les résultats obtenus sont conditionnés dans le tableau 25. Les flux des oueds sont calculés d'après la formule suivante :

$$F \text{ (T/an)} = Q \text{ (L/An)} * C \text{ (T/L)}$$

Tableau 25 : Flux calculés (T/L).

Flux (T/An)	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	(Na+K)	CL ⁻	So ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻
O. Mellah	869,4	793,8	17123,4	4830,8	50,6	9593,6	7,94
	1078,9	1191	20498,6	64344	40,6	12635,8	3,45
	1351,4	1261,3	24099,1	5918,9	13,5	12639,6	4,054
	3009,8	2282,8	21531,8	6908,7	73,62	9043,4	6,02
	5550,6	3993	47635,8	11763,9	1837,5	17032,9	120,9
O. Zied	1655,64	662,25	15406,6	5224,5	13447,5	6990,5	12,42
	1641,46	747,77	16110,7	7556,8	3123,6	14833,9	21,8
	1702,890	1696,5	20434,7	8026,1	2641,1	14503,5	3,2
	2728,9	459,6	22903,3	9384,1	4016,7	9439,8	135,05
	2740,8	2740,8	24702,9	8108,5	3657,7	20239,32	139,5
O. El Hout	1365,53	1783,2	13173,3	6305,5	109,8	2580,6	11,2
	4620,4	875,5	45900,2	16189,7	340,5	18396,6	8,19
	3504,4	1252,2	30515,6	11881,4	132,3	6004,7	9,450
	1036,04	1081,1	36981,9	13914,4	1045,04	12256,7	7,2
	1991,4	1184,6	27571	10726,3	769,1	71725,8	136,65
O. Meboudja	14394,2	7451,13	232848	80156,2	13095,9	70955,2	454,4
	24070,7	20219,41	191149,8	80566,2	12913,2	70144,9	101,94
	15160,3	15321,6	274821	82446,3	17805,3	83639,81	235,47
	6745,1	10205,6	272736,5	73932,1	42464,8	95076,5	741,96
	28573,6	25898,6	257162,9	86693,8	19697,6	92894,76	373,9

Les valeurs calculées, nous permettent d'établir le bilan en matière de flux (entrées et sorties) au niveau du lac.

Bilan entrée-sortie du lac Fetzara :

Nous intéresserons à la dynamique du lac à partir des flux échangés. Les différentes données recueillies sur les trois Oueds (Entrées) ont permis le calcul des différents apports en Cl⁻, SO₄⁻, HCO₃⁻, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Na⁺ et K⁺ qu'on a pu quantifiés (tableau 26). Le bilan établi est comparé aux flux de la sortie sur les 3 éléments les plus importants (Cl, Na+ K, HCO₃).

Tableau 26 : Flux calculés aux entrées et la sortie du lac pour les éléments dominants (T/An).

Flux (T/An)	(Na+K)	%	CL ⁻	%	HCO ₃ ⁻	%	Σ % des apports
O. Mellah	47635,8	20.4	11763,9	14.6	17032,9	24	59
O. Zied	24702,9	10.6	8108,5	10.1	20239,32	28.5	49.2
O. El Hout	27571	12	10726,3	13.4	7172,58	10.1	35.5
O. Meboudja	232848		80156,2		70955,2		

L'observation a été faite au niveau des points de mesure suivants : pour les Oueds Mellah, Zied et El Hout, nous avons pris le dernier point avant l'arrivée des eaux au lac, par contre pour la sortie nous avons utilisé les valeurs se rapportant au premier point après le lac. On remarque que, les points de mesures se différencient non seulement par leur flux d'exportation, mais également par la fréquence des concentrations. Au niveau de l'Oued Mellah, les éléments considérés avec 59 % sont à l'origine de la minéralisation observée. Par contre, au niveau des autres Oueds Zied et El Hout, la minéralisation peut être liée aux autres éléments Ca²⁺, Mg⁺² ou SO₄²⁻, provenant des échanges eau roche.

L'origine de l'excédent des éléments chimiques dans le bilan entrées-sorties des flux est expliquée par la nature du sol, le degré de la fermeture de la vanne de sortie (la mauvaise étanchéité de la vanne entraîne par moments un assèchement du lac).

Les écoulements se produisant en sub-surface entraînent une altération et par conséquent la mise en solution des minéraux. L'Oued Zied est situé au pied du mont de l'Edough de ce fait une partie des eaux arrivant au lac proviendrait de ce massif métamorphique particulièrement riche en silicates, ces derniers conduisent en premier lieu à enrichir l'eau en cations et en silice. Cette réaction consomme de l'acide et s'accompagne donc d'une augmentation du pH avec production de bicarbonates.

V-6- Relation Lac Fetzara- massif de l'Edough :

Le fait que le lac, se situe en contre bas du massif de l'Edough, fait que ce dernier alimente le lac à partir des eaux de ruissellement. Par ailleurs, l'étude climatique réalisée par nos soins, montre que la période humide s'étale sur presque huit mois (du mois d'octobre au mois de mai), de ce fait le contact eau-roche, est quasi permanent au cours de cette période, ce qui aura pour effet d'accélérer la dilution et l'enrichissement des eaux par certains éléments chimiques. En nous référant aux travaux réalisés par Majour H (1996 et 2010), Zenati N (1990 et 2009) et Habes S (2006), nous avons remarqué que les eaux issues du massif de l'Edough, sont riches en potassium, ce qui laisse supposer que cet élément provient du massif, sa présence dans l'eau est engendrée par l'hydrolyse qui se produit lors du contact eau roche. Il est admis d'après Appelo et Postma, que l'altération et la mise en solution des silicates conduisent en premier lieu à enrichir l'eau en cations et en silice. Cette réaction consomme de l'acide et s'accompagne donc d'une augmentation du pH avec production de bicarbonates.

Mécanismes de l'altération de différents minéraux silicatés en kaolinite d'après APPELO et POSTMA :



Albite

Kaolinite



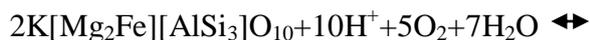
K-feldspath



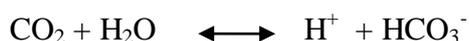
Anorthite



Pyroxène



Biotite



Cette dissolution modifie donc le rapport de concentration des éléments en solution vis-à-vis du minéral considéré des rapports constants en solution. Il y a libération de Na, K, Ca, Mg

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Les proportions des alcalino-terreux: (Ca^{++} , Mg^{++}), riches dans les sols, diminuent dans les eaux.

Pour les alcalins: le Na^+ , abondant dans les roches et dans les eaux du lac, est minoritaire dans les sols, le K^+ abondant dans les roches, apparaît dans les autres ensembles (sol-eau-sédiment).

Ces réactions se produisent lors des précipitations, par ailleurs la discontinuité des pluies conduit à une forte évapotranspiration, cette dernière atteint parfois plus de 2000 mm/an. Ce qui entraîne un accroissement de la minéralisation des eaux

V-7- Les facteurs climatiques :

Les variations des facteurs climatiques constituent également une source de la variation de la minéralisation. En Effet, au cours de la saison pluvieuse les concentrations baissent à cause de la dilution que se produit par contre au cours de la saison sèche, l'évapotranspiration est importante, entraînant un accroissement des concentrations. Pour corroborer cette hypothèse, nous avons réalisé une simulation en utilisant le modèle PHREEQ, les résultats obtenus nous permettent de comparer les variations saisonnières des indices de saturation.

V-7-1- Mise en évidence de l'inter action Eau-Roche par la Thermodynamique :

A- Principes de la thermodynamique :

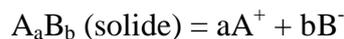
A-1- Relation activité-concentration :

Les énergies d'interaction entre deux molécules A et B en solution idéale sont identiques à celles entre deux molécules A ou B : il en est ainsi d'une solution aqueuse diluée à l'infini.

Les activités ioniques a_i d'une solution idéale seront égales à la concentration $[C_i]$, d'où :

$$a_i = [C_i]$$

Pour un solide AB, qui en solution, donne des ions A^+ et B^- , nous pouvons écrire :



Et en utilisant la loi d'action de masse, nous pouvons définir K comme :

$$K = [\text{A}^+]^a * [\text{B}^-]^b / \text{A}_a\text{B}_b (\text{solide})$$

L'activité d'un solide étant unitaire, K correspond à une constante, le produit de solubilité

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

désigné par K_{sp} :

$$K_{sp} = [A^+]^a [B^-]^b$$

Dans le cas d'une solution idéale, l'indice de saturation IS en ions A^+ et B^- , par dissolution de $A_a B_b$ sera :

$$IS = -\log(PAI/K_{sp, AB})$$

où $PAI = [A^+]^a [B^-]^b$ correspond au produit d'activité ionique en solution.

IS sera nul, positif ou négatif respectivement pour une solution en équilibre, sursaturée et sous-saturée.

En solution réelle, solution aqueuse d'espèces ioniques, il existe des interactions électrostatiques entre les ions. Comme les ions sont entourés par des régions où les molécules d'eau sont arrangées selon une structure différente de celle de l'eau pure (Drever, 1988), l'écart à l'idéalité est quantifié par l'introduction d'un coefficient d'activité γ_i dans l'équation (1), d'où :

$$a_i = \gamma_i [C_i]$$

La détermination du coefficient d'activité sera basée sur la théorie de Debye-Hückel où les interactions électrostatiques entre les ions distribués selon la théorie de Boltzmann. Cette théorie comporte deux équations où l'activité a_i est reliée à la force ionique I (en mole/l) de la solution avec :

Pour $I < 10^{-2,3}$

$$\log \gamma_i = -A Z_i^2 \sqrt{I}$$

où A est une constante, fonction de la température T et de la pression P ;

Z_i = la charge de l'ion considéré i .

$$I = \frac{1}{2} \sum_i [C_i] Z_i^2$$

Pour $10^{-2,3} < I < 0,1$, cette formule est généralisable:

$$\log \gamma_i = -A Z_i^2 \sqrt{I} / (1 + B a_0 \sqrt{I})$$

où B est une constante, fonction de la température T et de la pression P ;

a_0 le rayon hydraté de l'ion considéré.

Il existe d'autres formules semi-empiriques dérivées de cette théorie pour déterminer γ_i , comme la formule de Davies (Davies, 1962), pour $I < 0,5$:

$$\log \gamma_i = -A Z_i^2 [\sqrt{I}/(I + Ba_0 \sqrt{I}) - bI] \quad (9)$$

où b est une constante.

Dans les eaux naturelles, les relations sont plus complexes car il existe l'effet des ions communs qui tend à réduire la solubilité des minéraux.

B- Application aux eaux de la zone d'étude :

Nous utilisant les formules précédentes à la température de 25°C, on peut déterminer les différents facteurs susceptibles d'influencer la composition chimique des eaux. Les calculs ont été effectués en utilisant le programme WateqB dérivé de " Water Equilibrium Formulation " (Plummer, 1984). Les résultats obtenus indiquent la présence de plusieurs éléments ioniques ayant pour origine les minéraux suivants : l'anhydrite, le gypse, la calcite et la dolomite.

Tableau 27 : Produit de solubilité des minéraux pris en compte (à la température de 25 ° C)

	K_{sp}	PAI	IS
Calcite $CaCO_3$	8.48 – 8.48	8.48 – 9.47	0.01 – 0.99
dolomite $(Ca,Mg)CO_3$	17.09 – 17.09	17 – 19.05	0.01 – 1.96
Anhydrite $CaSO_4$	4.36 – 4.36	5.34 – 7.22	0,89- 2,86
gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$	4.58 – 4.58	5.35 – 7.22	0.77 – 2.64

- Activité d'une espèce chimique (a_i):

Contrairement à la concentration (m_i) qui se définit à partir de la quantité de matière produite ou consommée lors d'une réaction chimique, donc la masse (mesurée à l'aide d'une balance) ; l'activité (a_i) se définit à partir de l'énergie de la réaction, donc de la chaleur de la réaction (changement de température) et du travail de la réaction (changement de température) et du travail de la réaction (changement de volume), elle est mesurée à l'aide du calorimètre, voltmètre, baromètre.

L'activité, appelée aussi concentration efficace ou concentration thermodynamique, correspond à la concentration d'un produit ou réactif d'une réaction chimique dans une solution idéale. Le concept d'activité tient compte de l'interaction entre les ions et de leurs

interactions à courte distance. L'activité sert donc à distinguer une solution réelle d'une solution idéale (in Zatout, 2012).

L'activité a_i du constituant i , est aussi la mesure de l'écart entre le comportement de ce constituant dans une solution réelle et dans un état de référence particulier appelé état standard (in Zatout, 2012). L'activité d'une substance pure, à une température spécifique et une pression de 1 atmosphère, est par convention égale à 1. A une pression et température données, la relation entre l'activité et la concentration est :

$$a_i = \gamma_i m_i$$

γ_i : représente le coefficient d'activité,

m_i : représente la molalité du constituant i

- **Force ionique :**

La force ionique mesure la concentration globale de la solution en composés ioniques. Elle est donnée par la formule suivante :

$$I = \frac{1}{2} \sum_i m_i Z_i^2$$

Ou :

m_i : molalité du soluté et Z_i : charge électrique de l'ion

L'eau de mer moyenne, par exemple, a une force ionique de 0,6.

C- Equilibre minéraux-solution :

- **La constante d'équilibre :**

Pour la réaction réversible, à température et pression constante, suivante :

$aA + bB \leftrightarrow cC + dD$ où ; a, b, c et d sont des coefficients stœchiométriques. La loi d'action de masse donne :

$$K = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b} \text{ équilibre}$$

Où, K est la constante thermodynamique, relative aux activités des minéraux et des espèces aqueuses en équilibre. Elle s'exprime aussi en fonction de l'énergie libre standard de la réaction, par la relation suivante :

$$-\log K_T = \frac{\Delta G_{RT}^0}{2.303 RT}$$

R est la constante des gaz parfaits ($R = 1.987 \text{ cal.mol}^{-1}$) T est la température en °K. dans un

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

système à plusieurs phases (précipitation, dissolution), la variation de l'enthalpie libre de la réaction est fonction du potentiel chimique de chaque composé, comme suit :

$$\mu_i^\alpha = \frac{\partial G}{(\partial n_i)_{n_j, P, T}}$$

μ_i^α ; étant le potentiel chimique de i dans la phase α , pression et température constantes.

n_i et n_j représentent le nombre de moles de i et de j.

∂G la variation de l'enthalpie libre du système considéré.

Pour la réaction considérée, le système est en équilibre si : $\Delta G_R^0 = 0$

Ceci implique :

$$c\mu_C^Y + d\mu_D^\delta - a\mu_A^\alpha - b\mu_B^\beta = \Delta G_R^0 = 0$$

A l'état de non équilibre, la constante d'équilibre, K, est remplacée par le produit d'activité ionique Q et on écrit dans cet état :

$$Q = \frac{[C]^c [D]^d}{[A]^a [B]^b}$$

La différence K-Q mesure l'état de saturation de la solution vis-à-vis d'un minéral :

Q = K : la solution est juste à saturation ($\Delta G_R^\circ = 0$)

Q < K : la solution est sous-saturée ($\Delta G_R^\circ < 0$)

Q > K : la solution est saturée ($\Delta G_R^\circ > 0$)

L'état de saturation est instable, il tend à évoluer vers l'état d'équilibre (précipitation).

Le domaine de validité de cette équation est pour des forces ioniques entre 0,001 et 0,01.

V-7-2- Application aux eaux superficielles de la zone d'étude :

Pour mettre en évidence le lien entre la composition chimique et l'eau, nous avons utilisé l'outil thermodynamique, le calcul de l'indice de saturation, nous permet de déterminer les minéraux influençant la composition chimique de l'eau. Ce travail a été réalisé en utilisant le logiciel PHREEQ. Le nombre d'échantillons utilisés est de 305, se répartissant comme suit : 109 pour l'Oued Meboudja, 62 pour l'Oued Mellah, 67 pour chacun des deux autres Oueds Zied et Hout. Le dépouillement des résultats obtenus, montre l'influence des minéraux suivants :

Tableau 28 : Influence des minéraux au niveau des Oueds (entrées et sorties)

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Oueds \ Minéraux	Calcite	Aragonite	Dolomite	Gypse	Anhydrite
Zied (état vis-à-vis)	Sous saturé				
Hout (état vis-à-vis)	Sous saturé				
Mellah (état vis-à-vis)	Sous saturé				
Meboudja (état vis-à-vis)	Sous saturé				

L'observation du précédent tableau, montre que les eaux des quatre Oueds restent sous saturé vis-à-vis des minéraux, ce qui laisse supposer une probable dilution et par conséquent un accroissement de la minéralisation. Pour confirmer nos dires, nous prenons les variations des indices de saturation calculés pour l'Oued Meboudja (109 échantillons).

V-7-2-1- Variations des indices de saturation Oued Meboudja :

La figure 53, montre que les indices de saturation obtenus ne dépassent pas zéro, ce qui indique une sous saturation, de l'eau vis-à-vis de ces minéraux. Ce qui laisse supposer un accroissement probable de la minéralisation.

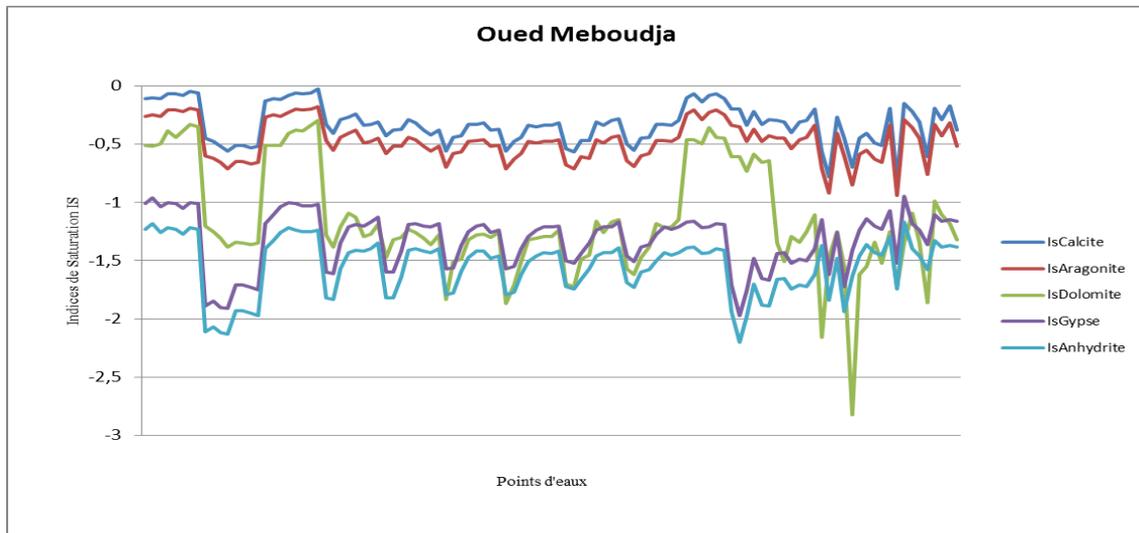


Figure 53: Variation des indices de saturation au niveau de la Meboudja

Le présent travail réalisé sur les eaux de surface au niveau de la région d'étude a montré que la qualité des eaux à l'entrée et à la sortie du lac diffère. Cette variation montre un lien étroit entre le lac et son environnement. Nous remarquons que la qualité des eaux alimentant le lac, reste influencé par la géologie et le climat. A la sortie du lac, la qualité des eaux est influencée par la matrice du lac, ce qui accroît la salinité des eaux par échanges de bases.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Notons que la mer par le biais des embruns marins reste une source possible de la salinité observée.

V-8- L'influence Marine :

Nous étudions la répartition de certains éléments par rapport à la droite des chlorures eau des précipitations eau de mer.

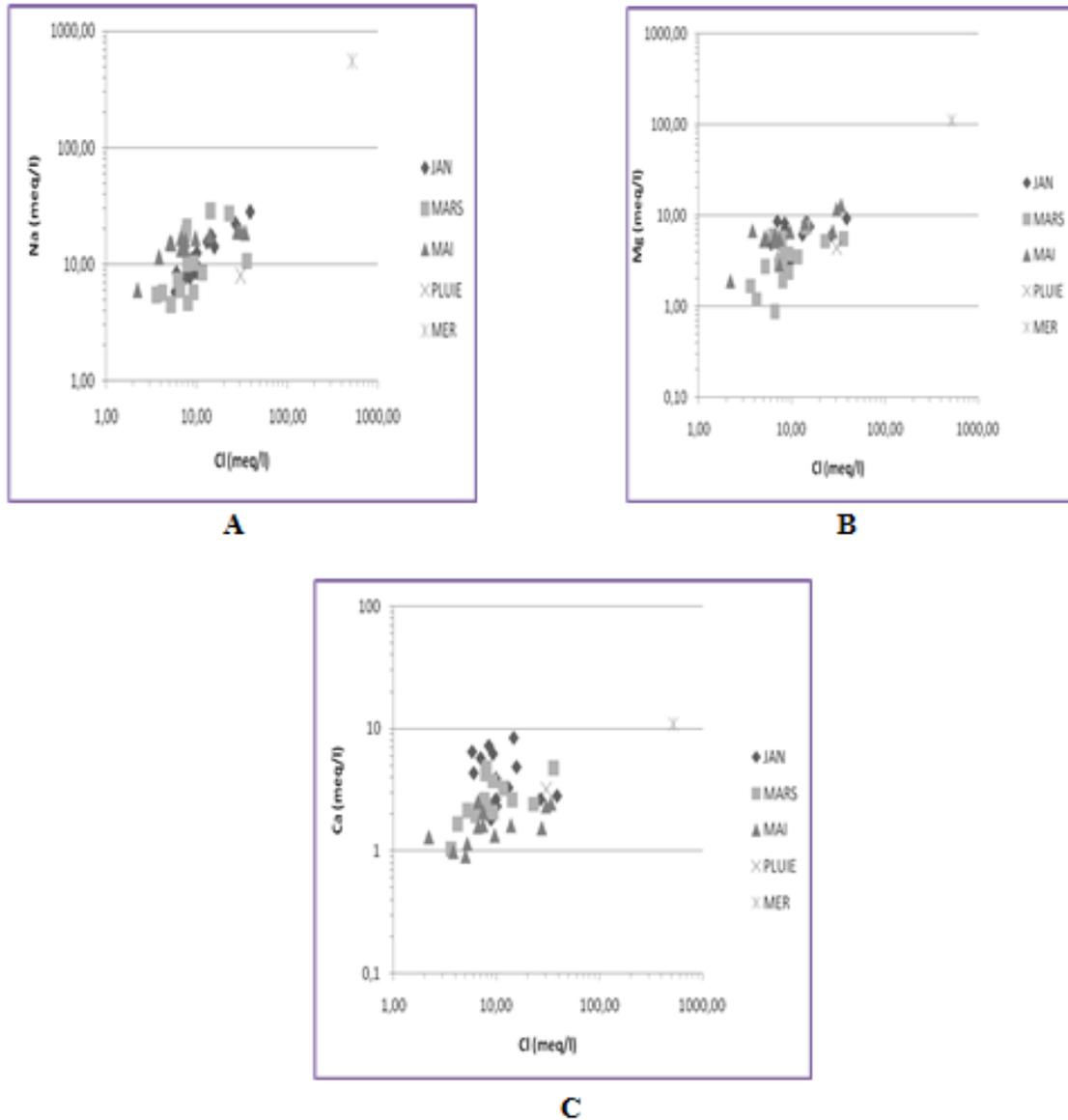


Figure 54 : variations des éléments par rapport à la droite Cl mer-Cl précipitations.

L'observation du graphe A, (fig. 54), montre que les points analysés s'alignent au-dessus de la droite de référence, ceci nous permet de dire que le sodium peut avoir une origine probablement marine.

L'observation du graphe B, (fig. 54), montre la même répartition, cette tendance nous indique une origine marine du magnésium.

L'observation du graphe C (fig. 54), montre que les points analysés, se répartissent de part et d'autre de la droite, ce qui semble mettre en évidence deux origines de l'élément calcium, une première due à la géologie, en effet les cipolins affleurant au niveau du massif de l'Edough, enrichissent en calcium et une seconde marine.

Cette répartition, met en évidence une contamination marine, cette dernière est générée par les embruns marins. Le lac étant situé à environ 15 kilomètres du littoral, il est souvent couvert par des brouillards facilitant la précipitation des sels contenus dans les eaux de mer. Par ailleurs, au niveau du lac l'évaporation est intense, elle accroît la dégradation de la qualité des eaux en augmentant leur salinité confirmée par l'étude isotopique réalisée par Djabri (in Djabri, 1996).

Nous avons constaté que les facteurs naturels influencent directement ou indirectement la composition chimique des eaux. Nous avons remarqué que le phénomène de dilution conditionne les variations de la composition chimique des eaux. Cependant, l'homme par son intervention contribue à la dégradation de la qualité des eaux.

En effet, la zone entourant le lac est à vocation agricole et industrielle, de ce fait les activités anthropiques sont en constante croissance, ces dernières entraînent des constructions d'habitations souvent réalisées à la va vite, de ce fait les conditions d'hygiène et surtout d'assainissement ne sont pas assurées, ce qui entraîne le rejet des eaux usées à même la surface du sol accentuant donc les risques de pollution et surtout de contamination. Nous allons nous intéresser à l'impact des activités anthropiques sur les eaux.

V-9- Les facteurs anthropiques

Les eaux des Oueds particulièrement Zied et Meboudja, par la pérennité de leurs écoulements peuvent être utilisés pour l'irrigation. Ce qui entraîne un retour des eaux dans le sous-sol, engendrant une augmentation de la minéralisation. Le schéma suivant donne un aperçu sur la réalisation de ces mécanismes.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Par ailleurs, l'utilisation d'intrants par les agriculteurs conduit à la dégradation de la qualité des eaux.

V-9-1- Mécanismes de retour des eaux d'irrigation :

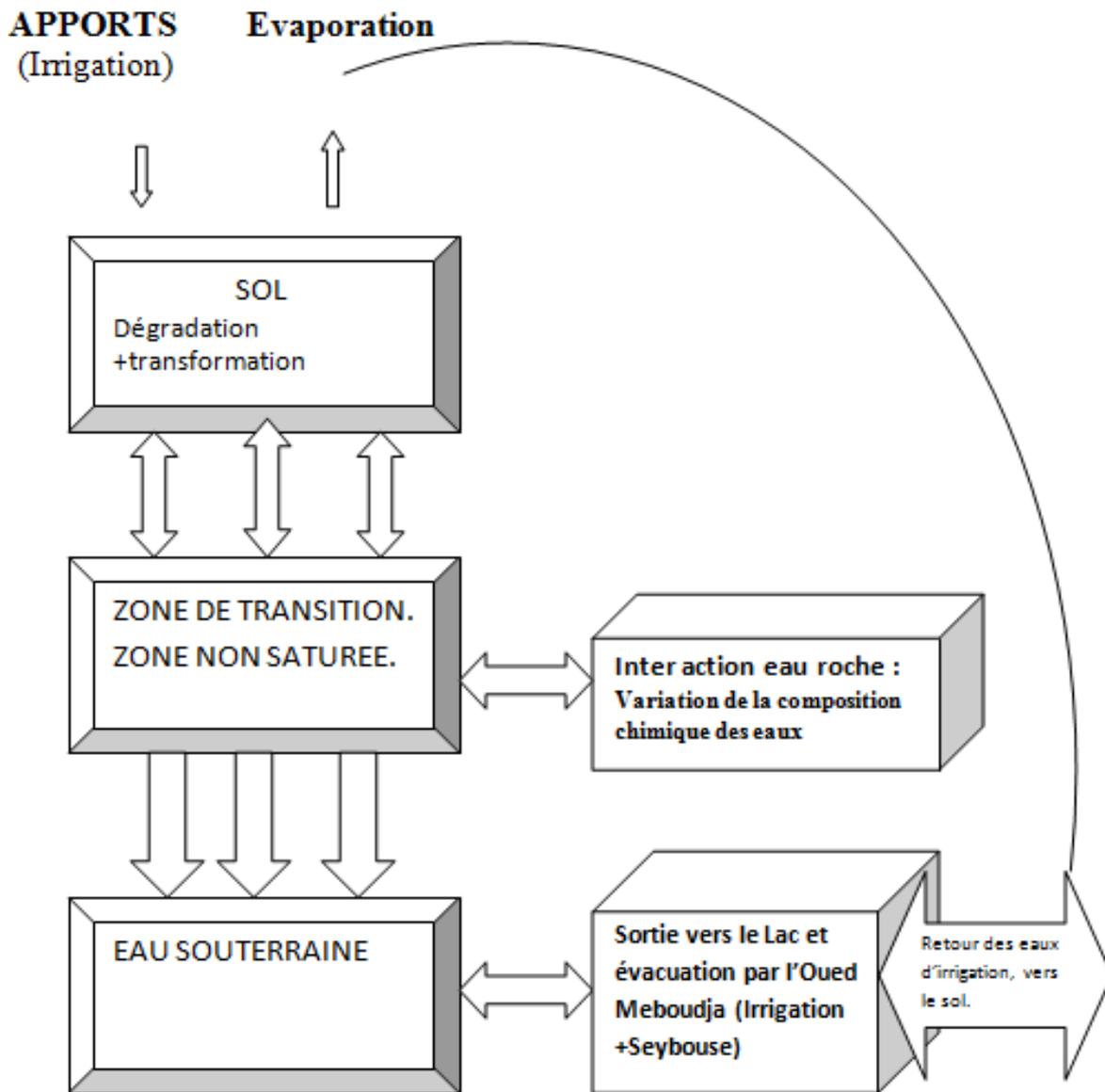


Figure 55 : Schéma Montrant le cheminement des eaux d'irrigation.

Le schéma précédent montre, le cheminement des eaux d'irrigation, au cours de son déplacement ce dernier va subir des variations de sa composition chimique qui va dégrader la qualité des eaux. En effet, une partie des eaux issues de l'irrigation va évoluer en suivant le cycle montré sur le schéma précédent. Les eaux des Oueds Meboudja et Zied, sont souvent utilisées pour l'irrigation. Les diagrammes de Richards réalisés, montrent :

Le retour des eaux d'irrigation, entraîne des risques de Sodisation, c'est-à-dire un accroissement du sodium dans le l'eau et dans le sol. Pour éviter cette situation, des critères des eaux d'irrigation ont été élaboré.

V-9-2- Les critères des eaux d'irrigation :

Les sels minéraux des eaux ont des effets sur le sol et sur les plantes. Ces sels peuvent perturber le développement physique des plantes par l'absorption de l'eau qui agit sur le processus osmotique ou chimiquement par les réactions métaboliques comme celles causées par les constituants toxiques. Les effets des sels causent des changements dans la structure du sol (perméabilité, aération) affectant indirectement le développement de la plante. La limite tolérable des concentrations de sel dans les eaux d'irrigation ne peut être fixée à cause de la grande variabilité de la salinité des plantes, cependant les études qui ont été faites sur des récoltes dont la salinité des sols a été ajustée artificiellement ont fourni d'importantes informations sur la tolérance des sels des eaux d'irrigation.

Le critère appliqué pour connaître la tolérance relative à la concentration des sels des eaux du sol est de comparer deux récoltes de sol exposé aux mêmes conditions sous l'effet de deux salinités différentes. Dans chaque groupe les récoltes sont classées par ordre croissant selon la tolérance de salinité (Todd, 1980).

Les valeurs de la conductivité électrique mesurées en haut et en bas de chaque ouvrage, représentant le niveau de salinité auquel on peut s'attendre. Il est à noter que ces concentrations sont des références pour les sols qui peuvent contenir des concentrations de sel cinq à dix fois supérieures à celle de l'eau utilisée pour l'irrigation.

Le type de sol, les conditions climatiques et la manière d'irrigation peuvent influencer la production agricole.

La qualité de l'eau d'irrigation est généralement exprimée par des classes de convenance relative. La plupart des classifications tiennent compte de la conductivité (exprimant la totalité des corps dissous) et surtout la teneur en sodium et en bore. La concentration du sodium est importante dans la classification de l'eau d'irrigation car le sodium réagit avec le sol et réduit sa perméabilité.

Les sols contiennent en grande quantité du sodium et des carbonates qui sont les anions prédominants et sont appelés sols alcalins, ceux qui contiennent beaucoup plus de chlorures et de sulfates sont appelés sols salés.

Généralement, les sols saturés en sodium supportent peu ou pas les plantes.

V-9-3- Notion de SAR (Sodium Adsorption Ratio) :

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Pour évaluer la valeur agricole d'une solution, Richards 1954 (Laboratoire de Salinité du Département de l'Agriculture aux USA) a mis en œuvre un diagramme délimitant cinq (05) classes. Ce dernier est basé sur la minéralisation totale et le SAR, ce dernier est donné par la relation suivante :

$$\text{SAR} = \text{Na}^+ / 0.5 [(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})]^{1/2}$$

Le calcium et le sodium sont exprimés en meq/l.

V-9-4- Application aux eaux de la région d'étude :

A- Caractéristiques des eaux d'irrigation de l'Oued Zied :

L'observation du diagramme réalisé montre que les eaux de l'Oued Zied, se répartissent dans les quatre classes suivantes : C1-S1, C2-S1, C3-S1 et C3-S2,

Ce qui nous permet de déduire les constatations suivantes :

C1S1 : Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols.

C2-S1 : eau bonne pour l'irrigation et pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour des plantes moyennement tolérantes au sel, sur des sols ayant une bonne perméabilité.

C3-S1 et C3-S2 : eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit être contrôlée.

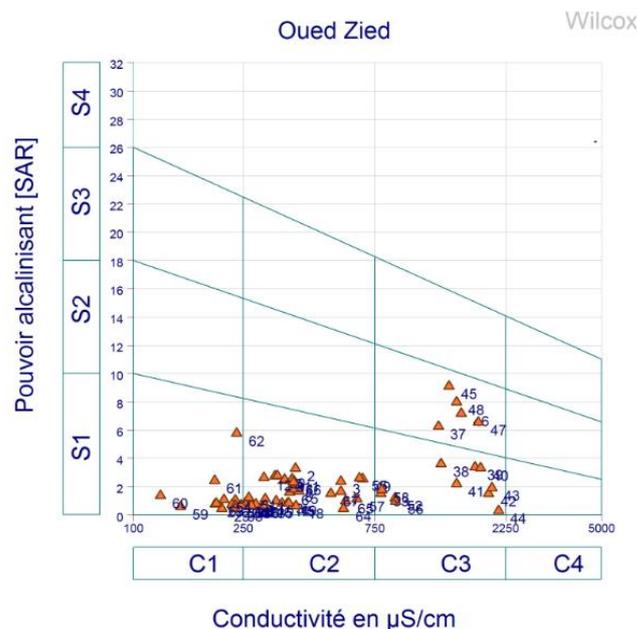


Figure 56 : Diagramme de Richards pour les eaux de l'Oued Zied

B- Pour l'Oued Meboudja :

L'observation du graphe (fig. 57), nous permet de déterminer les classes suivantes : C2-S1, C3-S1, C3-S2- C3-S3, C4-S1, C4-S2, C4-S3.

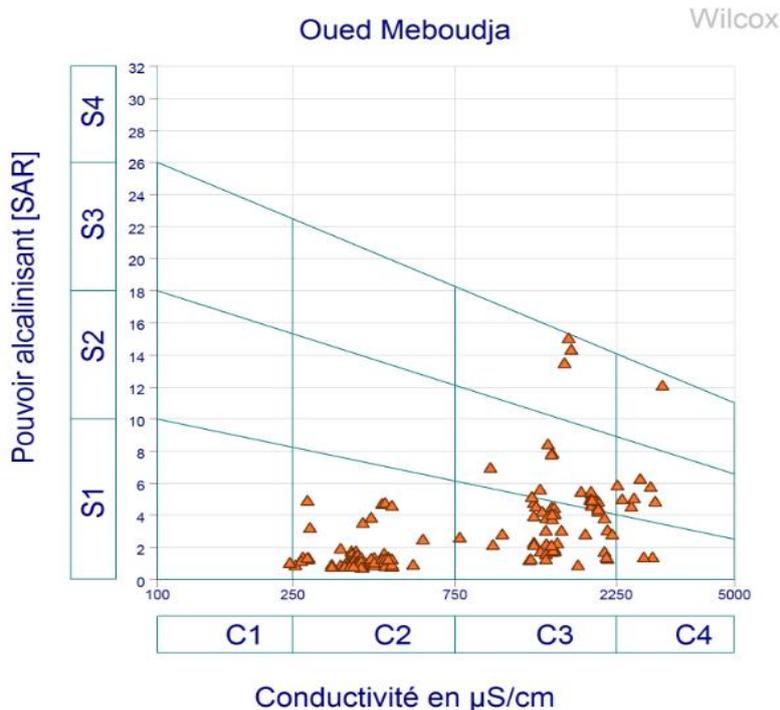


Figure 57 : Diagramme de Richards pour les eaux de l'Oued Meboudja

Les classes déterminées, nous permettent de tirer les constatations suivantes :

C2-S1 : eau bonne pour l'irrigation et pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour des plantes moyennement tolérantes au sel, sur des sols ayant une bonne perméabilité.

C3-S1, C3-S2: eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit être contrôlée.

C3-S3, C4-S1, C4-S2 : Eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.

C4-S3: généralement cette eau ne convient pas à l'irrigation, cependant elle peut être utilisée sous certaines conditions : sols très perméables, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel.

Cet aperçu sur l'utilisation des eaux pour l'irrigation, montre une variation des classes entre les deux Oueds considérés. Cette variation s'est traduite par une augmentation de la minéralisation (apparition de la classe C4). De ce fait, on assiste à un accroissement de la minéralisation des eaux entre leur entrée et leur sortie du Lac. Cet accroissement peut être

généralisé par la matrice argileuse du lac qui par le biais d'échanges de bases va capter le calcium et libérer le sodium. Cependant, cette augmentation de la minéralisation peut être liée au fait que le lac est proche de la mer (15 kilomètres à vol d'oiseau), de ce fait les embruns marins peuvent entraîner un accroissement de la minéralisation. Nous nous intéressons à l'influence marine.

V-10- Mise en évidence d'une interférence eaux de surface eaux souterraines :

Pour mettre en évidence une probable relation entre les eaux de surface et les eaux souterraines, nous nous sommes basés sur les résultats obtenus par H Khalfaoui (2007) (fig. 58) et F Zahi (2008) (fig. 59). Le premier a démontré dans son travail une alimentation du lac par les eaux des nappes par contre, le second a réalisé une carte des infiltrations, cette dernière montre la présence de zones préférentielles d'infiltrations. En nous basant sur ces constatations, nous allons nous intéresser à la qualité des eaux des puits et à leur influence particulièrement dans l'irrigation.

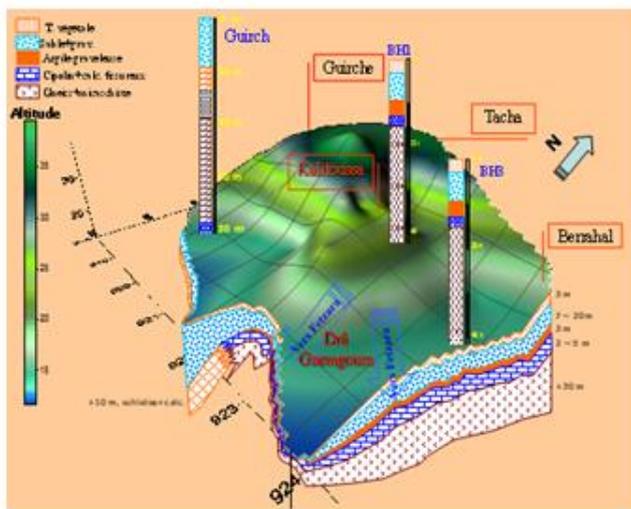


Figure 58: Aquifères recensés en relation avec le lac (in Khalfaoui, 2007)

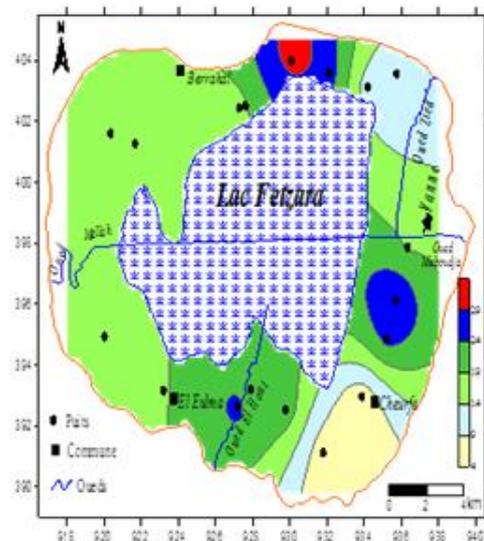


Figure 59: carte des infiltrations relatives au mois de Février 2007 (in Zahi, 2008)

Pour rappel, le lac Fetzara est entouré d'une nappe superficielle dans laquelle sont implantés les puits des agriculteurs, ces derniers utilisent ces eaux pour l'irrigation. Au cours du chapitre hydrogéologie, par les biais de la cartographie piézométrique, nous avons confirmé l'existence de deux relations :

- la première entre la nappe et le lac,
- la seconde entre la nappe et les Oueds

Dans cette partie, nous allons essayer de confirmer ces relations par le biais de l'outil hydrochimique. Dans une première étape, nous nous intéresserons aux informations fournies par le diagramme de Piper et ensuite, nous donnerons un aperçu sur les relations entre les différents éléments chimiques en utilisant les informations fournies par l'analyse en composantes principales.

V-10-1- Diagramme de Piper :

Ce diagramme comporte 352 échantillons, les prélèvements ont portés sur les eaux des puits uniquement. L'observation du diagramme de piper (fig. 60) montre que les eaux se répartissent autour de deux principaux pôles: le pôle chloruré sulfaté calcique et magnésien et le pôle chloruré sodique potassique ou sulfaté sodique. Donc, les eaux chlorurés sodiques dominent par rapport aux eaux sulfatées calciques. Les eaux bicarbonatées très peu nombreuses s'associent au magnésium.

Cette première représentation montre une hétérogénéité de la composition chimique des eaux, pour mieux expliquer les origines de cette composition chimique, nous avons réalisé une analyse en composantes principales.

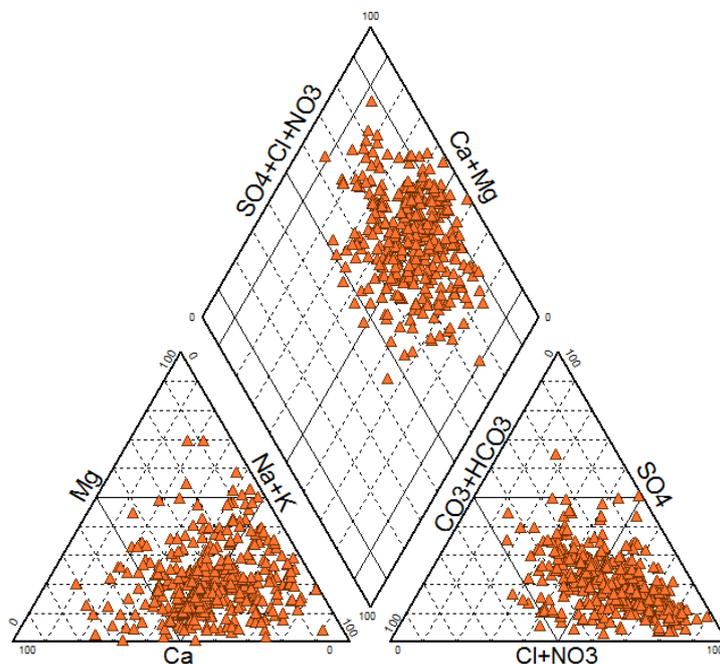


Figure 60: Diagramme de Piper eaux souterraines de la nappe entourant le lac.

V-10-2- ACP pour les eaux souterraines :

Pour réaliser notre travail, nous avons utilisé les résultats de 352 analyses, ces dernières ont porté sur 8 paramètres chimiques (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et CE, conductivité électrique). Pour la réalisation de cette ACP, nous avons utilisé le logiciel STATISTICA 8.

• **Matrice de corrélation :**

Le nombre d'individus étant de 352, le coefficient de corrélation seuil sera $r = 0.21$. Ce qui nous permet de dégager les associations suivantes :

	Ce	Ca	Mg	Na	K	HCO3	Cl	SO4
Ce	1							
Ca	0,45	1						
Mg	0,57	0,04	1					
Na	0,70	0,44	0,59	1				
K	0,014	0,087	-0,07	-0,03	1			
HCO3	0,48	0,31	0,37	0,56	-0,02	1		
Cl	0,76	0,62	0,62	0,82	0,047	0,45	1	
SO4	0,40	0,37	0,35	0,50	0,08	0,31	0,40	1

Nous pouvons ainsi dégager les couples présentant une corrélation acceptable :

Couple	Valeur de r	Couple	Valeur de r	Couple	Valeur de r	Couple	Valeur de r
Ce- Ca	0.45	Ce-SO4	0.40	Mg-Na	0.59	Na-Cl	0.82
Ce-Mg	0.57	Ca- Na	0.44	Mg-HCO3	0.37	Na-SO4	0.50
Ce-Na	0.70	Ca-HCO3	0.31	Mg-Cl	0.62	HCO3-Cl	0.45
Ce-HCO3	0.48	Ca-Cl	0.32	Mg-SO4	0.35	HCO3-SO4	0.31
Ce-Cl	0.76	Ca-SO4	0.37	Na-HCO3	0.56	Cl-SO4	0.40

On remarque une bonne correspondance entre la conductivité et tous les éléments chimiques mis à part le potassium, qui ne se corrèle avec aucun élément.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Le potassium est associé négativement au magnésium et au sodium, de ce fait il suit une évolution inverse par rapport aux deux éléments.

- **Cercle ACP :**

L'observation du cercle ACP formé par les axes F1F2 (64%) de l'information totale, montre selon l'axe F1 (50 %) horizontal, une opposition entre les eaux fortement minéralisées (partie négative de l'axe) et les eaux faiblement minéralisées occupant la partie positive de l'axe. Selon l'axe F2 (14%) vertical, les eaux bicarbonatées magnésiennes et chlorurées sodiques (partie positive de l'axe) s'opposent aux eaux sulfatées sodiques. Il y a une compétition entre les eaux sulfatées calciques. Nous remarquons que le potassium se démarque, il ne suit aucune famille.

Cette analyse, montre que les eaux des nappes, ne présentent pas la même composition chimique, elles restent influencées par la lithologie locale. En effet, les eaux bicarbonatées proviendraient des formations calcaires particulièrement les cipolins affleurant sur le massif de l'Edough. Les eaux chlorurées résulteraient de la contamination des eaux par les sables (Kheraza) ou elles proviendraient des échanges s'effectuant entre la nappe et Oued El Mellah qui charrie les eaux de la région de Berrahal. Par ailleurs, nous remarquons que les sulfates s'accompagnent du calcium, ce qui laisse supposer une influence des évaporites sur la qualité des eaux. Ces eaux seraient issues des puits situés dans la zone de Hadjar Edisse, cette dernière est en contre bas des monts d'Ain Berda, les eaux en provenance de cette zone sont riches en CaSO_4 car lessivant les formations évaporitiques de Guelma (in Djabri et al, 2009).

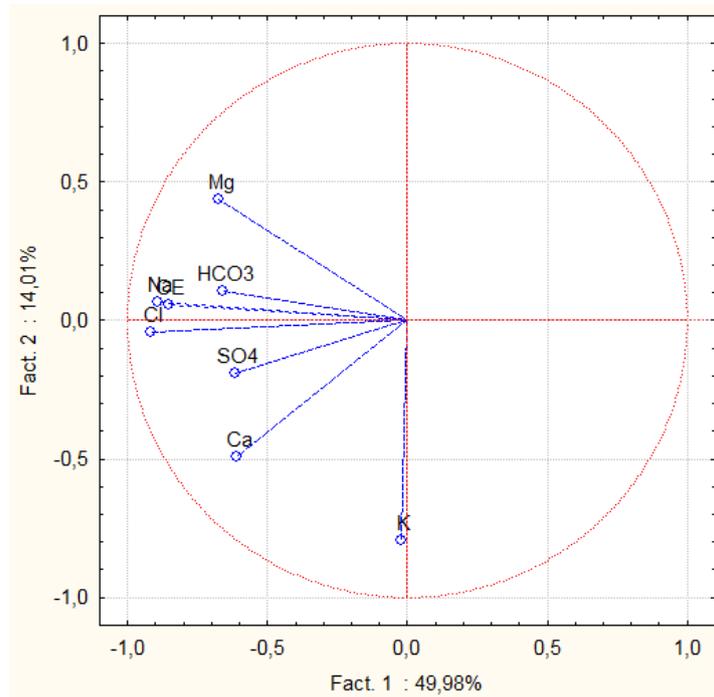


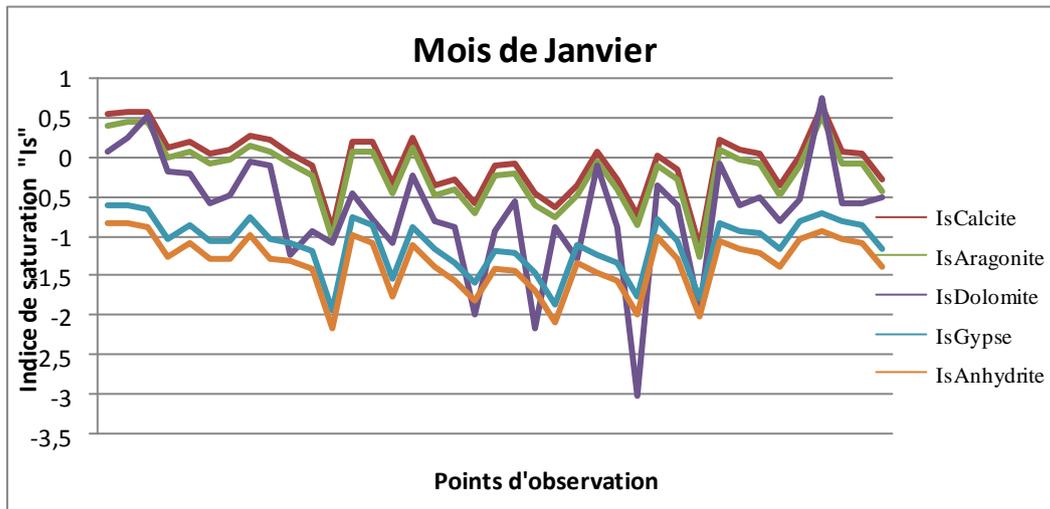
Figure 61 : ACP des eaux souterraines

On remarque que la qualité des eaux de la nappe entourant le lac, est influencée par les apports en eau qu'ils soient de surface (Oueds Mellah, Hout, Zied ou en provenance du massif de l'Edough) soient souterrains (nappes de Berrahal...) comme démontré par H. Khalfaoui (2007). Pour confirmer nos hypothèses, nous allons utiliser l'outil thermodynamique. Les résultats obtenus sont issus des traitements réalisés en utilisant le logiciel PHREEC, sur les eaux des puits.

V-10-3- Résultats fournies par la thermodynamique :

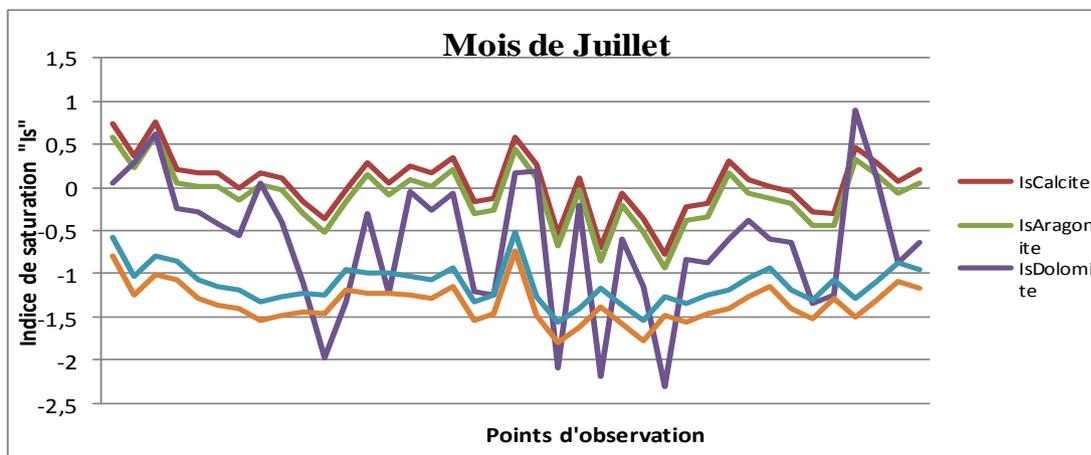
A- Mois de Janvier :

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?



Contrairement aux eaux superficielles qui ont montré une sous saturation vis-à-vis de tous les minéraux, les eaux souterraines indiquent une variation des indices de saturation variables en effet, ils sont positifs donc sur saturé (cas de la calcite, de l'aragonite et de la dolomite par endroit), de ce fait il y a encore possibilité de réaction avec le milieu, pouvant entraîner une variation de la composition chimique des eaux. Par contre, les minéraux salins tels le gypse et l'anhydrite présentent des indices négatifs, traduisant une sous saturation et restent conforme aux eaux de surface.

B- Mois de Juillet



Au cours de ce mois, la sur saturation est moins évidente en effet, les apports par les précipitations sont quasi nuls (saison estivale), de ce fait les réactions ne se produisent pas. Les points indiquant une sursaturation sont situés dans les zones à fortes infiltrations, se traduisant par un apport d'eau.

L'outil thermodynamique, a montré l'influence des minéraux carbonatés et des minéraux salifères dans l'acquisition du chimisme des eaux. Il a également montré une stabilité des minéraux salifères par rapport aux minéraux carbonatés. Ces derniers réagissent rapidement avec les arrivées d'eau. Ainsi, dans les zones à fortes infiltrations les indices sont soit tantôt positif soit tantôt négatifs. Ce changement des valeurs des indices est très localisé.

V-10-4- Confirmation par la modélisation :

Les deux mois choisis sont extrêmes, ce qui se traduit par une variation des apports en eau par les précipitations et par conséquent par l'infiltration. Au cours de ces deux mois le total des précipitations passe de 100 mm au mois de janvier à 5mm au plus au mois de juillet, ce qui va influencer considérablement la composition chimique des eaux. Pour déterminer l'emplacement les variations des minéraux carbonaté, nous avons réalisé une simulation. Les variations des indices de saturation sont données dans le tableau suivant, celui-ci, ne comporte que les ouvrages dont les valeurs des indices ont changé entre les deux mois considérés.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Tableau 29: Variations des indices de saturation entre les deux considérés.

		Mois de Janvier			Moi de Juillet		
N°	Nom de l'ouvrage	Is Calcite	Is Aragonite	Is Dolomite	Is Calcite	Is Aragonite	Is Dolomite
1	7	0,13	-0,02	-0,18	0,2	0,05	-0,24
2	9	0,05	-0,1	-0,58	0,16	0,02	-0,42
3	11	0,09	-0,05	-0,47	-0,01	-0,15	-0,55
4	12	0,28	0,14	-0,04	0,17	0,03	0,05
5	14	0,22	0,07	-0,09	0,11	-0,03	-0,4
6	15	0,04	-0,1	-1,22	-0,16	-0,31	-1,1
7	19	0,21	0,07	-0,77	0,05	-0,09	-1,23
8	20	-0,33	-0,48	-1,09	0,24	0,1	-0,05
9	22	-0,35	-0,5	-0,81	0,34	0,2	-0,06
10	26	-0,11	-0,25	-0,93	0,58	0,44	0,16
11	27	-0,07	-0,21	-0,55	0,27	0,12	0,19
12	29	-0,62	-0,77	-0,89	0,11	-0,03	-0,2
13	32	0,08	-0,07	-0,09	-0,07	-0,21	-0,6
14	35	0,02	-0,12	-0,35	-0,23	-0,38	-0,83
15	37	-1,13	-1,27	-1,94	0,3	0,16	-0,59
16	38	0,23	0,08	-0,06	0,09	-0,06	-0,38
17	40	0,05	-0,09	-0,49	-0,05	-0,19	-0,63
18	43	0,02	-0,12	-0,53	-0,3	-0,45	-1,25
19	47	0,07	-0,08	-0,57	0,29	0,14	0,11
20	49	-0,29	-0,44	-0,5	0,2	0,06	-0,64

L'observation du tableau précédent, montre une variation des indices de saturation entre les deux mois considérés. La variation observée à porter sur 20/39, soit 50% des échantillons. Par

ailleurs, nous remarquons que les trois minéraux, n'évoluent pas tous de la même manière. C'est-à-dire que la variation des indices peu porter sur l'ensemble des minéraux ou bien sur un ou deux, ceci est probablement lié au temps de réaction.

Les minéraux étudiés appartiennent aux carbonates, se présentent sous les formules chimiques suivantes :

-Aragonite : CaCO_3 (orthorhombique)

-Calcite : CaCO_3 (rhomboédrique)

-Dolomite : $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

V-10-5- Origine géochimique des minéraux:

L'aragonite apparaît comme minéral primaire dans les roches métamorphiques de haute pression, mais la plupart des carbonates orthorhombiques apparaissent sous forme de minéraux de remplacement dans les roches sédimentaires, volcaniques et métamorphiques et de gisements, formés à basse température et pression de solutions aqueuses. On la retrouve aussi dans les stalactites.

L'aragonite est le polymorphe stable à haute température et haute pression du carbonate de calcium, de formule CaCO_3 ; le polymorphe stable en conditions ambiantes est la calcite. En conditions ambiantes, l'aragonite se transforme très lentement en calcite (en plusieurs dizaines voire centaines de millions d'années). Les trois formes principales cristallines du carbonate de calcium sont l'aragonite, la vaterite et la calcite.

L'aragonite et la calcite caractérisent les formations métamorphiques, ce qui explique leur présence, en effet dans la nature, l'aragonite et la calcite ont la même composition chimique CaCO_3 mais par contre, leur organisation géométrique cristalline est différente ; toutes les deux se retrouvent dans les concrétions. L'aragonite précipite en premier puis change de symétrie et se transforme dans le temps en calcite. L'aragonite est dite métastable.

Calcite et aragonite sont toutes deux stables, mais à des conditions différentes de température et de pression : l'aragonite est stable à pression plus élevée que la calcite et inversement.

La dolomite est associée à la calcite dans les formations métamorphiques, ce qui explique les variations déterminées par la simulation.

La dolomite est une espèce minérale formée de carbonate de calcium et de magnésium de formule chimique $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

V-10-6- Localisation des zones de variations des Indices de saturation :

Pour expliquer les variations fournies par la modélisation, nous avons reportés les ouvrages indiquant une variation des indices de saturation, sur la carte suivante (fig. 62).

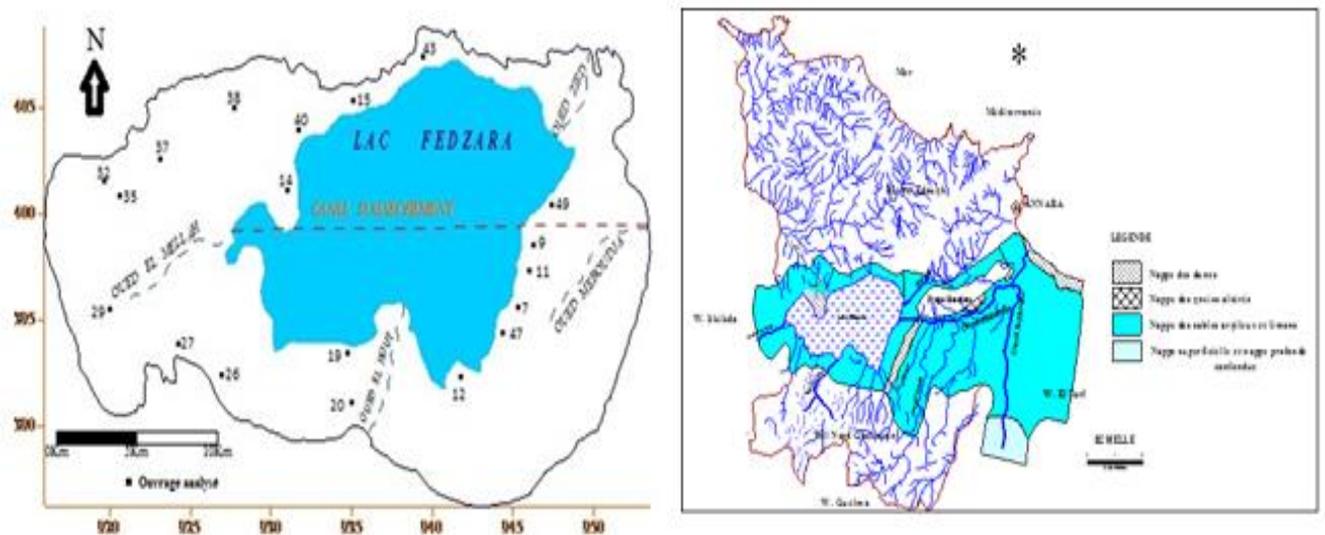


Figure 62 : Répartition des ouvrages montrant une variation des indices de saturations.

L'observation de la carte montre que les points montrant une variation des indices de saturation, se situent dans les zones des nappes, c'est-à-dire vers Berrahal et vers à la sortie du lac. Ces deux zones se caractérisent par l'affleurement de formations métamorphiques riches en micas et en cipolins d'où les réactions observées.

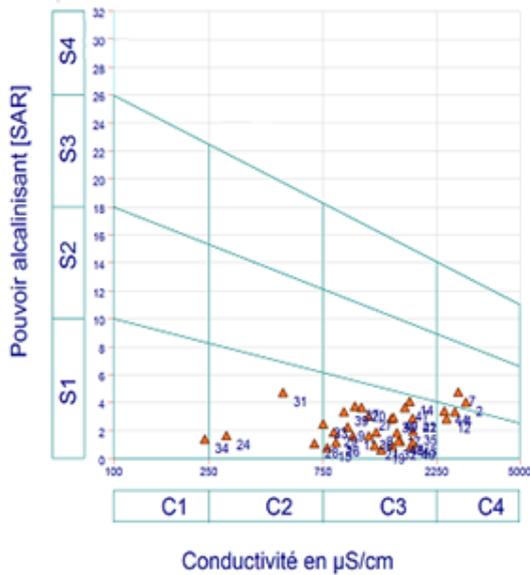
V-10-7- L'irrigation à partir des eaux des puits et sa conséquence sur le sol et la plante :

Les eaux de la nappe sont souvent utilisées pour l'irrigation. Ces eaux sont très minéralisées, ce qui pourra entraîner une Sodisation des sols. De ce fait, nous allons nous intéresser à l'irrigation des plantes à partir des eaux des puits, ce qui nous permettra de déterminer la présence ou non du risque de Sodisation.

Pour réaliser notre travail, nous avons utilisé le diagramme de Richards, basé sur la combinaison du SAR et de la conductivité.

Les résultats des analyses du mois de Janvier et celles du mois de Juillet, ont été considérés. Le choix porté sur ces mois, n'est pas fortuit mais caractérise le mois pluvieux où les apports à la nappe par infiltration sont importants par contre au cours du mois de juillet c'est sec, rien n'arrive à la nappe sauf le retour des eaux d'irrigation, comme démontré au niveau de la figure 65, les eaux à leur retour vont être donc plus minéralisées.

Mois de Janvier



Mois de Juillet

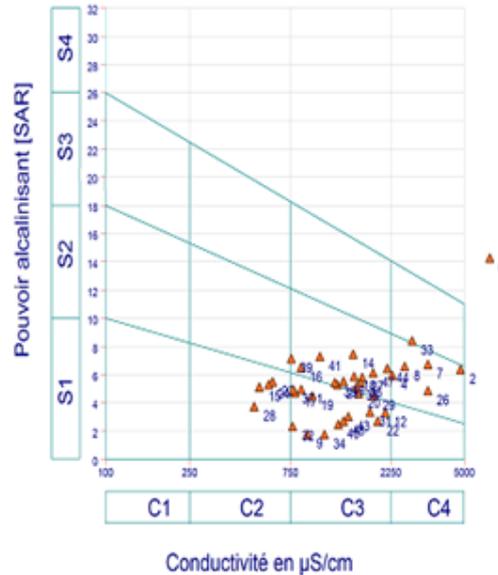


Figure 63 : Diagrammes de Richards pour les eaux souterraines au cours des mois (Janvier – Juillet)

• **Interprétation des diagrammes de Richards :**

les résultats obtenus sont reportés dans le tableau suivant :

Classe \ mois considéré	Janvier 2008	Juillet 2008
C1-S1	O	
C2-S1	O	O
C2-S2		O
C3-S1	O	O
C3-S2		O
C4-S1	O	O
C4-S2	O	O
C4-S3		O
C4-S4		O (hors classe)

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

L'observation du précédent tableau, montre un danger de sodisation évident au mois de juillet.

En comparant les deux diagrammes, on remarque une dégradation de la qualité des eaux entre les deux mois considérés. Le mois de juillet se caractérise par une dégradation très nettes de la qualité des eaux. Ces dernières sont parfois inutilisables pour l'irrigation. Sachant que cette région se caractérise par des cultures d'été, tel que la tomate industrielle, les pastèques et les melons. De ce fait, la pollution risque des épidémies. Ce qui obligera les utilisateurs à procéder à des contrôles réguliers de la qualité des eaux. Par ailleurs, les eaux des classes **C4-S1** et **C4-S2** et surtout **C4-S2**, dont les eaux sont utilisés sous certaines conditions compromettent les rendement si un apport d'eau de bonne qualité n'est pas effectué.

A titre indicatif les eaux des classes **C4-S1**, **C4-S2** et **C4-S4**, sont définies de la manière suivante :

C4-S1 et C4-S2 : Eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et bien sur drainés et lessivés.

C4-S4 (hors classe) : eau ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sols très perméable, bon lessivage, plantes tolérantes très bien le sel.

Les résultats montrent que la dégradation de la qualité des eaux, concerne uniquement quelques échantillons. Pour expliquer cette variation, nous avons reporté les ouvrages indiquant une dégradation de la qualité des eaux sur une carte, cette dernière a été calée sur la carte des infiltrations établie par F Zahi (2008).

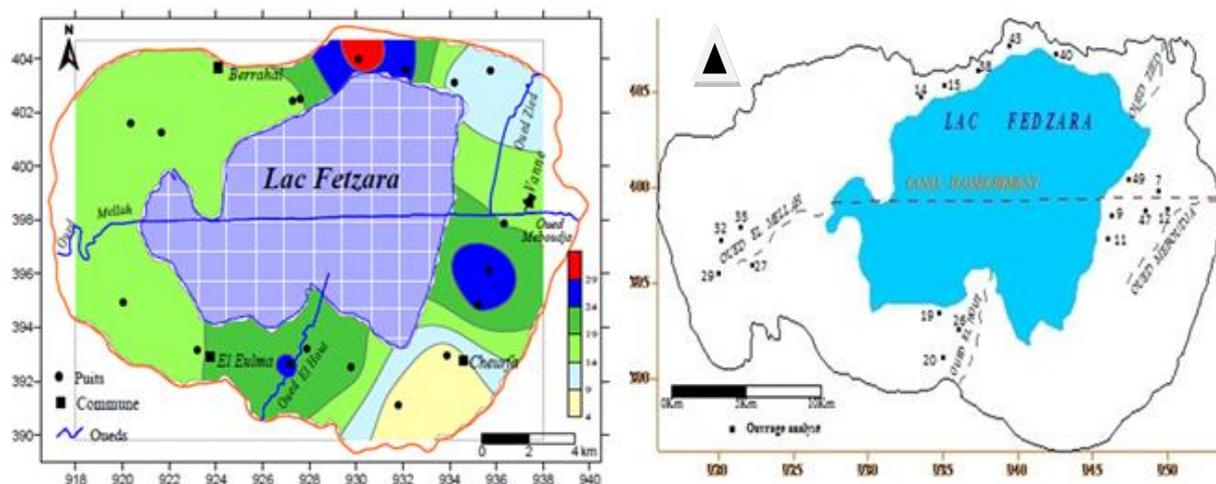


Figure 64 : Répartition des zones montrant une dégradation de la qualité des eaux d'irrigation

L'observation de la précédente figure montre quatre zones (A, B, C et D). Les trois premières zones A, B et C, sont localisées au niveau des parties indiquant une infiltration importante par contre la zone D est située dans la région de l'Oued Mellah. Ainsi, nous pouvons dire que les zones indiquant des infiltrations importantes seraient des zones propices au retour des eaux d'irrigation. Il est tout à fait clair que les eaux d'irrigation ou de précipitations, traversant les terrains s'enrichissent dans notre cas en éléments chimiques, ce qui entraînent les changements observés. Par contre, la zone D située dans la région de l'Oued Mellah, là les eaux sont salées, ce qui explique l'accroissement de la salinité des eaux d'où la dégradation observée.

V-11- Conclusion :

Le chapitre consacré à l'hydrochimie, a porté sur les aspects qualitatifs des eaux de la région. Dans notre travail, on s'est intéressé tour à tour aux eaux de surfaces et eaux souterraines.

La partie consacrée aux eaux de surfaces a montré que ces dernières sont minéralisées mais cette minéralisation diffère à l'entrée et à la sortie du lac de ce fait, beaucoup de réactions se produisent au niveau du lac lui-même. Nous avons également démontré que l'environnement du lac (géologique, climatique, marin...) pouvait influencer de manière significative la minéralisation des eaux du lac.

Cette minéralisation des eaux est due à deux origines naturelle et anthropique.

Les facteurs naturels sont multiples, on a le contact eau roche. Dans ce contexte précis, la salinité des eaux se fera par le biais des facteurs climatiques (évaporation, infiltration, érosion), ces derniers agissent soit directement par les échanges de base, soit indirectement par le phénomène de l'hydrolyse.

Les faciès dominant pour les eaux superficielles diffèrent d'un Oued à un autre et selon la nature géologique ou le climat. On a des faciès chlorurés sulfatés calciques et magnésiens, des faciès chlorurés sodiques potassiques ou sulfatés sodiques. Etant donné que les eaux arrivant au lac traversent des formations métamorphiques et des sables (Massif de l'Edough), donc l'interaction entre l'eau et la roche provoque une dissolution entraînant un enrichissement des eaux en chlorures, bicarbonates et potassium.

On a aussi des eaux riches en sulfates charriées par l'Oued El Hout drainant la plaine de Cheurfa.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Après étude, il s'avère que les eaux alimentant le lac traversent soit des formations métamorphiques de l'Edough, soit des formations sédimentaires, leur conférant des compositions chimiques différentes. Une partie des eaux va s'éjourner dans le lac, avant de sortir par le canal d'assèchement puis par l'Oued Meboudja.

Les eaux sortant du lac sont chlorurées sodiques indiquant une interaction entre les eaux et la matrice tapissant le bassin du lac.

Donc, la salinité des eaux est liée à la dissolution des formations évaporitiques, des formations carbonatées et à l'échange de base particulièrement important.

En plus, le calcul du bilan entrées-sorties des flux transitant par le lac, montre que l'origine de l'excédent des éléments chimiques est expliquée par la nature du sol, le degré de la fermeture de la vanne de sortie des eaux depuis le lac (la mauvaise étanchéité de la vanne entraîne, par moment un assèchement du lac).

L'un des affleunt principal et important du lac est l'Oued Zied, les écoulements se produisent en sub-surface, entraînant ainsi une altération et par conséquent la mise en solution des minéraux.

Etant donné, que l'Oued Zied est situé au pied du mont de l'Edough, donc une partie des eaux aboutissant au lac proviendrait de ce massif métamorphique particulièrement riche en silicates, ces derniers conduisent à enrichir l'eau en cations et en silice.

Selon l'étude climatique réalisée via la région d'étude, cette dernière montre que la période humide s'étale sur presque huit mois (du mois d'octobre jusqu'au mois de mai), de ce fait le contact eau-roche est quasi permanent tout au long de cette période, ce qui a pour effet d'accélérer la dilution d'un côté et d'un autre l'enrichissement des eaux par certains éléments chimiques.

Prenant comme référence, tout les travaux réalisés depuis 1996 jusqu'à 2010 par plusieurs auteurs, nous avons pu remarquer que les eaux issues du massif de l'Edough, sont riches en potassium, ce qui laisse supposer que cet élément provient du massif et sa présence dans l'eau est engendrée par l'hydrolyse qui se produit lors du contact entre l'eau et la roche. Il est admis d'après Appelo et Postma, que l'altération et la mise en solution des silicates conduisent à enrichir l'eau en cations et en silice. Cette réaction consomme de l'acide et s'accompagne donc d'une augmentation du pH avec production de bicarbonates.

Pour étoffer plus nos travaux, nous avons réalisé une simulation par le logiciel Phreeq et nous avons pu comparer les variations saisonnières des indices de saturations. Ces derniers nous

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

indique une sous saturation de l'eau vis-à-vis des minéraux, ce qui laisse supposer un accroissement probable de la minéralisation.

Pour mieux cerner le problème de la salinisation des eaux, nous avons étudié la répartition de certains éléments par rapport à la droite des chlorures des eaux des précipitations et des eaux de mer, pour pouvoir montrer l'influence marine sur les eaux du lac.

Cette répartition, met en évidence une contamination marine, cette dernière est générée par les embruns marins. Le lac étant situé à environ 15 kilomètres du littoral, il est souvent couvert par des brouillards facilitant la précipitation des sels contenus dans les eaux de mer. Par ailleurs, au niveau du lac l'évaporation est intense, elle accroît la dégradation de la qualité des eaux en augmentant leur salinité confirmée par l'étude isotopique réalisée par Djabri (1996).

Donc, nous avons constaté que les facteurs naturels influencent la composition chimique des eaux, sans oublier pour autant, que le phénomène de dilution conditionne les variations de la composition chimique des eaux.

Les facteurs anthropiques pouvant dégrader la qualité des eaux sont générés par l'intervention de l'homme qui par sa contribution va dégrader la qualité des eaux.

Les eaux des Oueds Zied et Meboudja, par la continuité de leurs écoulements peuvent être utilisés pour l'irrigation. Ce qui peut entraîner un retour des eaux dans le sous-sol, engendrant ainsi une augmentation de la minéralisation.

Par ailleurs, l'utilisation d'intrants agricoles par les agriculteurs conduit à la dégradation de la qualité des eaux.

Les eaux d'irrigation, lors de leur déplacement vont subir des variations de leur composition chimique qui va dégrader la qualité des eaux. Les eaux se trouvant dans les Oueds Meboudja et Zied, sont souvent utilisées pour l'irrigation.

L'utilisation des eaux pour l'irrigation, montre une variation des classes entre les deux Oueds considérés. Cette variation s'est traduite par une augmentation de la minéralisation (apparition de la classe C4). De ce fait, on assiste à un accroissement de la minéralisation des eaux entre leur entrée et leur sortie du Lac. Cet accroissement peut être généré par la matrice argileuse du lac qui par le biais d'échanges de bases va capter le calcium et libérer le sodium.

Pour les eaux souterraines, nous nous sommes intéressés à la qualité des eaux des puits et à leur influence particulièrement dans l'irrigation et cela pendant deux mois bien distincts ; mois de janvier et le mois de juillet.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Les faciès chimiques caractérisant les eaux souterraines sont chlorurés sulfatés calciques et magnésiens et chlorurés sodiques potassiques ou sulfatés sodiques.

Par le biais de l'analyse en composante principale, nous avons pu démontrer que les eaux des nappes, ne présentent pas la même composition chimique, elles restent influencées par la lithologie locale. En effet, les eaux bicarbonatées proviendraient des formations calcaires particulièrement les cipolins affleurant sur le massif de l'Edough. Les eaux chlorurées résulteraient de la contamination des eaux par les sables (Kheraza) ou elles proviendraient des échanges s'effectuant entre la nappe et Oued El Mellah qui charrie les eaux de la région de Berrahal. Par ailleurs, nous remarquons que les sulfates s'accompagnent du calcium, ce qui laisse supposer une influence des évaporites sur la qualité des eaux. Ces eaux seraient issues des puits situés dans la zone de Hadjar Edisse, cette dernière est en contre bas des monts d'Ain Berda, les eaux en provenance de cette zone sont riches en CaSO_4 car lessivant les formations évaporitiques de Guelma (Cf. Djabri et al 2009).

Alors que par le biais de l'outil thermodynamique, nous avons trouvé que contrairement aux eaux superficielles, il y a une sous saturation vis-à-vis de tous les minéraux, les eaux souterraines indiquent une variation des indices de saturation, en effet ils sont positifs donc sur saturé (cas de la calcite, de l'aragonite et de la dolomite par endroit), de ce fait il y a encore possibilité de réaction avec le milieu pouvant entraîner une variation de la composition chimique des eaux. Par contre, les minéraux salins, tels que le gypse et l'anhydrite présente des indices négatifs, traduisant une sous saturation et restent conforme aux eaux de surface.

L'outil thermodynamique, a montré l'influence des minéraux carbonatés et des minéraux salifères dans l'acquisition du chimisme des eaux. Il a également montré une stabilité des minéraux salifères par rapport aux minéraux carbonatés. Ces derniers réagissent rapidement avec les arrivées d'eaux. Ainsi dans les zones à fortes infiltration, les indices sont soit tantôt positif soit tantôt négatifs. Ce changement des valeurs des indices est très localisé.

Pour confirmer ce changement, nous avons utilisé la modélisation, les deux mois choisis sont extrêmes, ce qui se traduit par une variation des apports en eau par les précipitations et par conséquent par l'infiltration. Au cours, de ces deux mois le total des précipitations passe de 100 mm au mois de janvier à 5 mm au plus au mois de juillet, ce qui va influencer considérablement la composition chimique des eaux. La simulation des indices de saturation réalisée montre une variation des indices de saturation entre les deux mois considérés.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Pour expliquer les variations fournies par la modélisation, nous avons reportés les ouvrages indiquant une variation des indices de saturation, ce qui nous a conduits à déceler une variation des indices de saturation, se situant dans les zones de nappes, c'est-à-dire vers Berrahal et vers à la sortie du lac. Ces deux zones se caractérisent par l'affleurement de formations métamorphiques riches en micas et en cipolins d'où les réactions observées.

Comme pour les eaux superficielles, les eaux de la nappe sont aussi utilisées pour l'irrigation. Ces eaux sont très minéralisées, ce qui pourra entraîner une sodisation des sols. Après réalisation des diagrammes de Richards et calcul du SAR, nous avons pu remarquer une dégradation de la qualité des eaux entre les deux mois considérés (janvier et juillet). Le mois de juillet se caractérise par une dégradation très nettes de la qualité des eaux. Ces dernières sont parfois inutilisables pour l'irrigation. Sachant que cette région se caractérise par des cultures d'été, tel que la tomate industrielle, les pastèques et les melons, de ce fait la population risque des épédimies. Ce qui obligera les utilisateurs à précéder à des contrôles réguliers de la qualité des eaux.

Les résultats montrent que la dégradation de la qualité des eaux, concerne uniquement quelques échantillons. Pour expliquer cette variation, nous avons reporté les ouvrages indiquant une dégradation de la qualité des eaux sur une carte calée sur la carte des infiltrations réalisée par Zahi (2008). Nous avons pu déterminer que, les zones indiquant des infiltrations importantes seraient des zones propices au retour des eaux d'irrigation.

Chapitre VI :
Modélisation

***Vérification de l'origine de la salinité par la
méthode de Réseaux de neurones artificiels***

Chapitre VI :

Modélisation

Vérification de l'origine de la salinité par la méthode de Réseaux de neurones artificiels

VI-1- Application du modèle de RNA (ou ANN)/

Les réseaux de neurones artificiels, connus généralement sous l'acronyme ANN (Artificial Neural Network), sont des modèles mathématiques non linéaires de type "boîte noire" capables d'établir des relations entre les entrées et les sorties d'un système.

Les performances de ces derniers dans la modélisation non linéaire ont été prouvées dans plusieurs domaines de l'ingénierie et de la science.

Les réseaux de neurones artificiels sont issus des premiers travaux réalisés dans le domaine de l'intelligence artificielle pour modéliser le fonctionnement du cerveau humain (McCulloch et Pitts, 1943) en se basant principalement sur le concept des neurones.

VI-2- Connexions entre les neurones

Les réseaux de neurones sont organisés en couches ; ces couches se composent d'un certain nombre de neurones interconnectés qui contiennent une fonction d'activation. Des entrées (X_1, X_i, \dots, X_n) sont présentées au réseau par l'intermédiaire de la couche d'entrée, qui les communiquent aux couches cachées où le traitement s'effectue en utilisant des connexions pondérées. Puis, les couches cachées transmettent la réponse à la couche de sortie (S). Les connexions entre les neurones se font par des poids (W_1, W_i, \dots, W_n) (Figure 65).

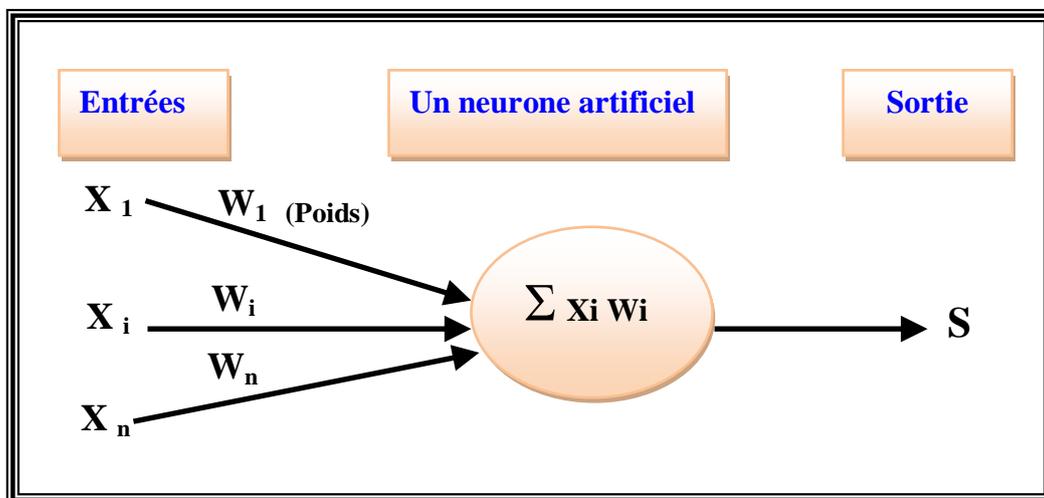


Figure 65 : Schéma d'un neurone artificiel

Il existe une grande variété d'agencements possibles de neurones artificiels (Lippmann, 1987), mais le type de réseau le plus utilisé est le Perceptron Multicouche (PMC). Ce réseau comporte une ou plusieurs couches de neurones artificiels pour capter les entrées, une ou plusieurs couches cachées (MLP ou MultiLayers Perceptron) et une couche de neurones artificiels pour émettre les sorties du modèle.

Chaque couche contient des unités de calcul (neurones) connectées à d'autres neurones par la voie des poids (W_{ij} et W_{jk}) [Najjar and Zhang (2000), Najjar and Ali (1998a) & (1998b)].

La fonction de transfert ou d'activation de non linéarité peut avoir plusieurs formes différentes. La fonction la plus utilisée est en général une somme pondérée de type sigmoïde car il s'agit d'une fonction continue, non décroissante, différentiable et bornée, mais aussi elle introduit de la non linéarité et dérivée d'elle-même.

À chaque connexion entre les neurones de deux couches successives est associé un poids modifiable au cours de l'apprentissage en fonction des jeux de données en entrée et en sortie.

Un PMC peut contenir autant de couches cachées que l'on désire mais il a été montré que quel qu'en soit le nombre, il existe un MLP équivalent avec une seule couche cachée. Ainsi, on se limitera dans cette étude à l'utilisation de MLP comportant une seule couche cachée.

Si les états des neurones de la couche d'entrée sont déterminés par les variables à l'entrée du réseau, les autres neurones (de la couche cachée et de sortie) doivent évaluer l'intensité de la simulation en provenance des neurones de la couche précédente par la relation suivante :

$$S_j = \sum_{i=1}^n X_i W_{ij} + b_j, \text{ Avec}$$

Avec :

S_j : somme des poids entre les entrées du j ème neurone de la couche cachée ;

X_i : valeur de sortie du i ème neurone de couche précédente ; W_{ij} : poids synaptique du neurone i de la couche d'entrée au neurone j de la couche cachée, b_j est le biais ou le seuil d'activation du neurone j .

La réponse des neurones est une fonction d'activation non linéaire de type sigmoïde qui est défini par la formule suivante :

$$f(S_j) = \frac{1}{1 + e^{-S_j}}, f(S_j) \text{ est pratiquement linéaire entre 0 et 1.}$$

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Les valeurs des variables d'entrée ont été normalisées entre [0, 1] par le modèle selon l'équation suivante :

$$\bar{X} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \text{ Avec :}$$

X est la valeur de la variable d'entrée, X_{\min} est sa valeur minimale, X_{\max} est sa valeur maximale et \bar{X} est la valeur de la variable normalisée.

VI-3- Architecture du réseau

L'architecture du réseau précise le nombre de couches qui le composent et le nombre de neurones dans chaque couche, ainsi que le poids des connexions. Un réseau de neurones artificiels est organisé en couches, chacune de ces couches comportant plusieurs neurones. Chacun de ces neurones qui se présente comme unité de calcul autonome, est relié à la totalité ou à certains neurones de la ou des couches précédentes par l'imposition de poids.

VI-4- Création du modèle:

Les données des paramètres de qualité des eaux de surface analysés au laboratoire de l'université de Lille I et Laboratoire de toxicologie Hôpital Ibn Sina Annaba ; ont été employées pour créer le modèle du RNA en utilisant le logiciel STATISTICA neural network version 4.0.

Dans ce travail, un réseau de Perceptron multicouche a été choisi comme modèle du système. À l'entrée du réseau nous avons utilisé les paramètres suivants: La concentration en ion de calcium (Ca^{2+}), de magnésium (Mg^{2+}), de sodium (Na^+), de potassium (K^+), de chlorure (Cl^-), de sulfate (SO_4^{2-}), de bicarbonate (HCO_3^-), de Nitrites (NO_2^-), de Nitrates (NO_3^-), de Phosphate (PO_4^{3-}), de potentiel hydrogène (pH), d'oxygène dissous (O_2), de salinité et de température, la sortie du réseau sera la conductivité électrique (CE).

Les paramètres statistiques utilisés dans ce travail sont : L'erreur moyenne des carrée RMSE (Root Mean Square Error), et le coefficient de détermination R^2 . Ces paramètres sont donnés par les relations suivantes :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (CE_i - \hat{CE}_i)^2}{N}}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (CE_i - \hat{CE}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (CE_i - \overline{CE_i})^2}$$

Où CE_i est la valeur mesurée de la conductivité électrique, \hat{CE}_i est la conductivité calculée par le modèle, \overline{CE} est la moyenne de la conductivité mesurée et N le nombre de données de l'ensemble de calage.

R^2 montre la variation de la valeur de la conductivité électrique calculée ou estimée par le modèle de la régression linéaire.

En outre, le RMSE a été employé pour comparer l'exécution de MLP à d'autres types communs du RNA comprenant le RBF, le GRNN et linéaire.

Le réseau de MLP peut être représenté par la forme suivante :

{CE} = ANN [Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺+ K⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, pH, NO₂, NO₃, PO₄, O₂,
Température, Salinité].

Un schéma de ce réseau est donné sur la figure 66. Il montre une structure typique avec des signaux qui découlent des nœuds d'entrée, traversant les nœuds cachés, atteignant par la suite le nœud de sortie. La couche d'entrée n'est pas vraiment neurale: ces nœuds servent simplement à présenter les valeurs normalisées des variables d'entrée à la couche cachée voisine sans n'importe quelle transformation. Les nœuds des différentes couches; cachées, de sortie et même d'entrée sont reliés entre eux.

Cependant, les nœuds dans chaque couche ne sont pas reliés.

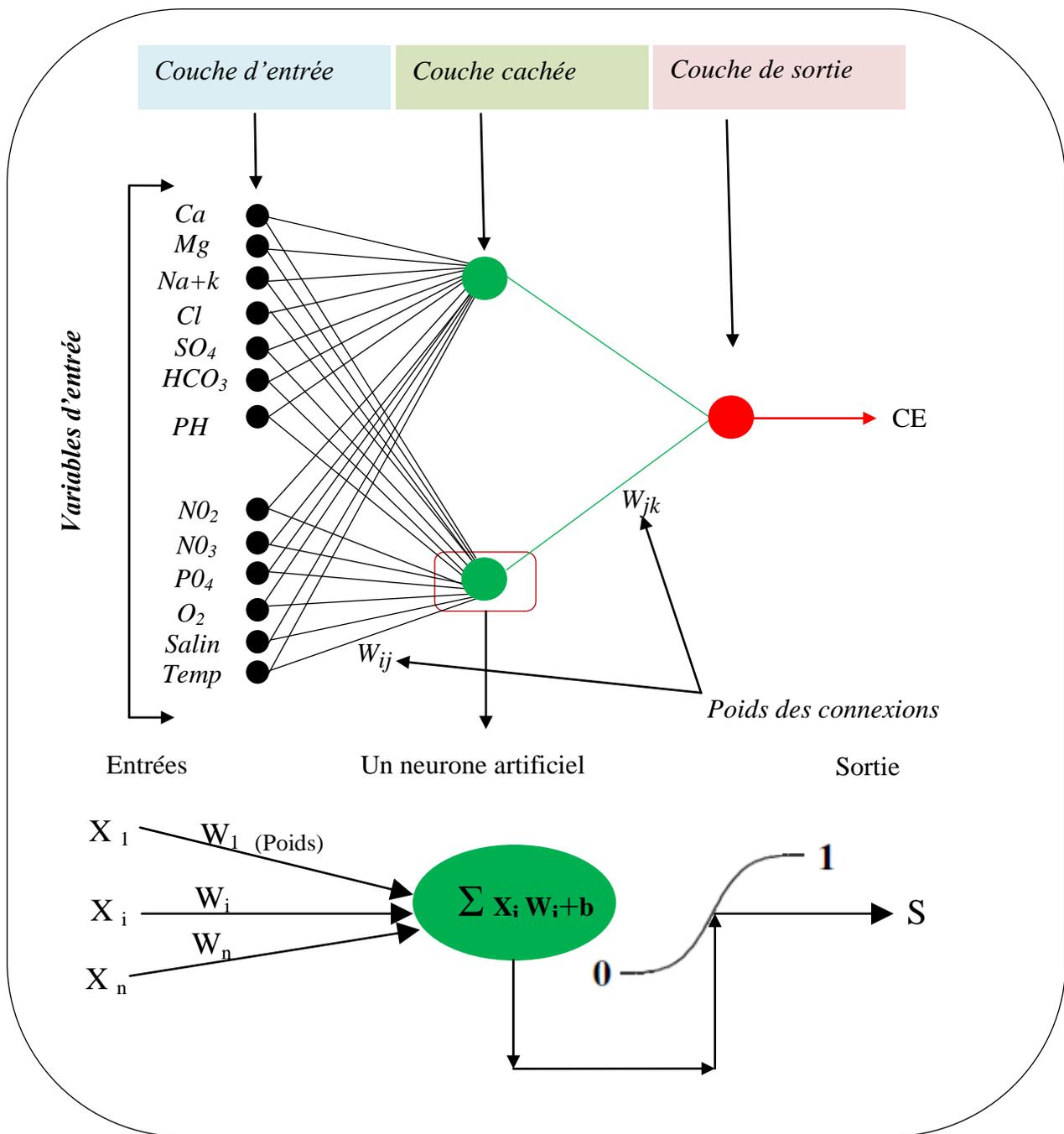


Figure 66: Illustration du réseau à 3 couches (MLP)

Un poids numérique est associé à chacun de raccordements d'entre-nœud. Le poids de W_{ij} représente la force des raccordements des nœuds entre l'entrée et la couche cachée tandis que W_{jk} représente la force des raccordements des nœuds entre la couche cachée et de sortie.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Chaque nœud caché (j) reçoit des signaux de chaque nœud d'entrée (i) qui porte des valeurs standard (X_i) d'une variable d'entrée.

Chaque signal vient à travers une connexion à un poids (W_{ij}).

Le signal entrant net reçu par un nœud caché (Net_j) est la somme de poids des signaux entrants, X_i , et les poids correspondants (W_{ij}), plus une constante reflétant la valeur seuil de nœud (TH_j).

$$Net_j = \sum_{i=1}^n \overline{X}_i W_{ij} + TH_j.$$

Le signal net dans un nœud caché (Net_j) est transféré de sa part à un nœud de sortie (O_j), en utilisant une fonction de transfert non linéaire (f) de type sigmoïde, donnée par l'équation suivante:

$$O_j = f(Net_j) = \frac{1}{1 + e^{-Net_j}}$$

O_j passe comme signal au nœud de sortie (k).

Les signaux nets d'un nœud de sortie (Net_k)

$$Net_k = \sum_{j=1}^n O_j W_{jk} + TH_k$$

Les signaux nets d'un nœud de sortie (Net_k) sont transformés en utilisant une fonction de type sigmoïde à un résultat standard ou de mesure (\overline{OK}) qui est :

$$\overline{OK} = f(Net_k) = \frac{1}{1 + e^{-Net_k}}$$

\overline{OK} : Standard pour produire le résultat de sortie.

$$OK = \overline{OK}(O_{\max}(k) - O_{\min}(k) + O_{\min}(k)).$$

La fonction sigmoïde devrait être continue, différentiable et limitée entre un intervalle de [0, 1]. La figure 67 montre le graphique de la fonction sigmoïde. L'erreur calculée entre la valeur réelle observée et la valeur calculée de la même variable est propagée par le réseau et les poids sont ajustés.

Les processus cycliques de l'alimentation et de la propagation d'erreur sont répétés jusqu'à ce que l'erreur de vérification soit minimale (Liu et *al*, 2003).

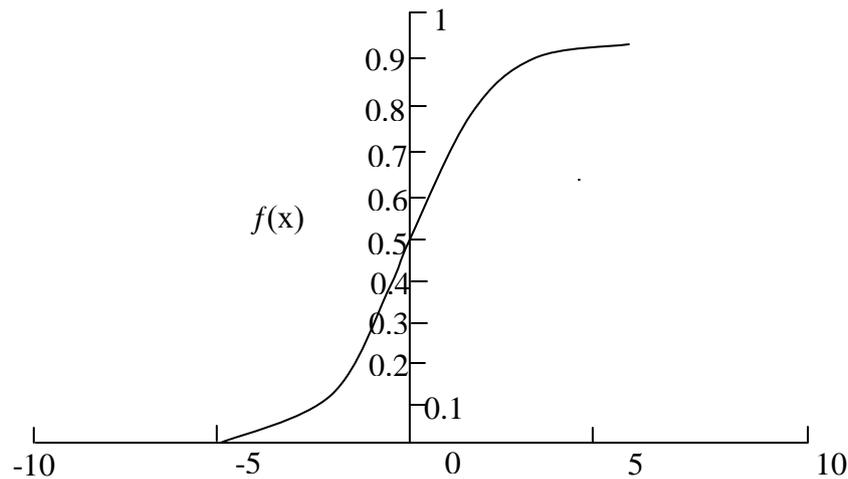


Figure 67 : Fonction de transfert sigmoïde

VI-5- Calibrage et vérification du modèle:

La vérification a été employée pendant l'arrêt des critères de détermination du nombre optimal de nœuds de la couche cachée (Braddock, Kremmer et Sanzogni, 1997) tout en évitant l'excès dans l'apprentissage (Campolo M., Andreussi P. et Soldati A. (1999). La vérification en travers est une technique utilisée généralement en modèles d'ANN, elle a prouvé un impact significatif sur la division des données (Burden, Brereton et Walsh, 1997).

Cette technique vise à former le réseau en utilisant un ensemble de données, et à comparer la performance par rapport à un modèle vérifié non utilisé dans l'apprentissage. Ceci examine la capacité du réseau de généraliser correctement sur l'ensemble des données en observant si l'erreur de vérification est raisonnablement basse.

L'apprentissage sera arrêté quand l'erreur de vérification commence à augmenter (Lallehem et Mania, 2002). Le Modèle a été divisé en sous-ensembles, un pour le calibrage (apprentissage), un pour la vérification en travers du réseau et un pour l'essai (validation). Cinquante pour cent des données ont été choisis pour la formation, 25% pour la vérification et les 25% restant pour examiner la validité de la prévision de réseau.

VI-5-1- Détermination des modèles d'entrées :

Les modèles d'ANN ont la capacité de déterminer quelles entrées sont critiques. Ils sont utiles principalement pour des problèmes complexes où le nombre d'entrées est grand où aucune connaissance *a priori* n'est disponible pour déterminer les entrées appropriées (Lachtermacher et Fuller, 1994).

Dans ce travail, une analyse de sensibilité a été effectuée pour identifier l'importance des variables d'entrée. Ceci a indiqué quelles variables sont considérées les plus utiles pour être maintenues par le modèle RNA.

Les modèles RNA ont également la capacité d'éliminer les variables de basse sensibilité (c'est-à-dire qui n'ont aucun effet significatif sur l'exactitude du modèle).

VI-5-1-1- Résultats et discussion :

Les types de réseaux considérés sont : MLP (3 et 4 couches), RBF, GRNN, et linéaire. Pendant l'analyse, 136 réseaux ont été examinés. Le meilleur modèle optimal du RNA trouvé est le MLP (3 couches) avec 6 noeuds cachés (figure 68).

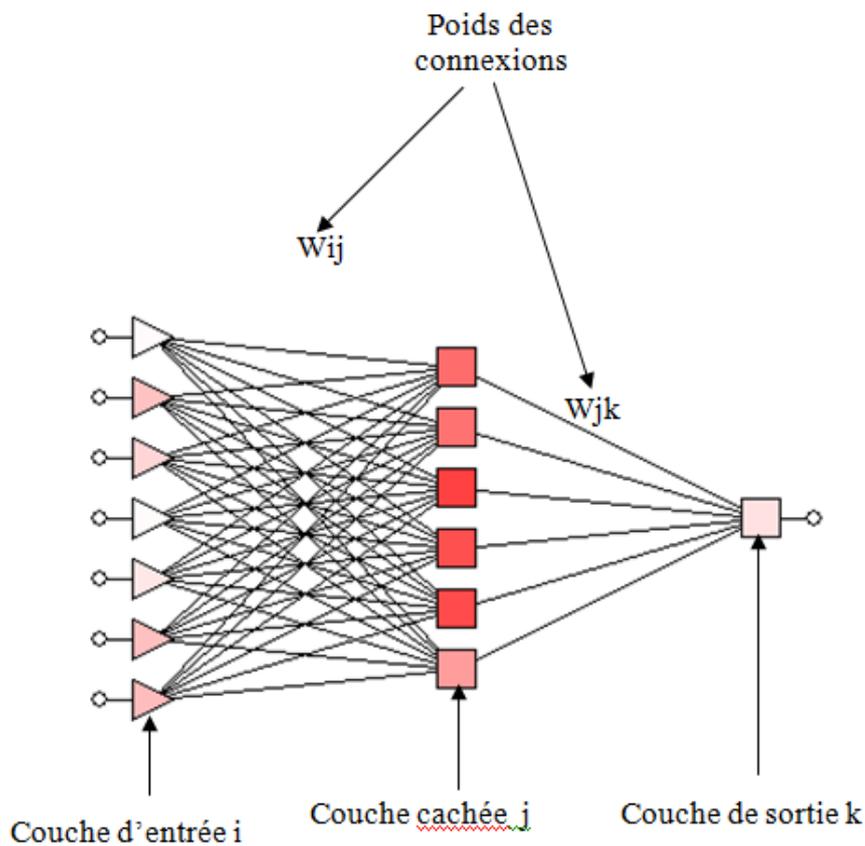


Figure 68: Architecture du modèle RNA

L'erreur minimale est de 0.415411 comparé aux autres types de réseaux RNA (tableau 30).

Type de réseau	Erreur (RMS)
GRNN	5.342581
RBF	3.218885
Linear	3.12599
MLP (4 couches)	1.214852
MLP (3 couches)	0.415411

Tableau 30: L'erreur RMS dans différents réseaux de neurone

Le modèle a une bonne performance dans la vérification avec un rapport de régression de 0.3101913 et un coefficient de corrélation plus haut que 96% pour l'apprentissage, plus de

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

97% pour la vérification et plus de 96% pour la validation (tableau 31); il montre un excellent accord entre la conductivité observée et simulée (Fig. 69)

	Tr. CE	Ve.CE	Te.CE
Data Mean	1669.557	1439.715	1754.244
Data S.D	1490.725	946.632	1470.165
Error Mean	-82.80323	-6.629824	-117.9
Error S.D	805.0477	293.637	777.9584
Abs E. Mean	340.1198	206.4243	317.6422
S.D. Ratio	0.5400379	0.3101913	0.5291639
Correlation	0.9655018	0.9706782	0.9685208

Tableau 31: Paramètres statistiques de régression

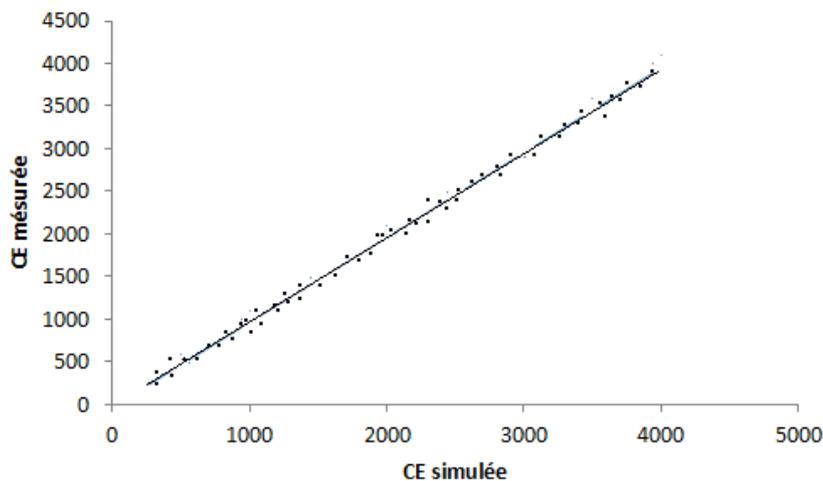


Figure 69 : Corrélation entre la conductivité simulée et mesurée

L'analyse de sensibilité du RNA des variables de qualité de l'eau en phases d'apprentissage et de vérification indique que 8 sur 13 éléments respectivement selon le degré de sensibilité à savoir : sodium (Na^+)+ potassium (K^+), la salinité, les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}), le magnésium (Mg^{2+}),le calcium (Ca^{2+}), le pH et la température sont les facteurs les plus importants influençant la conductivité électrique dans les eaux de surface (Tableau 32).

Tableau 32: Classement des variables par analyse de sensibilité

	Na ⁺ +K ⁺	Salin	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺	pH	Temp
Rank	1	2	3	4	5	6	7	8
Ratio	1,34	1,06	1,026	1,020	1,00	0,996	0,990	0,98

VI-5- Conclusions:

Les résultats obtenus dans cette étude indiquent que ce sont les réseaux de MLP qui s'avèrent être la meilleure structure du RNA pour modéliser et prévoir l'interaction des éléments influençant la qualité des eaux.

L'originalité de ce travail de modélisation réside dans l'utilisation des réseaux neuronaux (approche connexionniste) qui sont fondés sur des modèles qui tentent d'établir des relations entre les paramètres d'entrée et de sortie par interconnexions des neurones.

L'intérêt de ces modèles réside dans leur capacité d'apprendre des relations complexes à partir de données numériques. C'est pourquoi le choix et l'application d'un modèle neuronal demeure un domaine de recherche très actif contrairement aux modèles stochastiques classiques.

Chapitre VII
POLLUTION DES EAUX DU LAC
FETZARA

Chapitre VII
POLLUTION DES EAUX DU LAC FETZARA

VII-1- Introduction :

VII-1-1- Origine et devenir des métaux dans l'environnement

a- Apports telluriques naturels : érosion, transport, sédimentation

Les métaux sont présents dans tous les compartiments de l'environnement, mais en général en quantités très faibles (en traces). Néanmoins, des concentrations importantes peuvent être mesurées dans certains sites. L'érosion de l'écorce terrestre est susceptible d'enrichir les cours d'eau en éléments métalliques. Les roches sont altérées et désagrégées par l'action mécanique de l'érosion (agents météoriques) et par l'attaque des acides formés dans l'atmosphère (acide carbonique) ou issus de la décomposition de la matière organique (acides humiques).

Les métaux fixés dans les roches sous forme d'oxydes ou de silicates sont peu altérables chimiquement : les oxydes et silicates métalliques sont libérés de la roche par érosion et transportés sous forme de particules. Les métaux présents dans les roches sous forme de sulfures et de carbonates sont au contraire attaqués chimiquement et très facilement dissous dans l'eau.

L'eau transporte en aval les débris rocheux et les divers sels mis en solution. En plaine, lorsque le courant de l'eau devient insuffisant pour assurer le transport des particules rocheuses, celles-ci s'accumulent dans le lit du cours d'eau : il y a sédimentation.

Erosion, transport et sédimentation sont fonction du débit de l'eau et de la taille des particules. Dans les conditions environnementales, les métaux sont relativement peu solubles dans l'eau et restent majoritairement associés à la phase solide. Les concentrations en éléments métalliques dans la phase aqueuse sont comparativement bien moindres par rapport à celles dans la phase solide.

Les particules solides sont plus ou moins riches en éléments métalliques selon la nature géologique du terrain dont elles sont issues. Quatre fractions minéralogiques majeures peuvent être distinguées : carbonates (calcaires), quartz (silices), argiles (aluminosilicates), matière organique.

Les métaux dissous dans l'eau, notamment ceux apportés ultérieurement par l'activité humaine, ont tendance à s'adsorber à la surface des particules en suspension. Ces métaux

adsorbés peuvent être remis en solution en cas de changements des conditions physico-chimiques du milieu. L'adsorption sur les particules dépend de la surface exposée et donc de la granulométrie du sédiment. Plus les particules sédimentaires sont petites et plus la surface de contact avec le milieu est importante. Les métaux s'adsorbent en particulier très facilement sur les argiles, très fines particules d'aluminosilicates. L'adsorption est également favorisée lorsque les concentrations en matière organique sont élevées. Par ailleurs des apports naturels se font par la voie atmosphérique: volcanisme, érosion et transport éoliens de poussières, transport d'aérosols d'origine océanique, feux de forêts, etc.

b- Apports anthropiques

Du fait de leurs propriétés physiques intéressantes (bons conducteurs de chaleur et d'électricité, caractéristiques de dureté, de malléabilité, possibilités d'alliages, propriétés catalytiques, etc.) les métaux sont très largement utilisés par l'homme. Cette utilisation n'a apporté aucun changement quant aux quantités de métaux présentes sur Terre : l'activité humaine ne crée ni ne détruit des éléments métalliques. En revanche, elle modifie très significativement leur répartition et les formes chimiques sous lesquelles ils sont présents dans l'environnement. Les gisements et les filons métallifères sont exploités, parfois de très longue date. Mais l'activité minière peut être à l'origine d'une dispersion des métaux dans l'environnement. Les eaux souterraines peuvent être contaminées via les eaux de ruissellement.

L'industrie est toujours responsable de la majorité des rejets directs dans l'eau.

Les rejets associés à la mise en décharge ou à l'incinération des produits arrivés en fin de vie sont également notables : par exemple pour le plomb et le cadmium dans les piles, batteries et accumulateurs; pour le mercure dans les instruments de mesure (thermomètres, baromètres).

Les activités agricoles sont également à l'origine d'une contamination de l'environnement. Le sulfate de cuivre (bouillie bordelaise) est utilisé pour traiter les vignes et les arbres fruitiers.

L'arséniate de plomb ou des dérivés mercuriels ont été utilisés dans le passé comme pesticides.

Certains engrais, fabriqués à partir de minerais riches en phosphates, peuvent aussi avoir de fortes concentrations en cadmium présent en impureté. Les boues des stations d'épuration, les

composts d'ordures ménagères ou le lisier utilisé pour amender les surfaces agricoles sont également susceptibles d'être contaminés par les métaux.

Certaines utilisations posent encore des problèmes particuliers : par exemple, dispersion des plombs de chasse, usure des pneus (le zinc, accompagné du cadmium comme impureté, est utilisé comme durcisseur pour la fabrication des pneus).

VII-1-2- Devenir des métaux dans l'eau :

Les différentes formes chimiques sous lesquelles peuvent être retrouvés les métaux, dépendent des caractéristiques physico-chimiques du milieu. Par exemple, les métaux dissous peuvent précipiter en cas de changements de pH ou de conditions redox, ce qui peut être le cas au niveau des zones de confluences de cours d'eau par exemple.

A mesure que le cours d'eau grandit, la concentration en carbone organique dissous augmente. Ceci permet la formation de complexes stables entre les métaux et la matière organique. Par ailleurs, par l'activité bactérienne, les conditions peuvent devenir anoxiques et réductrices ; les métaux tendent alors à précipiter sous forme de sulfures métalliques. C'est également dans ces conditions réductrices que le mercure est méthylé par les bactéries réductrices de sulfate. Le mercure méthylé est très fortement accumulé par les organismes vivants. Le cas particulier du devenir des métaux dans les eaux saumâtres et salées des estuaires et du milieu marin, peut poser des problèmes particuliers de pollution. Ainsi nous avons prudemment déterminé que, le lac est alimenté à partir des eaux charriées par les Oueds (Mellah, Hout et Zied) et par les écoulements de surface. Ce qui laisse présager un apport d'eau de différentes qualités. Nous rappelons brièvement le contexte d'emplacement du lac dans l'optique de mettre en évidence un risque de pollution.

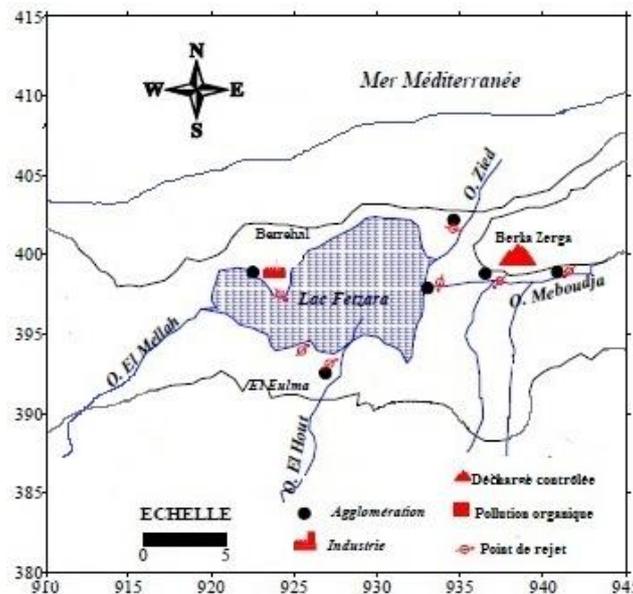


Figure 70: Schéma montrant la relation du lac avec les sources de pollution. (In Zenati, 2010, modifiée)

Le précédent schéma montre que le lac reçoit différents polluants :

- dans sa partie Ouest le lac reçoit les eaux en provenance de Berrahal. Cette ville est située en amont du lac donc, les eaux de toutes natures (industrielles, urbaines...) s'écoulent vers le lac et vont augmenter la charge polluante.

- dans sa partie Est le lac reçoit les eaux en provenance de la grande décharge Berka Zerga, qui reçoit les déchets de la ville d'Annaba. Les Lixiviats issues de la décharge vont polluer les eaux et les sols. Toujours dans sa partie Est, le lac reçoit les eaux de l'Oued Zied, ce dernier charrie les eaux usées de l'agglomération portant son nom.

Ces eaux transitant par le lac subissent des modifications et à leur sorties elles se déversent dans l'Oued Meboudja. Pour comprendre les mécanismes régissant cette pollution, nous nous sommes intéressés aux travaux réalisés sur cette zone.

VII-1-3- Etat de la pollution des eaux à l'entrée du Lac :

a- Dans la zone Ouest

Pour réaliser notre travail, nous avons pris en considération les résultats des travaux réalisés par Hakim Khalfaoui (2007) et Habiba Majour (2010). Ces deux chercheurs ont démontré la présence d'une double contamination des eaux du lac par les apports issus de la ville de Berrahal :

a-1- Une contamination par les éléments majeurs :

Beaucoup d'industries en particulier celles de l'agro-alimentaire, génèrent des effluents salins à forte proportion de chlorures, de sulfates et de matières organiques complexes à traiter. Ces effluents salins ne présentent pas l'image de toxicité qui est attachée à d'autres composés notamment certains métaux lourds. Cependant, à forte concentration on ne doit pas les occulter, car ils provoquent des perturbations influençant négativement la faune et la flore locales. De plus, ils induisent la salinisation d'aquifères altérant ainsi la qualité de ces précieuses ressources.

a-2- Contamination par les éléments traces métalliques (ETM) : cuivre, fer, plomb, nickel,...

a-2-1- Synthèse des résultats sur la contamination des eaux souterraines (in Majour 2010) :

L'analyse de la répartition spatiale des concentrations de quelques éléments majeurs et traces, montre que la ressource en eaux souterraines de la région de Berrahal est soumise à une pression anthropique ayant pour conséquence la dégradation de sa qualité physicochimique. La présence de teneurs élevées en chlorures, sulfates et en DBO5, dans les eaux de certains captages, les rendent impropre à la consommation. De plus, en se référant aux normes de potabilité fixées par l'OMS (2002), on constate que l'ensemble des puits et forages analysés présente des teneurs en plomb, fer et nickel relativement élevés, voire même inadmissibles, pour des eaux destinées à la consommation. L'analyse des cartes de distribution spatiale de ces EMT a mis en évidence cette contamination. En effet, on constate que le seuil de ces EMT est plus élevé au niveau des puits et forages proches des rejets industriels, témoignant ainsi d'une contamination directe, par infiltration et diffusion à travers le sol. Les métaux lourds, fer, plomb et nickel, sont reconnus pour leur toxicité et leur exposition permanente présente un danger sérieux sur la santé de la population locale.

Par ailleurs, la dispersion des matières polluantes est liée à la faible profondeur de la nappe et la topographie du terrain, qui favorisent le drainage de la pollution dans le sens de l'écoulement souterrain. De ce fait, l'eau de ces captages présente un potentiel toxique la rendant impropre à tout usage domestique.

Par ailleurs la caractérisation physico-chimique des eaux de rejets a montré que la zone industrielle est une véritable source de pollution des eaux souterraines. En effet, les eaux

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

usées déversées par les différentes industries, véhiculent une importante charge polluante minérale, organique et métallique.

- La minéralisation au niveau des rejets est également importante et peut être utilisée comme traceur de contamination anthropique dans la nappe sous-jacente. La charge minérale dans les eaux est déterminée essentiellement par de fortes teneurs en chlorures (abondamment utilisés comme désinfectant).
- Les rejets des eaux usées de l'industrie agro-alimentaire sont marqués par des teneurs de la demande biochimique en oxygène (DBO₅) très élevées pouvant atteindre 419,37 mg/l.

Les résultats d'analyses physico-chimiques obtenus ont mis en évidence une pollution des eaux liée essentiellement à l'activité industrielle, notamment par certains éléments majeurs et métaux lourds. En sus de la charge polluante contenue dans les rejets, la contamination de l'aquifère est accentuée par les conditions géologiques et hydrogéologiques du site (terrains alluvionnaires à perméabilité assez bonne, faible profondeur du niveau piézométrique, épaisseur de la zone non saturée et sens de l'écoulement de la nappe).

L'impact de l'activité agricole sur ces eaux est mis en évidence par l'évaluation relative des teneurs en nitrites (NO₂). Alors que, la contamination organique est identifiée par les mesures de la demande biochimique en oxygène (DBO₅). Cette charge organique (exprimée par la DBO₅) est importante dans les points d'eau situés à proximité des rejets des industries agro-alimentaires.

L'état de contamination des eaux souterraines par les métaux lourds. Cette pollution métallique est mise en évidence par une teneur moyenne anormalement élevée (> normes OMS), sur la majorité des points d'eaux analysés pour le fer, le plomb et le nickel. Alors que le cuivre présente une concentration moyenne à la limite de tolérance. Cependant, les plus fortes concentrations en ces éléments ont été observées dans les puits et forages situés à proximité des rejets des unités industrielles Naftal et Protuil. L'analyse des cartes de répartition du niveau de pollution de la nappe pour les métaux lourds dosés, montre, que plus les puits et forages se rapprochent des rejets industriels, plus ils deviennent vulnérables à une éventuelle contamination.

b- Dans la zone Est :

Les travaux réalisés par Foufou Atif, ont porté sur l'impact de la décharge Berka Zerga. Les résultats obtenus ont mis en évidence la présence d'un gradient de contamination métallique amont-aval dans les eaux de la nappe. Les polluants sont présents à des concentrations d'importance variable d'un point de prélèvement à l'autre. La globalité des résultats montre que les points de prélèvement situés à proximité de la décharge ont révélé une contamination significative par les métaux lourds. En revanche, les points de prélèvements localisés au nord-ouest de la plaine, ne témoignent d'aucune pollution importante par ces métaux.

Le degré de pollution est tributaire des variations saisonnières des précipitations. L'augmentation des teneurs en éléments toxiques, pendant la période de hautes eaux est favorisée par le lessivage des déchets de la décharge, le drain et l'infiltration des eaux superficielles.

L'absence, dans la quasi-totalité des cas, de traitement préalable des rejets urbains et industriels serait en grande partie responsable de la contamination des eaux souterraines de la région par les métaux lourds. Les Lixiviats de la décharge contribueraient à la pollution métallique, d'autant plus que la décharge, n'est pas conçue selon les normes d'une décharge contrôlée : système d'étanchéité, collecteur de biogaz et de Lixiviats.

Les eaux souterraines de la région sont impropres à la consommation humaine. Elles indiquent une pollution par les métaux lourds (le plomb, le chrome et le fer).

Ces eaux convergent vers le lac Fetzara accentuant ainsi sa pollution.

VII-1-4- Etat de la pollution des eaux à la sortie du Lac :

Les travaux utilisés ne portent pas sur la sortie du lac mais sur la qualité des eaux de l'Oued Meboudja, ainsi L Djabri (1996), TH Debieche (2002), A Hani (2003), H Zerrouki (2007) W Hamzaoui (2007), N. Bougherira (2008), ont successivement démontré une pollution des eaux de l'Oued, cette dernière est entraînée par les rejets urbains et surtout industriels. Cependant, cette pollution peut également provenir du lac. Nous avons réalisé des prélèvements dont les analyses ont porté sur quelques métaux lourds à l'entrée et à la sortie du Lac. Les analyses ont été effectuées au laboratoire de chimie minérale de l'université de Lille 1 (France).

a- Devenir des polluants à l'entrée et à la sortie du Lac :

Le comportement et le devenir des substances chimiques dans l'eau dépendent de leurs propriétés chimiques et physiques. Ces propriétés varient énormément selon la structure de la molécule. Des composés peuvent être très peu persistants, peu toxiques et rester immobiles et donc peu susceptibles de présenter un risque pour l'environnement. Par contre, il y a des composés persistants, mobiles et toxiques.

Le comportement dans l'eau et l'exposition sont des facteurs néfastes.

Certaines substances peuvent être très persistantes (c'est-à-dire, présentant des demi-vies (t_2) supérieures à 6 mois). La nature de cette persistance doit être précisée. Déterminer le temps que le polluant met avant d'être décomposé ou dégradé en d'autres substances moins dangereuses. La dissipation est la disparition d'une substance résulte d'au moins deux processus, soit la dégradation et la mobilité. La dissipation n'est pas une mesure appropriée de la persistance, car la mobilité d'une substance peut faire en sorte qu'elle soit simplement transportée ailleurs, à des endroits où elle peut exercer des effets néfastes si sa concentration atteint un seuil critique.

Ainsi, le polluant sera largué donc, il va sortir du lac et aller vers l'Oued Meboudja, il pourra également être adsorbé ou absorbé.

b- Mécanismes d'Adsorption :

L'adsorption est un phénomène physique de fixation de molécules sur la surface d'un solide. Ce phénomène est utilisé pour "récupérer" des molécules indésirables de fluide (liquides ou gazeuses) dispersées dans un solvant. La fixation provient de l'établissement, entre le solide et les molécules, de liaisons de Van Der Waals (liaisons de type électrostatique de faible intensité, avec des énergies d'interaction entre 5 et 40 kJ/mol)

On parle aussi d'adsorption physique, pour la différenciée de l'adsorption chimique qui met en jeu des forces de plus grande intensité (du type liaison covalente) et qui modifie la structure moléculaire du soluté (contrairement à l'adsorption physique), ce qui rend en général le processus irréversible.

La relation empirique de Freundlich relie la pseudo-concentration à la surface du solide à la concentration dans la phase porteuse fluide.

A l'équilibre, on a : $X/M = K c^{(1/n)}$

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Avec : **X/M** masse de soluté adsorbée par unité de masse d'adsorbant
c : concentration de soluté à l'équilibre
K et **n** sont des constantes énergétiques.

Remarque : à T=constante il s'agit d'isothermes de Freundlich.

L'adsorption est favorisée :

- pour l'adsorbant, par une faible granulométrie (la taille des grains doit être proche de la taille moléculaire), donc une grande surface spécifique (la surface accessible aux solutés doit être maximale),
- pour l'adsorbé, une masse moléculaire élevée.

c- Mécanismes de l'absorption :

L'absorption est la rétention d'un composé à l'intérieur d'un solide. L'absorption est un phénomène de sorption qui consiste à lier une molécule (dite : absorbée) à une autre, ce qui entraîne sa disparition par transformation ou modification chimique. Contrairement à l'adsorption, le phénomène d'absorption a pour effet de modifier la molécule absorbée est dégradée et disparaît, elle n'est donc plus en suspension dans le solvant

L'absorption correspond au lavage du gaz par une solution liquide souvent aqueuse. Cette opération permet de transférer les polluants de la phase gaz vers la phase liquide. Le transfert des polluants sera lié à la fois aux mécanismes diffusionnels et aux mécanismes réactionnels.

d- Paramètres analysés :

Les analyses ont porté sur les paramètres, ci-après Ti (Titane), As (Arsenic), Mo (Molybdène), Se (Sélénium), Sb (Antimoine), Zn (Zinc), Pb (Plomb), Co (Cobalt), Be (Béryllium), Fe (Fer), Mn (manganèse), Cr (Chrome), V (Vanadium), Cu (Cuivre), Ni (Nickel), Sr (Strontium), Li (Lithium), plus les éléments majeurs et la conductivité électrique (mesurée in situ).

d-1- Analyse des résultats d'ensemble :

Pour réaliser notre travail, nous avons considéré les ETM à l'entrée et à la sortie du lac. Afin de procéder à la critique des résultats obtenus, nous avons comparé les résultats obtenus aux valeurs seuils (normes), indiquant une pollution. Les résultats de la comparaison sont reportés dans le tableau suivant :

Tableau 33: résultats de la comparaison.

N°	Polluant considéré	Norme (mg/l) OMS	Concentration déterminée	Observation
1	Ti (Titane)	?	<0.01	Pas de pollution
2	As (Arsenic)	0.05	1.11	Pollution
3	Mo (Molybdène)	0.01	<0.005	Pas de pollution
4	Se (Sélénium)	0.02	<0.001	Pas de pollution
5	Sb (Antimoine)	De l'ordre du µg/l	<0.02	Pollution
6	Zn (Zinc)	0.5	0.17	Pas de pollution
7	Pb (Plomb)	0.05	0.18	Pollution
8	Co (Cobalt)	0.05	0.005	Pollution
9	Be (Béryllium)	0.1	0.001	Pas de pollution
10	Fe (Fer)	0.3	4.7	Pollution
11	Mn (Manganèse)	0.1	0.0005	Pas de pollution
12	Cr (Chrome)	0.05	< 0.005	Pas de pollution
13	V (Vanadium)	2.0	0.12	Pas de pollution
14	Cu (Cuivre)	0.2	0.085	Pas de pollution
15	Ni (Nickel)	0.02	0.005	Pas de pollution
16	Sr (Strontium)	8 (en eau de mer)	0.55	Pollution
17	Li (Lithium)	2.5	0.09	Pas de pollution
18	Cd (cadmium)	0.005	0.017	Pollution

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

L'observation du précédent tableau, montre que les ETM, présent dans l'eau dépassent rarement les seuils tolérés, ce qui semble indiquer une absence de pollution. Les ETM, indiquant des concentrations supérieures à la norme sont : As (Arsenic), Sb (Antimoine), Pb (plomb), Co (cobalt), Fe (Fer), Sr (Strontium) et Cd (cadmium). Ces éléments sont présents dans l'eau mais à des concentrations variables. Pour définir cet état de pollution, nous allons réaliser deux ACP, la première portera sur les ETM, seuls ce qui nous permettra de déduire leur origine. La seconde portera sur les liens pouvant exister entre les ETM et la conductivité électrique. Ce choix est dicté par les changements de la minéralisation observés lors du précédent chapitre, ce qui reviendrait à déterminer les liens éventuels qui existeraient entre la minéralisation et les ETM.

VII-1-5- Origines des ETM, dans les eaux à l'entrée et à la sortie du Lac :

Pour déterminer les origines des eaux, nous avons réalisé deux ACP, la première concerne uniquement les ETM, par contre la seconde prend en considération la conductivité, ce qui nous permettra de déterminer le lien entre les ETM et la minéralisation.

VII-1-5-1- ACP des ETM lourds sans conductivité électrique:

Nous avons, réalisé une ACP, dont la matrice est constituée de 6 variables (As, Sb, Pb, Co, Fe et Sr) et 16 analyses (individus)

a- Matrice de corrélation :

Tableau 34 : Matrice de corrélation, ACP sans CE.

	As	Sb	Pb	Co	Fe	Sr
As	1					
Sb	0,13	1				
Pb	0,003	0,22	1			
Co	0,097	0,027	0,21	1		
Fe	0,24	0,33	0,22	-0,34	1	
Sr	-0,36	-0,16	0,37	0,11	0,036	1

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

L'observation du tableau 34, montre que les valeurs du coefficient de corrélation sont soit positives soit négatives. Ce qui met en évidence des corrélations inverses. Notons que le nombre d'échantillon étant de 16, ce qui donne un coefficient de corrélation acceptable $r=0.7$, nous remarquons une absence de corrélation significative entre les éléments.

b- Analyse du cercle ACP (fig. 71):

L'observation du cercle ACP, formé par les axes F1F2 (53 %) de l'information, montre selon F1 (28%), une opposition entre les eaux polluées par As, Fe, Pb et Sb, caractérisant la partie négative de l'axe F1 et le reste des ETM, c'est-à-dire Co et Sr, occupant la partie positive de l'axe F1. l'axe.

Selon l'axe vertical F2 (25%), on remarque une opposition entre les eaux polluées par As (Arsenic), la partie négative de l'axe F2, montre que la pollution des eaux est hétérogène car provoquée par le reste des ETM, c'est-à-dire Sb (Antimoine), Pb (plomb), Co (cobalt), Fe (Fer), Sr (Strontium) et Cd (cadmium).

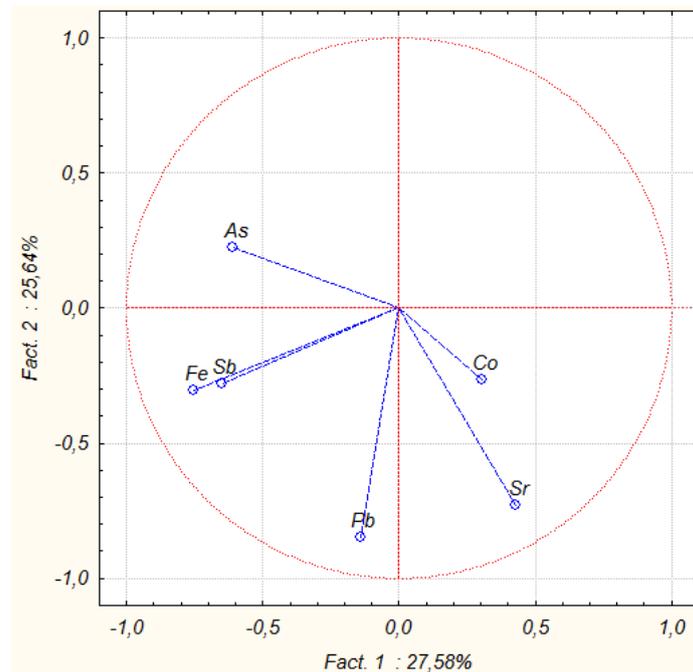


Figure 71: Cercle ACP, sans CE.

VII-1-5-2- ACP ETM avec conductivité électrique :

Nous avons, réalisé une ACP, dont la matrice est constituée de 7 variables (As, Sb, Pb, Co, Fe, Sr et Ce (Conductivité)) et 16 analyses (individus)

a- Matrice de corrélation :

Tableau 35: Matrice de corrélation, ACP avec CE

	CE	As	Sb	Pb	Co	Fe	Sr
CE	1						
As	-0,13	1					
Sb	-0,35	0,13	1				
Pb	0,14	0,005	0,22	1			
Co	0,21	0,09	0,027	0,21	1		
Fe	-0,08	0,24	0,33	0,22	-0,34	1	
Sr	0,74	-0,36	-0,16	0,37	0,11	0,036	1

L'observation du tableau 35, montre que les valeurs du coefficient de corrélation sont soit positives soit négatives. On remarque que le Sr et la conductivité avec un coefficient de corrélation $r = 0.7$, se corrélaient presque bien, ce qui laisse supposer une origine géologique de la salinité. Pour les autres éléments, on n'a des coefficients faibles.

b- Analyse du cercle ACP (fig. 72):

L'observation du cercle ACP, formé par les axes F1F2 (53.5%) de l'information, montre selon F1 (31%), une opposition entre les eaux fortement polluées par As, Sb et Fe, ces eaux occupent la partie négative de l'axe par contre la partie positive de l'axe indique une pollution des eaux par le Co, le Pb, le Sr et la conductivité. et les eaux faiblement polluées occupant la partie négative de l'axe.

Selon l'axe vertical F2 (22.70%), on remarque une opposition entre les eaux polluées par As, Sb, Pb, Co, Fe, Sr et Ce, occupant la partie négative de l'axe F2 et les eaux non polluées occupant la partie positive de l'axe

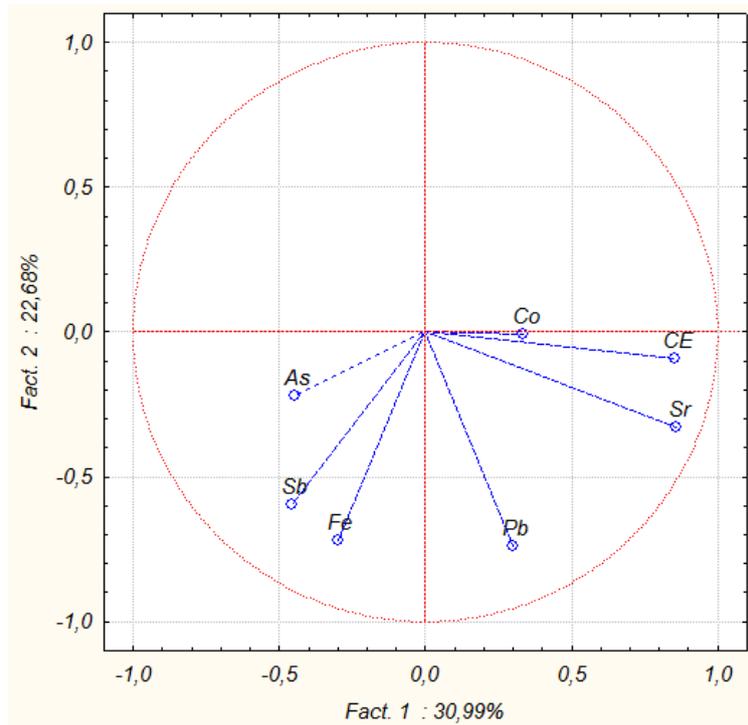


Figure 72: Cercle ACP, avec CE.

La comparaison des deux ACP, nous permet de déduire que l'origine des ETM est liée à l'action anthropique, elle ne dépend pas de la salinité, cette dernière a une origine naturelle, confirmée par la valeur du coefficient de corrélation liant le strontium à la conductivité. Par ailleurs les faibles teneurs des ETM, dosés corrobore cette hypothèse. Pour confirmer ou infirmer cette hypothèse, nous nous sommes intéressés aux ETM, au niveau de l'Oued Meboudja. Pour réaliser ce travail, on a utilisé les données fournies par la DRA.

VII-1-6- Les ETM au niveau de l'Oued Meboudja :

a- Choix des sites étudiés :

Le choix des points de prélèvements est basé sur le rapport de l'Oued Meboudja avec son environnement (rejets industriels et urbains). Les prélèvements des échantillons spécifiques à l'analyse des métaux sont effectués en respectant les protocoles de prélèvements. Les points prélevés sont reportés sur la figure 73.



Figure 73: Emplacement des points de prélèvement sur l'Oued Meboudja.

b- Variations des concentrations des ETM, au niveau des sites :

Dans les eaux de l'Oued Meboudja, les prélèvements des échantillons ont été effectués en cinq points (figure 73) notés S₁, S₂, S₃, S₄ et S₅.

- S₁ : zone de prélèvement située en aval de l'agglomération de Derradji Redjem et en amont du complexe sidérurgique d'El-Hadjar;
- S₂ : zone de prélèvement située au voisinage de l'entrée de la station d'épuration du complexe sidérurgique d'El-Hadjar;
- S₃ : zone de prélèvement située en aval de la zone industrielle de Chaiba;
- S₄ : zone de prélèvement située en aval de la zone industrielle de Pont Bouchet;
- S₅ : zone de prélèvement situé en amont de l'embouchure des deux oueds Meboudja et Seybouse.

La figure présentée ci-dessous montre d'une part que la zone située au niveau du point S₂ est la plus atteinte par la pollution en éléments considérés et d'autre part que cette contamination est plus marquée durant les basses saisons.

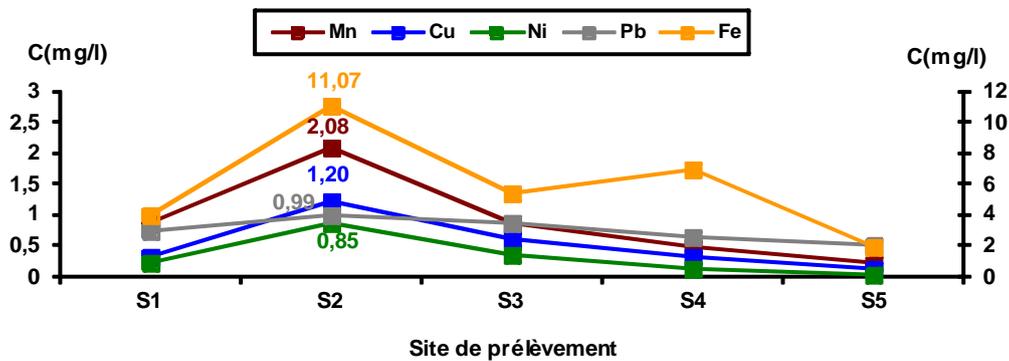


Figure 74: Variations des teneurs moyennes annuelles des ETM dans les eaux de l’oued Meboudja suivant les sites considérés.

La précédente figure, montre que les teneurs augmentent en allant vers la station S₂ et commence à diminuer au-delà de cette zone dans le sens d’écoulement, c’est à dire en direction de l’Oued Seybouse à l’exception du fer, où, sa concentration augmente une seconde fois aux alentours du site S₄ compte tenu de la présence de l’industrie de transformation sidérurgique. Cette situation met en évidence un piégeage par les sédiments de quelques ETM.

VII-1-7- Conclusion :

La partie consacrée aux origines de la pollution des eaux alimentant ou sortant du Lac Fetzara, a montré que les ETM arrivés au lac stagne dans ce dernier, ces mêmes ETM, auraient une origine anthropique, ils n’ont aucun lien avec la minéralisation. Par ailleurs au niveau de l’Oued Meboudja, on note de fortes concentrations des ETM au droit des rejets par contre en s’éloignant il y a une baisse des concentrations de quelques ETM, cette dernière s’explique par le piégeage par les sédiments de ces ETM.

Conclusions générales

Conclusions générales

Le travail réalisé est une contribution à l'explication des origines de la salinité des eaux du lac Fetzara. Pour atteindre cet objectif les parties suivantes ont été développées :

La description des formations géologiques à l'affleurement a montré la présence de deux types de formations :

*les formations métamorphiques présentent essentiellement au niveau du massif de l'Edough et ses environs, constituant ainsi la limite nord du lac,

*les formations sédimentaires occupant le reste de la zone d'étude.

Cette situation fait que les eaux aboutissant au lac auront des compositions chimiques dépendant des formations traversées.

Le climat peut également influencer la minéralisation des eaux, ce qui explique l'intérêt accordé à ce paramètre et à ses composantes. L'étude réalisée a montré que le climat de la zone d'étude est méditerranéen caractérisé par une pluviométrie avoisinant les 600 mm/an réparti selon deux saisons une humide et l'autre sèche au cours de cette dernière le taux d'évapotranspiration est très élevé dépassant le total des précipitations mettant en évidence un déficit au cours de l'année pluviométrique accentuant donc le phénomène de salinité des eaux. Par ailleurs les termes du bilan calculés montrent une infiltration efficace oscillant entre 62 mm/an à la station de la Chaffia et 152 mm/an à la station de pont Bouchet, le ruissellement est important avoisinant 100 mm/an aux stations des salines et pont Bouchet par contre il est de 190 mm/an à la Chaffia. Ces chiffres donnent des indications sur les apports. Ces derniers aboutissent au lac par les oueds HOUT, MELLAH et ZIED, les jaugeages réalisés montrent des débits importants particulièrement au cours des mois pluvieux. Ceci se traduit par des apports considérables au lac et aux nappes environnantes causant des changements de la qualité de leurs eaux.

Le chapitre consacré à la chimie des eaux met en évidence une variation de la conductivité dans le temps et dans l'espace. Les eaux atteignant le lac proviennent de divers horizons comme décrit précédemment, pour avoir un comprendre les mécanismes d'acquisition du chimisme des eaux, nous avons jugé utile d'étudier par le biais de l'analyse en composantes principales le chimisme des eaux au niveau des trois oueds alimentant le lac.

L'eau ne dort jamais, sauf quand elle est de glace, et encore ... ?

Les résultats obtenus par la méthode statistique montre que la salinité des eaux est soit engendrée par le NaCl ou par HCO_3Ca , ce résultat est confirmé par l'étude des rapports qui confirme le lien étroit entre la conductivité et ces éléments.

Les apports d'eau au lac étant importants nous avons réalisé des mesures de conductivité au sein même du lac, les résultats obtenus montrent une salinité croissante augmentant avec la profondeur mettant en évidence une interaction entre la matrice argileuse constituant le fond du lac et l'eau.

La salinité des eaux du lac Fetzara a une double origine :

Une première endogène causée par la matrice argileuse provoquant la stratification décrite au préalable,

La seconde exogène entraînée par les réactions eau-roche se produisant lors des écoulements des eaux de surface. Ces réactions seraient à l'origine de :

- l'hydrolyse,
- la dilution,
- la précipitation.

La contribution dans la salinité de tous ces facteurs a été confirmée par plusieurs auteurs.

L'originalité de la modélisation réside dans l'utilisation des réseaux neuronaux (approche connexionniste) qui sont fondés sur des modèles qui tentent d'établir des relations entre les paramètres d'entrée et de sortie par interconnexions des neurones.

L'intérêt de ces modèles réside dans leur capacité d'apprendre des relations complexes à partir de données numériques. C'est pourquoi le choix et l'application d'un modèle neuronal demeure un domaine de recherche très actif contrairement aux modèles stochastiques classiques.

La partie de la pollution des eaux alimentant ou sortant du Lac Fetzara, a montré que les ETM arrivés au lac stagne dans ce dernier, ces mêmes ETM, auraient une origine anthropique, ils n'ont aucun lien avec la minéralisation. Par ailleurs au niveau de l'Oued Meboudja, on note de fortes concentrations des ETM au droit des rejets par contre en s'éloignant il y a une baisse des concentrations de quelques ETM, cette dernière s'explique par le piégeage par les sédiments de ces ETM.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- **Abba E. et al., 2008.** Contribution à l'étude physico-chimique de l'écosystème lacustre Dayet Aoua au Maroc. Revue Afrique Science, 04(2), pp. 306-317.
- **Achour F. 1997.** Condition hydrogéologiques et disponibilité en eau en région semi-aride : Application de méthodes nouvelles au bassin du Chéelif, Algérie. Thèse de Doctorat. Université de Franche-Comté, 261p.
- **AFNOR, 1992.** Dictionnaire de l'environnement – les termes normalités, Association Française de Normalisation.
- **Ahmed-Said Y. & Leake, 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.
- **Aissa et al., 1995.** Alpine metamorphic core complexes and metallogenesis : the Edough case (N.E. Algeria). In : PAsa, J., Kribek, B. and Zak, K. (Eds), Mineral deposits : from their origin to their environmental impacts. Belkema, Rotterdam. pp 23-26.
- **Aissa et al., 1998.** 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 faisabilité d'un projet d'aménagement agricole de la région périphérique du lac Fetzara. Ag. Jap. Coop. Inter. Volume 3
- **Anonyme, 1967.** Analyse des caractéristiques du territoire - objet de l'étude, valeur agricole des plaines côtières d'Annaba. Rapport Ifagraria.
- **Anonyme, 1980.** Agriculture dans la wilaya d'Annaba. Situation actuelle et perspective. (D.D.A.R.A.)
- **Anonyme, 1985.** Schéma d'utilisation des ressources hydrauliques de la région d'Annaba. Mission I et II. SELKHOZPROMEXPORT de l'URSS. Direction générale de la planification et d'études d'aménagement. Alger, 197 p.
- **Anonyme, 1985.** Schéma d'utilisation des ressources hydrauliques de la région d'Annaba.

Mission 1 : Détermination des besoins en eau

Mission 2 : Evaluation des ressources

- **Anonyme, 2000.** La mise en valeur de ressources en eau limitées : Aspects historiques et technologiques. Institut de recherche appliquée, Université Ben-Gourion du Néguev.
- **Anonyme, 2004.** Etude agro – pédologique du Lac Fetzara (B.N.E.D.E.R.)
- **Anonyme, 2006.** Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar. Lac de Fetzara, Wilaya de Annaba. (Direction générale des forêts « D.G.F. »).
- **Anonyme 2008.** Découvrir l'eau (les lacs). L'eau douce, une ressource précieuse. Centre National de la recherche scientifique, C.N.R.S.
- **Aoun Sébaiti B., 2010.** Modélisation quantitative et qualitative pour une gestion intégrée des ressources en eau, Application à la plaine de Annaba, Université de Annaba, 133 p.
- **Auzende et al., 1975.** La marge Nord-africaine considérée comme marge active, Bull. Soc. Géol. France, XVII, (4), 486-495.
- **Balvay G., 1978.** Un lac oligotrophe de Haute montagne : le lac Cornu (Haute-Savoie). Revue de Géographie Alpine, tome 66, N°01, pp. 31-41.
- **Barbiéro L. et Vallès V., 1992.** Aspects géochimiques de l'alcalinisation des sols dans la vallée du Dallol Bosso (République du Niger). Cahiers de l'ORSTOM, série pédologie, 27/2,143–152.
- **Barbiéro L., Valles V., Régeard A. et Cheverry C., 2001.** Residual alkalinity as a tracer to estimate the changes induced by a forage cultivation in a non saline sodic soil. Agricultural Water Management, 50/3, 229-241.
- **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.
- **Benouna, A., Laour, L ;, Ramoul, H., 1986.** Essai d'aménagement d'une commune Sub-littorale (cas d'El Hadjar). Mémoire d'ingénieur, Université de Constantine.
- **Béraud J. F., 2001.** La protection des ressources en eau. Bull. Spec. Eau, ENS Geologie, Nancy, 25 – 28.
- **Bofla, J., 1948.** Contribution à l'étude des gîtes métallifères de la Kabylie, de Collo et de la région de Bône. Bulletin du Service de la carte Géologique de l'Algérie, 6, 216p.
- **Boivin P., Favre F., Hammecker C., Saejjew A. et Tessier D., 1999.** Ion transfers, iron reduction and mineralogical implications in irrigated fields: new results for soil

and water quality management under irrigation. Proceedings of 2nd Inter-Regional Conference on Environment-Water, Lausanne, sept. 1-3.

- **Bonvoisin N., 2001.** Transfert des polluants à la nappe : cas de la Picardie. D.E.S.S. «Qualité et Gestion de l'eau» Fac. Sci.,Amiens, 60 p + annexes.
- **Bouazizi H., 1981.** Etude de la salinité et de l'envasement de la retenue du barrage Nebeur sur l'Oued Mellegue (Tunisie). Thèse de 3^{ème} cycle, Université de Franche-Comté, 168 p.
- **Bouaziz N. & Rouabhia A.K., 1993.** Hydrogéologie et évolution des chlorures dans la région du Lac Fetzara, mémoire d'ingénieur en hydrogéologie, université de Annaba.
- **Boudoukha A., 1988.** Etude hydrogéologique et modélisation du système aquifère ferme d'El Eulma – Ain Lahdjar, région Est de Sétif, Algérie. Th. De Doct. De l'Univ. de Franche Comte, 186 p.
- **Bougherira. N., 2008.** Impact des rejets industriels du complexe sidérurgique sur les eaux superficielles et souterraines dans la plaine de Meboudja. Mémoire de Magister. Univ. Annaba, 93p.
- **Bouillin, J.P., 1979.** La transversale de Collo et d'El Milia (Petite Kabylie) : une région-clé pour l'interprétation de la tectonique alpine de la chaîne littorale d'Algérie. Mémoire de la société géologique de France, (n.s.) 57,135, 84p.
- **Bouzelboudjen M., 1987.** Hydrogéologie et bilan de la nappe d'El Amra-El Abadia par modèles mathématiques (Algérie). Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Franche-Comté, 186 p.
- **Braddock R.D., Kremmer M.L. and Sanzogni L. 1997,** Feed-forward artificial neural network model for forecasting rainfall run-off. Proceedings international congress on modelling and simulation (Modsim). The modelling and simulation society of Australia Inc., Hobart, Australia, pp. 1653-1658.
- **B.R.G.M., 1974.** Essai de classification et de cartographie de la qualité chimique des eaux souterraines. Rapport interne Départ. Hydrogéol. Orléans, 50 p.
- **B.R.G.M., 12-2010.** Salinisation des masses d'eaux en France métropolitaine et dans l'Outre-mer. Rapport final, N°03, B.R.G.M./R.P.-594966FR, 141 p.
- Bulletin international de l'eau et de l'environnement; Edil-inf-Eau, n°21 - 01/1999, n°24 - 09/1999 et n°27 - 02/2001.

- **Burden, F.R. Brereton, R.G. and Walsh, P.T., 1997.** Cross- validationary selection of test and validation sets in multivariate calibration and neural networks as applied to spectroscopy. *Analy.* 122 (10), 1015-1022.
- **Caby, R., Hammor, D., 1992.** Le massif cristallin de l'Edough (Algérie) : un "Metamorphic Core complex" d'âge miocène dans les Maghrébides. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Mécanique, physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre*, 314 (08) 829-835.
- **Campolo, M., Andreussi, P., & Soldati, A., 1999.** River flood forecasting with a neural network model. *Water Resources Research* 35 : 1191-1197.
- **Carlet A. et al., 2001.** Hydrochimie des eaux, dissolution spécifique et salinité des cours d'eau dans le bassin de l'Oued Lebène. (Prérief Central, Maroc septentrional). *Papeles de Geografia.*, 24, pp 145-161.
- **Castagny G., 1967.** *Traité pratique des eaux souterraines.* Ed. Dunod, Paris. France 661 p.
- **Castagny G., 1968.** *Prospection et exploitation des eaux souterraines.* Dunod édit., Paris, 709 p.
- **Castagny G., Margat J., 1977.** *Dictionnaire français de l'hydrogéologie.* B.R.G.M. SGN, Orléans, 249 p.
- **Castagny G., 1980.** *L'eau propre.* Hachette édit. Paris, 192 p.
- **Castagny G., 1982.** *Principes et méthodes de l'hydrogéologie.* Dunod édit. Paris, 238p.
- **Caussade B. & Moreaux M., A, 2003.** Reynaud «Redevances et prélèvements optimaux dans les aquifères côtiers menacés d'intrusion saline : les principes de base». *Journal Economie et Prévision*, n°43-144, pp. 155-173.
- **Chaumont M., 1971.** *La classification génétique des régions hydrochimiques : France, Espagne et Afrique du Nord (Carte pluviométrique).*
- **Cohen, C. R., 1980.** Plate tectonic model for the oligo-miocene evolution of the western Mediterranean. *Tectonophysics*, 68, 283 – 311.
- **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, Université de Franche-Compte, pp 197.

- **Delecourt J., 1941.** Le titre natronique (première note). Bull. Soc. Belge de Géol., pp. 107-650.
- **De Marsily G., 1978.** De l'identification des systèmes hydrogéologiques. Thèse de Doctorat ès-Sc. Univ. P. & M. Curie, Paris VI, 2t, 215 et 396 p.
- **Dieng B. et al. 1991.** Transfert d'eau en milieu poreux non saturé. Recharge des nappes en climat Soudano-Sahélien. Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. Ed. Aupelf-Uref- John Libbey. P. 131-137.
- **Dindane K. et al., 2003.** Hydrochemical and isotopic characteristics of groundwater in the Souss Upstream Basin, southwestern Morocco. Journal of African Earth Sciences, 36 (2003), pp 315-327.
- **Djabri L., 1987.** Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe alluviale de la plaine d'effondrement de Tébessa. Essai de modélisation. Thèse 3^{ème} Cycle Univ. De Franche-Comté, 171 p.
- **Djabri L., 1996.** Mécanismes de la pollution et vulnérabilité des eaux de la seybose. Origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. Th. Doct. Es. Sciences, Univ. Annaba, 261 p
- **Djabri L. et al., 1996.** Apport des isotopes pour la connaissance de l'origine des eaux de la vallée de la Seybouse (Est Algérien). Revista Hidrogeologia (Espagne), N°12, pp 3-14.
- **Djabri L. et al., 2008.** Origin of water salinity in a lake and coastal aquifer system. Journal Environ Geol. (2008) 54, pp 565-573.
- **Djamai, 1993.** Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du lac Fetzara (Annaba). Thèse de Magister. INA. Alger. Algérie, 181 p.
- **Djamai, R. et al., 2004.** Contribution à l'étude de l'évolution de la salinité des sols du Lac Fetzara (Annaba). Colloque international ; « Terre & Eau », pp 317-320.
- **Djeda F., 1987.** Etude hydrogéologique et simulation par modèles mathématiques de la nappe de Khemis-Miliana. Algérie. Thèse 3^{ème} Cycle, Univ. De Franche-Comté, 187 p.
- **Djemai M., 1985.** Hydrologie du bassin versant du Haut Sébaou. Hydrogéologie des formations alluviales (Algérie). Thèse de Docteur Ing. Univ. Sc. & médicale de Grenoble, 261 p.

- **Djorfi S. et al., 2010.** Impact de la décharge publique de Annaba sur la qualité des eaux de la plaine de l'Oued Zied. Communication Science et Technologie, Ecole Nationale de l'Enseignement supérieur et Technique d'Oran, N°08 (01/2010), pp. 151-157.
- **Droubi A., Fritz B., Gac J.Y. et Tardy Y., 1980.** Generalized residual alkalinity concept: application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation, Am. J. Sci., 280, 560-572.
- **Dubreucq F, 1987.** Le chimisme des eaux de la Cuissance en amont d'Arboit (Jura). Influence du karst, des sols et des activités humaines. Thèse de Doctorat de l'Univ. De Franche-Comté. Mention Sc. De la Terre, 156 p.
- **El Asslouj J. et al., 2007.** Analyse de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la commune des Mzamza, au voisinage des eaux usées. Revue Afrique Science, 03 (1), pp. 109-122.
- **El Bouhali B et al., 2008.** Contamination métallique de *Gambusia Holbrooki* au niveau du lac Fouarat et de l'estuaire Sebou dans la région du Gharb (Maroc). Revue Afrique Science, 04(3), pp. 410-425.
- **Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar**, lac Fetzara, Wilaya de Annaba. Direction Générale des Forêts (M.A.D.R.), mai 2003, 6 p.
- **Foucault A. & Raoult J. F., 1980.** Dictionnaire de géologie. Masson et Cie edit., Paris, 334 p.
- **Fourneaux J.C., 1978.** Etude des échanges nappe-rivière : la nappe de la plaine de l'Isère dans l'ombilic de Grenoble. Thèse de Doctorat ès-Sc. Univ. Sc. Et Médicale de Grenoble, 144 p.
- **Fradet P., 1987.** Etude hydrogéologique du bassin aval du Céou (affluent de la Dordogne). Recherche d'eaux souterraines destinées à l'irrigation. Thèse 3^{ème} cycle Univ. De Franche-Comté, 144 p.
- **Gaud B., 1976.** Etude hydrogéologique du système aquifère d'Annaba – Bouteldja (Synthèse des connaissances et Recherches des conditions de modélisation) Rapport de l'ANRH. Algérie. 151p.
- **Ghrieb L., 2011.** Impact de la minéralisation des formations triasiques sur la qualité de l'eau et du sol en zone semi-aride : Cas de la plaine Bekkaria-Tébessa. (Extrême Nord-Est Algérien), 143 p.

- **Gleizes G. et al., 1988.** Données lithologiques et pétrostructurales nouvelles sur le massif cristallophyllien de l'Edough (Est Algérie). – C.R. Acad. Sci., Paris, 36, 1001-1008.
- **Gouaidia L. et al., 2012.** Evaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de la dégradation des sols : exemple de la plaine de Meskiana (Nord-Est Algérien). Revue Géographie, Physique et Environnement, volume 6 (2012), pp. 141-160.
- **Habes S., 2006.** Pollution saline d'un lac, cas du lac Fetzara « Est algérien ». Mémoire de Magister, Département de Géologie, Université de Annaba, 105p.
- **Habes S. et L. Djabri, 2010.** Impact des oueds sur la qualité des eaux d'un lac appartenant aux écosystèmes humides du Nord de l'Algérie ; Cas du Lac Fetzara N.E. Algérien. Revue des Régions Arides, Numéro Spécial- 24(2/2010). Institut des Régions Arides. Médenine, Djerba, Tunisie.
- **Habes S. et al., 2011.** Qualité des eaux d'un lac dans une région côtière de l'Est algérien : cas du lac Fetzara. Revue Paralia, édit. 2, Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Tanger (Maroc), pp. 331-334.
- **Habes S. et al., 2012.** Quantification des apports et des exores d'un lac : cas du lac Fetzara, région de Annaba (Nord-Est Algérien). Revue des Sciences et de la Technologie-Synthèse, N°24 (04/2012), pp. 21-28.
- **Halwani J., Ouddane B., Crampon N. et Wartel M., 2001.** Contamination saline dans les eaux souterraines de la plaine d'Akkar au Liban. Journal Européen d'hydrologie, tome 32, fasc. 1, p.93 à 108.
- **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,327, 391-396.
- **Hammor D., 1992.** Du panafricain au Miocène : 600 millions d'années d'évolution polycyclique dans le massif de l'Edough (Algérie Nord Orientale). Retraces par la pétrologie, la tectonique et la géochronologie (U/Pb, Rb/Sr, Sm/Nd et 39Ar/40Ar). Thèse de l'UST Languedoc, Univ. De Montpellier II, pp. 205.
- **Hamzaoui W., 2007.** Caractérisation de la pollution des eaux en milieu industriel et urbain. Cas de la plaine d'El-Hadjar. Mémoire de magistère. Univ. Annaba, 102..p.

- **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.
- **Haou F., 2001.** Ornithologie en Algérie, les espèces existantes au niveau du Lac Fetzara (Nord-Est algérien). Archives de la liste de discussion « Ornithologie ».
- **Hardie L.A. et H.P. Eugster H.P., 1980.** Evaporation of sea water: Calculated mineral sequences. Science, 20/8, pp. 498-500.
- **Hemila M. L., 1988.** Hydrogéologie, modélisation et gestion des ressources en eau de la plaine alluviale du bassin de l'oued de la Meskiana-haut Mellegue (Est Algérien). Thèse de Doctorat en Sciences de la Terre, Université de Franche-Comté. 200 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.
- **Hoeilavsky J. & Snopkova P., 1987.** Découverte d'Acritarches paléozoïques dans les terrains métamorphiques de l'Edough (Wilaya d'Annaba, Algérie). – C.R. Acad. Sci., Paris, 305, pp. 881-884.
- **Issola Y. et al., 2008.** Caractéristiques physico-chimiques d'une lagune cotière tropicale : lagune de Fresco (Côte d'Ivoire). Revue Afrique Science, 04 (3), pp. 368-393.
- **Joleaud L., 1936.** Etude géologique de la région de Bône et de la Calle. Bull. Serv. Carte Geologique de l'Algérie. 2^e série, 12, 200 p.
- **Khalfaoui H. 2007.** Impact des rejets industriels sur les eaux souterraines : Cas de la région de Berrahal (Algérie). Mémoire de magister, Université de Annaba. 174p.
- **Kherici N., 1985.** Aquifère sableux de bords de mer. Hydrodynamique et hydrochimie. Exemple de la nappe de Bouteldja (Nord Est algérien). Th. Doct. 3^e cycle USTL, Montpellier. 202 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) N. E. algérien. Thèse de doctorat ès sciences de l'Université d'Annaba, p. 170.
- **Lachtermacher G., & Fuller J.D., 1994.** Backpropagation in hydrological time series forecasting. In : K. W. Hipel, A.I. MacLeod, U.S. Panu & V. P. Singh (eds), Stochastic and statistical methods in hydrology and environmental engineering, Vol. 3, Time series analysis in hydrology and environmental engineering : 229-242.

- **Lahondère J.C., 1987.** Les séries ultra-telliennes d'Algérie Nord oriental et les formations environnantes dans le cadre structural. Th. Doct. Es-Sci. Univ. Paul Sabatier, Toulouse, France, 238 p.
- **Lallehem, S. & Mania, J., (2002).** A linear and non-linear rainfall-runoff model using neural network technique: Example in fractured porous media. Journal of Mathematical and Computer Modelling. N°1, Vol. 55, N° 615.
- **Lallemant – Barrès A. et Roux J.-C, 1999.** Périmètres de Protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine, guide méthodologique et réglementaire, 2^e édition BRGM, manuels et méthodes N°33.
- **Laouar, R. et al., 2002.** Stable isotope study of the igneous, metamorphic and mineralized rocks of the Edough Complex, Annaba ,north-east Algeria. Journal of African Earth Sciences, 35, 271-283.
- **Laouar, R. et al., 2005.** Petrological, geochemical, and stable isotope constraints on the genesis of the Miocene igneous rocks of Chetaibi and Cap de Fer (N.E. Algeria). Journal of African Earth Sciences, 41, 445-465.
- **Larkem S. et Bouleghlem Z., 2007.** Influence des activités anthropiques sur la qualité des eaux : Cas de la zone industrielle de Berrahal. Mémoire d'ingénieur, Université de Annaba. 107 p.
- **Laurie St-Onge. 2007.** Modélisation du bilan hydrique du bassin versant du lac Ba Bê, Viêt-nam, à l'aide de données physiographiques issues de télédétection et de données climatologiques. Hydrological Sciences – Journal – 52(4). P 654-670.
- **Lekehal H. et Mellah B.2007.** Contamination des eaux et du sol par les rejets de la zone industrielle de Berrahal. Mémoire d'ingénieur, Université de Annaba. 102 p.
- **Les cahiers de l'agence, n°04, sept., 2000.** Bassin hydrographique Constantinois – Seybouse – Mellegue.
- **Lippmann R.P., 1987.** An Introduction to Computing with Neural Nets. IEEE ASSP Magazine, April 1987, 4 (2), 4-22. Données hydrologiques. Ecol. Nat. Sup. de Géol. Appli/Inst. Nat. Polytech. De Lorraine, 95 p.
- **Liu J., Savenije H.H.G. and Xu J., 2003.** Forecast of waterdemand in Weinan City in China using WDF-ANN model. Phys. and chemist. of the Earth 28, 219-224.
- **Louvrier M., 1976.** Acquisition et traitements des données hydrogéochimiques. B.R.G.M. Dép. Géol. De l'Aménag. Hydrogéol. Orléans, 174 p.

- **Marignac, C., 1988.** A case of ore deposition associated with paleo-geothermal activity : the polymetallic ore veins of Ain Barbar (N.E. Constantinois, Algeria). Mineral. Petrol. , 39, 107-127.
- **Marignac, Ch., Zimmermann, J.L., 1983.** Ages K-Ar de l'événement hydrothermal et des intrusions associées dans le district minéralisé Miocène d'Ain-Barbar (Est Constantinois, Algérie). Mineralium Deposita, 18, 457-467.
- **Marre, A., 1992.** Le Tell oriental Algérien de Collo à la frontière Tunisienne, étude géomorphologique, volume 1 & 2 O.P.U. Alger, Algérie.
- **Maurey, C. et al., 2000.** Post-collisional Neogene magmatism of the Mediterranean Maghreb margin: a consequence of slab breakoff, C.R. Acad. Sci. Paris, 331, 159-173.
- **Mc Culloch W.S. and Pitts W., 1943.** A logical Calculus of the Ideas Imminent in Nervous Activity. Bulletin of Mathematical Biophysics, 5: pp. 115-133.
- **Monié et al., 1992.** Age burdigalien de la tectonique ductile extensive dans le massif de l'Edough (Kabylies, Algérie). Données radiométriques ³⁹ Ar – ⁴⁰ Ar. Bull. Soc. géol. France, n°5, pp. 571-584.
- **Morin G. et Slivitzky M., 1992.** Impacts des changements climatiques sur le régime hydrologique : Le cas de la rivière Moisie. Revue des Sciences de l'eau, vol. 5 N°02. P 179-195.
- **Mudry J., 1991.** L'analyse discriminante, un puissant moyen de validation des hypothèses hydrogéologiques. Revue des Sciences de l'Eau, 4(1991), pp 19-37.
- **Najjar Y and Ali H., 1998a.** On the Use of BPNN in Liquefaction Potential Assessment Tasks. Artificial Intelligence and Mathematical Methods in Pavement and Geomechanical Systems, Attoh-Okine (Editor), pp. 55-63.
- **Najjar Y. and Ali H., 1998b.** CPT-Based Liquefaction Potential Assessment : A Neuronet Approach. ASCE Geotechnical Special Publication No.75, Dakoulas, P. et. Al. (Editors), (1), pp. 542-553.
- **Najjar Y. and Zhang X., 2000.** Characterizing the 3D Stress-Strain Behavior of sandy Soils: A Neuro-Mechanistic Approach. ASCE Geotechnical Special Publication No. 96, Filz, G. and Griffiths, D. (Editors), pp. 43-57.
- **Norme Afnor T 90-105.** détermination des matières en suspensions. juin 1978

- **Norme Afnor T 90-112.** Dosage de dix éléments métalliques par spectrométrie d'adsorption atomique dans la flamme. Méthode de dosage direct après complexion et extraction. Septembre 1986
- **Norme Afnor 90-512.** Echantillonnage. Guide général sur les techniques d'échantillonnage Septembre 1988
- **Norme Afnor 90-513.** Echantillonnage. Guide général pour la conservation et la manipulation des échantillons. Septembre 1988
- **Norme Afnor T 90-105.** Détermination des matières en suspensions. juin 1978.
- **Organisation mondiale de la santé,** directive de qualité pour les eaux de boisson.
- **Ramdani, A., 1996.** Hydrogéologie et modélisation de la nappe dunaire de Bouteldja. Mémoire Magister, Univ. Annaba, 138 p.
- **Rodier J., 2009.** Analyse de l'eau. 9^{ème} édition. Paris, 1526 p.
- **Rouabhia AK. et al., 2010.** Evolution de la salinité de l'aquifère alluviale de la plaine entourant le lac Fetzara Annaba Algérie. Journal Arabian journal geosciences, 12 p.
- **Seltzer P., 1948.** Le climat de l'Algérie. Bul. Hors-série, Inst. De Météo & de physique du Globe. Alger, 219 p.
- **Schoeller H., 1955.** Hydrogéologie. Institut français du pétrole. Ec. Nat. Sup., 523 p.
- **Slama L., 2001.** Quelques indicateurs de pollution au niveau de l'oued Meboudja. Mémoire d'ingénieur en hydrogéologie, université de Annaba.
- **Todd D.K., 1980.** Groundwater hydrology. J. Wiley and Sons second edition, New York, 510 p.
- **Toubal A. C. 1998.** Approche géophysique des problèmes d'hydrodynamique et d'invasion marine en milieu souterrain (exemple des plaines d'Annaba, de la Mitidja et de la baie d'Alger). Thèse de Doctorat Es-Sciences, Université de STHB d'Alger, 225p.
- **Travers L., 1958.** La mise en valeur du lac Fetzara. Annales de Géographie, tome 67, N°361, pp. 260-262.
- **Vallès V. & Bourgeat F., 1988.** Geochemical determination of the gypsum requirement of cultivated sodic soils. I. Development of the thermodynamic model GYPSOL simulating the irrigation water-soil chemical interaction. Arid Soil Research and Rehabilitation , 2, 165-177.

- **Vallès V., Bertrand R., Bourgeat F. et N'Diaye M.K., 1989.** Le concept d'alcalinité résiduelle généralisée et l'irrigation des sols sodiques - Application aux sols du Kouroumari (Mali) et de la vallée de l'oued Medjerdah (Tunisie). *L'agronomie tropicale*, 44/3, 157-163.
- **Vila J.M., 1970.** Le Djebel Edough : un massif cristallin externe du Nord-Est de la Berbérie (Bull. Soc. Geol. FR, (7), t. XII, pp 805-812
- **Vila J.M., 1980.** La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro – tunisiens. Thèse de Docteur ès sciences. Université de Pierre et Marie- Curie. Paris VI, France, pp.58-68.
- **Zatout M. 2012.** Etude géochimique et minéralogique du Chott de Ain El Beida et de la Sebkhha d'Oum Erraneb, Cuvette de Ouargla - Bas Sahara. Mémoire de Magister en Géologie, Université Kasdi Merbah Ouargla, 133 p.
- **Zahi F. 2008.** La qualité des eaux et de sols de la région du lac Fetzara (Nord-Est de l'Algérie). Mémoire de Magister, Université de Annaba. 156 p.
- **Zenati N. 1999.** Relation nappes-lac, Confirmation par l'hydrochimie, Cas de la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El Hadjar, Lac Fetzara N-E Algérien, Mémoire de Magister, Université de Annaba, 148p.
- **Zenati N. 2010.** Pollution de l'environnement aquatique : Diagnostic et Proposition. « Région de Annaba ». Thèse de Doctorat en Géologie Appliquée, Université de Annaba, 288p.
- **Zenati N. et Messadi D., 2010.** Utilisation de la géostatistique dans l'établissement de la carte de la vulnérabilité intrinsèque d'une nappe superficielle à un polluant par infiltration verticale. Cas de la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El Hadjar, Annaba. Communication Science et Technologie, Ecole Nationale de l'Enseignement Supérieur et Technique d'Oran, N°08 (01/2010), pp. 105-110.