

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

*République Algérienne Démocratique et Populaire*

*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل

*Université Mohammed Seddik Benyahia -Jijel*

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie  
Département : des Sciences de la Terre et de  
l'Univers



كلية علوم الطبيعة و الحياة  
قسم: علوم الأرض والكون

## **Mémoire de fin d'études**

En vue de l'obtention du diplôme : **Master Académique en Géologie**

Option : Hydrogéologie

**Thème**

**Aptitudes des eaux souterraines de la région du lac  
Fetzara à l'irrigation (Annaba, NE Algérien)**

### **Membres de Jury**

**Président : Drouiche Abdelmalek**

**Examineur : Rihia Djamel**

**Encadrant : Zahi Faouzi**

### **Présenté par:**

**Medouri Arafa**

**Sekfali Roumaissa**

**Année Universitaire 2020-2021**

**Numéro d'ordre (bibliothèque) : .....**

# *Dédicace*

*A nos chers parents, que Dieu les  
préserve pour leur amour inépuisable  
et leur soutien sans fin.*

*A nos familles,*

*À nos professeurs.*

*À nos amis,*

*À tous nos proches,*

*À tous ceux qui croient au succès.*

*Nous consacrons du travail...*

# *Remerciements*

*On remercie tout d'abord le bon Dieu qui nous a aidés de terminer ce travail. On tient à remercier très vivement et respectueusement notre encadrant Mr. Zahi Faouzi, pour son soutien et son aide.*

*Nos remerciements aussi vont aux membres de jury : Mr. Drouiche Abdelmalek et Mr. Rihia Djamel pour avoir accepté d'examiner notre mémoire et qui nous ont fait l'honneur d'accepter d'être parmi le jury de notre soutenance de fin d'études.*

*En fin nous passons nos remerciements à tous nos amis et collègues pour leurs encouragements, soutiens et pour tous les bons moments que nous avons passés ensemble.*

**MERCI**

**Résumé :**

La présente étude a été réalisée afin d'évaluer l'aptitude à l'irrigation des eaux souterraines dans la région du lac de Fetzara, leur évolution spatio-temporelle en fonction de la variation des paramètres physico-chimiques des eaux. Deux campagnes d'échantillonnage des eaux ont été réalisées, au cours des mois de Janvier et Mai 2007. Les paramètres physico-chimiques (potentiel hydrogène (pH) et conductivité électrique (CE)) ont été mesurés in-situ tandis que, les éléments majeurs ont été analysés en laboratoire. Les résultats obtenus ont été interprétés et évalués en utilisant des indicateurs de la qualité de l'eau d'irrigation tels que le rapport d'adsorption du sodium (SAR) et le pourcentage de sodium (Na%) en combinaison avec la conductivité électrique (CE), en plus, l'indice de perméabilité (PI), l'indice de bicarbonate de sodium résiduel (RSBC), l'indice de Kelly (KR) et le rapport d'absorption du magnésium (MAR). En général, les eaux souterraines sont acceptables pour l'irrigation des cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés, mais nécessitent un contrôle préalable de l'évolution de la salinité, sauf les eaux de la région de Cheurfa (P3 et P4) qui sont de mauvaise qualité en raison de la forte minéralisation de l'eau ( $CE > 3000 \mu S/cm$ ).

**Mots clés :** Aptitude des eaux souterraines, irrigation, lac Fetzara, Annaba, Algérie.

## ملخص:

أجريت هذه الدراسة من أجل تقييم مدى ملاءمة المياه الجوفية للري في منطقة بحيرة فدزارة، وتطورها المكاني والزمني كدالة لتغير الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية. تم إجراء حملتين لأخذ عينات من المياه الجوفية خلال شهري يناير ومايو 2007. كما تم قياس الخصائص الفيزيائية والكيميائية (درجة الحموضة (pH) والتوصيل الكهربائي (CE)) في الموقع بينما تم تحليل العناصر الرئيسية في المختبر. تم تفسير النتائج التي تم الحصول عليها وتقييمها باستخدام مؤشرات جودة مياه الري مثل نسبة امتصاص الصوديوم (SAR) ونسبة الصوديوم (%Na) مقارنة مع التوصيل الكهربائي (CE)، بالإضافة إلى مؤشر النفاذية (PI) وكذلك مؤشر بيكربونات الصوديوم (RSBC)، مؤشر كيلي (KR) ونسبة امتصاص المغنيسيوم (MAR). بشكل عام، تعتبر المياه الجوفية للمنطقة مقبولة لري المحاصيل المقاومة للملوحة في تربة جيدة التصريف، ولكنها تتطلب مراقبة مسبقة للتغيرات في الملوحة، باستثناء المياه في منطقة الشرفة (P3 و P4) ذات النوعية الرديئة بسبب التمعدين القوي للماء ( $CE < 3000$  ميكرو سيمنس / سم).

الكلمات المفتاحية: ملاءمة المياه الجوفية، الري، بحيرة فدزارة، عنابة، الجزائر.

**Abstract:**

The present study was carried out in order to evaluate the suitability for irrigation of groundwater in the Fetzara Lake area, their spatio-temporal evolution according to the variation of the physico-chemical parameters of groundwater. Two water sampling campaigns were carried out, during January and Mai 2007. The physico-chemical parameters (hydrogen potential (pH) and electrical conductivity (EC)) were measured in-situ while the major elements were analysed in the laboratory. The obtained results have been interpreted and evaluated by using indicators of water irrigation quality such as sodium adsorption ratio (SAR) and percent sodium (Na%) in combination with the electrical conductivity (EC), in addition, the permeability index (PI), the residual sodium bicarbonate index (RSBC), the Kelly index (KR) and the magnesium absorption ratio (MAR). In general, groundwaters are acceptable for irrigation of salt-tolerant crops on well-drained soils, but require prior control of salinity evolution, excluding waters in the Cheurfa area (P3 and P4) which are of poor quality due to the high mineralization of the water ( $EC > 3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ).

**Keywords:** groundwater suitability, irrigation, Fetzara lac, Annaba, Algeria.

# Sommaire

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

	Page
<b>Introduction Générale</b> .....	<b>01</b>
<b>Chapitre I : Présentation de la zone d'étude</b>	
I.1. Introduction .....	03
I.2. Situation géographique.....	03
I.3. Cadre Géomorphologie du lac Fetzara.....	04
I.3.1. Lac Fetzara .....	04
I.3.2. Les Montagnes.....	07
I.3.3. La plaine d'Annaba .....	07
I.3.4. Les sols et le couvert végétal .....	08
I.4. Conclusion.....	10
<b>Chapitre II :Etude Hydro-climatologique</b>	
<b>II.1. Climatologie</b>	
II.1.1. Introduction.....	11
II.1.2. Station de mesure.....	11
II.1.3. Etude des facteurs climatiques.....	11
II.1.3.1. Précipitations .....	11
II.1.3.1.1. Précipitations moyennes mensuelles.....	11
II.1.3.1.2. Coefficient pluviométrique (H).....	12
II.1.3.1.3. Répartition saisonnière des précipitations.....	13
II.1.3.2. La Température.....	14
II.1.4. Diagramme pluviothermique .....	15
II.1.5. Bilan hydrique. ....	15
II.1.5.1. Evapotranspiration .....	16
II.1.5.1.1. Evapotranspiration potentielle (ETP).....	16
II.1.5.1.2. Evapotranspiration réelle (ETR) .....	16
II.1.5.2. Bilan hydrique selon la formule de C.W Thornthwaite.....	17
II.1.5.3. Ruissellement.....	18
II.1.5.4. Infiltration.....	18
<b>II.2. Hydrologie</b>	
II.2.1. Introduction.....	19
II.2.2. Réseau hydrographique.....	19
<b>II.3. Conclusion</b>	
	21
<b>Chapitre III : Aperçu Géologique et Hydrogéologique</b>	
III.1. Introduction .....	22
III.2. Cadre géologique .....	22
III.2.1. Massif de l'Edough .....	23
III.2.2. Description lithologique du massif .....	24
III.2.2.1. Le socle.....	24
a. Les Gneiss .....	24
b. Les micaschistes.....	25

c. Les roches méta basiques.....	25
d. La couverture sédimentaire.....	26
e. Le magmatisme Tertiaire.....	26
III.2.3. Plaines littorales.....	26
III.3. Hydrogéologie .....	28
III.3.1. Description des différents aquifères.....	28
III.3.1.1. La nappe superficielle.....	28
III.3.1.2. Les nappes profondes.....	29
III.4. Conclusion .....	30
<b>Chapitre IV : Aptitudes des eaux souterraines à l'irrigation de la région du lac Fetzara</b>	
IV.1. Introduction.....	31
IV.2. Les ressources en eau pour l'irrigation.....	31
IV.2.1. Les eaux souterraines.....	31
IV.2.2. Les eaux de surface.....	32
IV.3. Les Systèmes des irrigations.....	32
IV.3.1. Irrigation de surface.....	32
IV.3.2. Irrigation par aspersion.....	33
IV.3.3. Irrigation au goutte à goutte.....	33
IV.4. L'étude géochimique et l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation de la région du lac Fetzara.....	34
IV.4.1. Notions des méthodes.....	35
IV.4.1.1. Diagramme de Richards.....	35
IV.4.1.2. Pourcentage de Sodium (Na%).....	37
IV.4.1.3 L'indice de perméabilité (IP).....	38
IV.4.1.4. Indice de Kelly .....	39
IV.4.1.5. Le rapport d'absorption de magnésium (MAR).....	40
IV.4.1.6. Bicarbonate de sodium résiduel (RSBC).....	40
IV.4.2. Résultats et Discussions.....	41
IV.4.2.1. Faciès chimiques.....	41
IV.4.2.2. Evolution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques.....	43
a. Potentiel hydrogène (pH).....	43
b. La conductivité électrique (CE).....	43
c. Cartes du calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ en mg/l).....	44
d. Cartes du magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ en mg/l).....	45
e. Cartes du sodium ( $\text{Na}^+$ en mg/l).....	46
f. Cartes du potassium ( $\text{K}^+$ en mg/l).....	46
g. Cartes des chlorures (Cl en mg/l).....	47
h. Cartes des sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ en mg/l).....	48
i. Cartes des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ en mg/l).....	48
IV.4.2.3. Risque de salinité .....	49
IV.4.2.4. Pourcentage de Sodium (Na%).....	50
IV.4.2.5. Indice de Kelly .....	51
IV.4.2.6. Indice de perméabilité.....	52
IV.4.2.7. Risque de magnésium.....	52
IV.4.2.8. Bicarbonate de sodium résiduel (RSBC).....	53
IV.5. Conclusion.....	53
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>54</b>
<b>Références Bibliographiques</b>	



## Listes de Figures

N°:	Titre	Page
<b>Chapitre I : Présentation de la zone d'étude</b>		
Figure I.1 :	Situation géographique du lac Fetzara.....	03
Figure I.2 :	Carte géomorphologique de la plaine de Annaba.....	04
Figure I.3 :	Coupe sur le piémont de la bordure sud du Lac Fetzara.....	05
Figure I.4 :	log stratigraphique du canal de drainage du lac Fetzara.....	06
Figure I.5 :	Carte des formations forestières de la wilaya de Annaba.....	09
<b>Chapitre II : Etude Hydro-climatologique.</b>		
Figure II.1.1 :	Précipitations moyennes mensuelles de la station de Ain Berda.....	12
Figure II.1.2 :	Coefficient pluviométrique pour la station de Ain Berda.....	13
Figure II.1.3 :	Répartition saisonnières des précipitations de la station de Ain Berda.....	14
Figure II.1.4 :	Températures moyennes mensuelles de la station de Ain Berda.....	14
Figure II.1.5 :	Diagramme pluviothermique de la station de Ain Berda.....	15
Figure II.1.6 :	Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite.....	18
Figure II.2.7 :	Réseau hydrographique du bassin versant du lac Fetzara.....	21
<b>Chapitre III : Aperçu Géologique et Hydrogéologique</b>		
Figure III.1 :	Carte géologique du bassin versant du lac Fetzara.....	22
Figure III.2 :	Carte géologique du massif de l'Edough.....	23
Figure III.3 :	Coupes géologiques entre Ain Berda et l'Edough, passant par le lac Fetzara...	27
Figure III.4 :	Nappes superficielles de la plaine de Annaba.....	29
Figure III.5 :	Coupe schématique du système aquifère de Annaba.....	30
<b>Chapitre IV : Aptitudes des eaux souterraines à l'irrigation de la région du lac Fetzara</b>		
Figure IV.1 :	Carte d'inventaire.....	35
Figure IV.2 :	Diagramme de Richards (1954).....	36
Figure IV.3 :	Diagramme de wilcox(1955).....	38
Figure IV.4 :	Digramme de Doneen (1964).....	39
Figure IV.5 :	Faciès chimiques des eaux souterraines selon le diagramme de Piper.....	42
Figure IV.6 :	Cartes du potentiel d'hydrogène (pH).....	43
Figure IV.7 :	Cartes de la conductivité électrique (CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).....	44
Figure IV.8 :	Cartes du calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ en mg/l).....	45
Figure IV.9 :	Cartes du magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ en mg/l).....	45
Figure IV.10 :	Cartes du sodium ( $\text{Na}^{+}$ en mg/l).....	46
Figure IV.11 :	Cartes du potassium ( $\text{K}^{+}$ en mg/l).....	47
Figure IV.12 :	Cartes des chlorures ( $\text{Cl}^{-}$ en mg/l).....	47
Figure IV.13 :	Cartes des sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ en mg/l).....	48
Figure IV.14 :	Cartes des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^{-}$ en mg/l).....	49
Figure IV.15 :	Aptitude des eaux à l'irrigation de la région du lac Fetzara selon le diagramme de Richard.....	50
Figure IV.16 :	Aptitude des eaux à l'irrigation de la région du lac Fetzara selon le diagramme de wilcox.....	51
Figure IV.17 :	Aptitude des eaux à l'irrigation de la région du lac Fetzara selon le diagramme de Doneen.....	52

## Liste des Tableaux :

<b>Chapitre I : Présentation de la zone d'étude</b>	
Tableau I.1 :	Différentes formes topographiques du lac Fetzara..... 07
<b>Chapitre II : Etude Hydro-climatologique.</b>	
TableauII.1.1:	Coordonnées géographiques de station météorologique de Ain Berda..... 11
TableauII.1.2:	Précipitations moyennes mensuelles de la station deAin Berda..... 11
TableauII.1.3:	Répartition saisonnière desprécipitations de la station de Ain Berda..... 13
TableauII.1.4:	Températures moyennes mensuelles de la station d'Ain Berda..... 14
TableauII.1.5:	Bilan hydrique d'après la formule de Thornthwaite..... 17
TableauII.1.6:	Résultats du bilan hydrologique (en mm)..... 19
TableauII.2.7:	Quelques caractéristiques de sous bassin versant du lac Fetzara..... 20
<b>Chapitre IV : Aptitudes des eaux souterraines à l'irrigation de la région du lac Fetzara</b>	
Tableau IV.1:	Classification des eaux d'irrigation selon le SAR et CE..... 36
Tableau IV.2:	Classification des eaux d'irrigation selon le diagramme de Richards..... 37
Tableau IV.3:	Classification des eaux d'irrigation selon le diagramme de wilcox (1955)..... 37
Tableau IV.4:	Classification des eaux d'irrigation selon l'indice de perméabilité..... 38
Tableau IV.5:	Classification des eaux d'irrigation selon le rapport de Kelly (1963)..... 39
Tableau IV.6:	Classificationdes eaux d'irrigation selonle risque de magnésium..... 40
Tableau IV.7:	Classification des eaux d'irrigation selon le RSBC..... 40
Tableau IV.8:	Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la région du lac Fetzara..... 41

# *Introduction Générale*

## **Introduction Générale**

L'eau présente à l'échelle de la planète un élément vital pour la subsistance de tout être vivant, c'est aussi un facteur prépondérant pour toute activité socioéconomique. L'eau est donc une ressource précieuse, d'autant plus qu'elle n'est pas uniformément répartie. Plusieurs pays sont menacés de pénurie d'eau potable et des milliers de personnes n'ont pas toujours accès à cette dernière. La question posée qui est relative à la qualité des eaux de toutes natures s'est trouvée posée bien avant celle du réchauffement climatique et reste une préoccupation constante. Ces milieux sont des ressources essentielles à la vie en général (biodiversité) et aux sociétés humaines en particulier (alimentation en eau potable et autres usages, sols agricoles et urbains), dont il faut protéger la qualité en prévenant les pollutions de toutes natures et en restaurant si nécessaire les compartiments pollués, sans nuire de façon excessive au développement économique. Des substances susceptibles de contaminer les eaux sont extrêmement nombreuses et diverses en raison d'une part aux activités humaines multiples et aussi les facteurs naturels qui peuvent en être la source, mais l'attention est plus particulièrement portée, selon qu'on s'intéresse aux eaux, sur les substances d'origine géologique, industriel et agricole.

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

Plusieurs études ont été effectuées sur les eaux et les sols de la région du Fetzara (Kherici, 1993 ; Rouabhia, 1993 ; Djabri, 1996 ; Zenati, 2000 ; Habes, 2006 ; Djamai, 2007 ; Zahi, 2008 ; Zahi, 2014), ces études effectuées afin de suivre l'évolution de la salinité, de mettre en évidence ses origines et les facteurs régissant celle-ci. L'objectif principal de ce travail est de déterminer l'aptitude à l'irrigation des eaux souterraines de la région du lac Fetzara, son évolution spatio-temporelle en fonction de la variation des paramètres physico-chimique de l'eau.

A partir de cette démarche, le manuscrit est organisé en quatre chapitres présentés comme suit :

- Le premier chapitre est consacré à une présentation détaillée de notre zone d'étude, du point de vue situation géographique, et géomorphologique pour découvrir la relation qui existe entre des différentes formes morphologiques ((relief, oueds, plaine...) caractérisant la région du Fetzara.

- Le deuxième chapitre a pour but principal d'étudier les caractéristiques hydro-climatologiques de la région d'étude ; de mieux connaître l'évolution des caractéristiques climatiques dans le temps et dans l'espace, et d'estimer le régime hydrologique des principaux cours d'eau de la région du lac Fetzara.
- Le troisième chapitre a pour objectif d'étudier le contexte géologique et hydrogéologique ; il permet d'identifier les différents matériaux et les différentes structures des formations susceptibles de conduire l'eau à l'alimentation des nappes d'eaux d'eau souterraines de la région.
- Le quatrième sera réservé aux matériels et méthodes utilisés pour l'évaluation de l'aptitude à l'irrigation des eaux souterraines de la région du lac Fetzara, les différents résultats obtenus de l'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux, et l'évolution spatiotemporelle de la qualité en fonction de la variation des paramètres physico-chimique de l'eau.

Enfin, notre travail se termine par une conclusion générale avec quelques recommandations.

# *Chapitre I*

## *Présentation de la zone d'étude*

## I.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à une présentation détaillée de notre zone d'étude, du point de vue situation géographique, et géomorphologique pour découvrir la relation qui existe entre des différentes formes morphologiques caractérisant la région d'étude.

## I.2. Situation géographique

Le lac Fetzara se situe à 18 Km au Sud-ouest du Chef-lieu de la wilaya de Annaba et à 14 Km de la mer Méditerranée (Mouhoub et al. 2013), il se place au centre du quadrillage entre les latitudes  $36^{\circ} 43'$  et  $36^{\circ} 50'$  Nord et les longitudes  $7^{\circ} 24'$  et  $7^{\circ} 39'$  Est ; il s'étend sur 17 km d'Ouest en Est et de 13 km du Nord au Sud avec une superficie d'environ 18600 hectares (Djamai, 2007), il est limité au Nord par le massif de l'Edough, par les collines de Ain Berda au Sud et les cordons dunaires situés à l'Est et à l'Ouest (Fig.I.1).

La partie facilement inondable du lac est située au centre de la zone et couvre une superficie de 13 000 hectares (Fekrach et al. 2014), le lac est partiellement inondé en hiver malgré la présence d'un canal principal creusé afin d'assurer le drainage (Durand, 1950). Cependant, il a été constaté que cet ouvrage, qui se jette dans l'oued Meboudja, était insuffisant pour évacuer toutes les eaux des fortes pluies d'hiver.

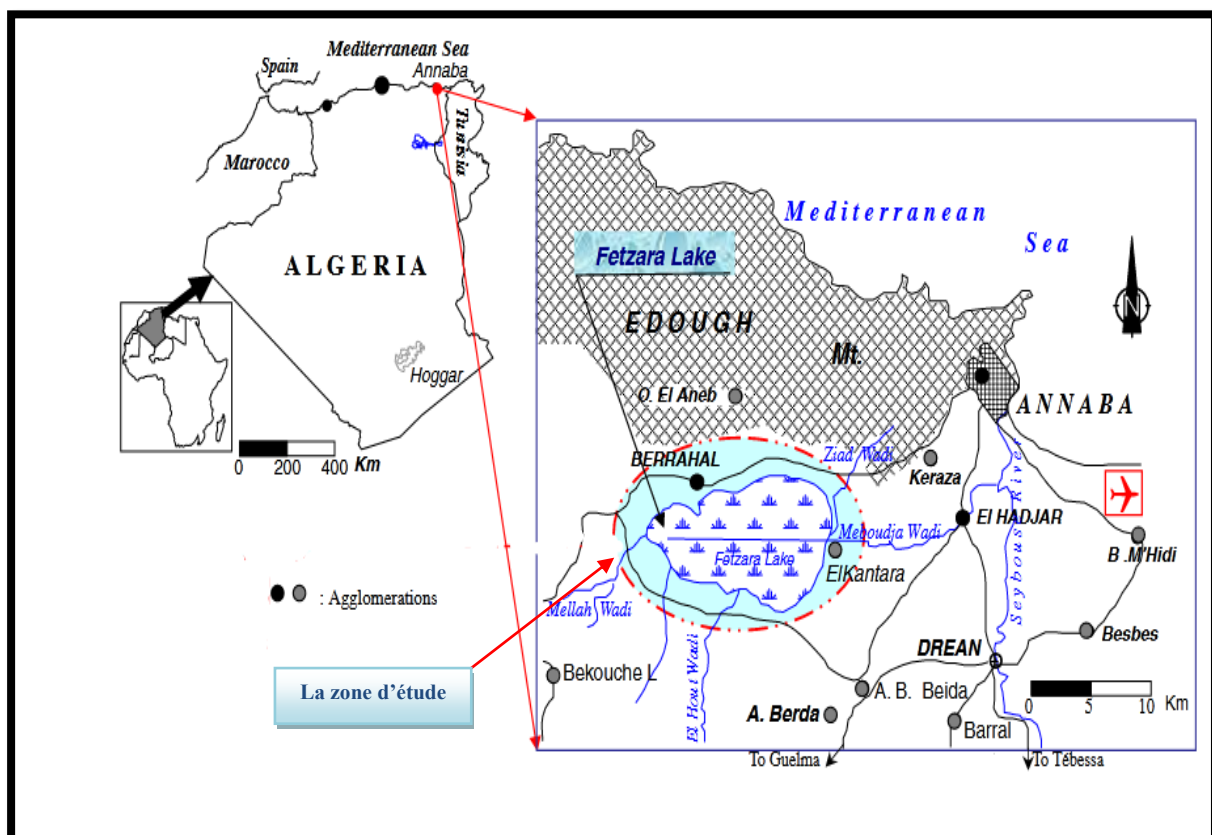


Fig.I.1. Situation géographique du lac Fetzara (Rouabhia et al. 2012)

### I.3. Cadre géomorphologie du lac Fetzara

La cuvette du lac Fetzara située entre le massif de l'Edough et la plaine d'Annaba. Il existe deux formes morphologiques bien distinguées dans la région du lac Fetzara (Fig.I.2). Il s'agit des reliefs montagneux qui correspondent à la retombée des djebels Edough et Belleleita au Nord et aux chaînes telliennes au Sud, et de la plaine d'Annaba. Ces structures sont dues essentiellement à la tectonique ayant affectée la région au Cénozoïque et au Quaternaire (Zahi, 2008). Ces unités appartiennent à deux sous bassins versants principaux qui sont celui du lac Fetzara à l'Ouest avec une superficie de 515 km<sup>2</sup>, et celui d'oued Meboudja à l'Est avec 252 km<sup>2</sup> de superficie.

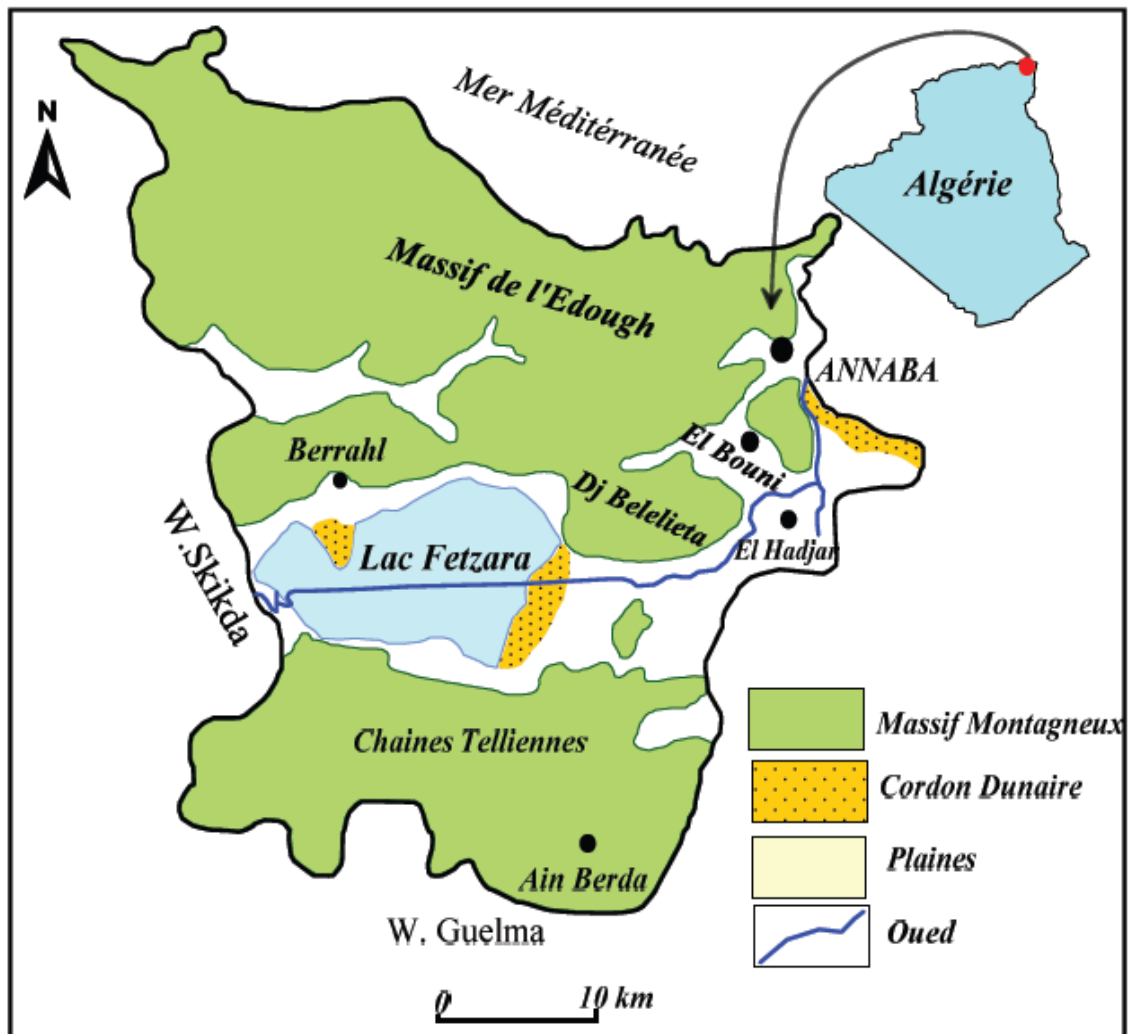


Fig.I.2. Carte géomorphologique de la région de Annaba (Zahi, 2014)

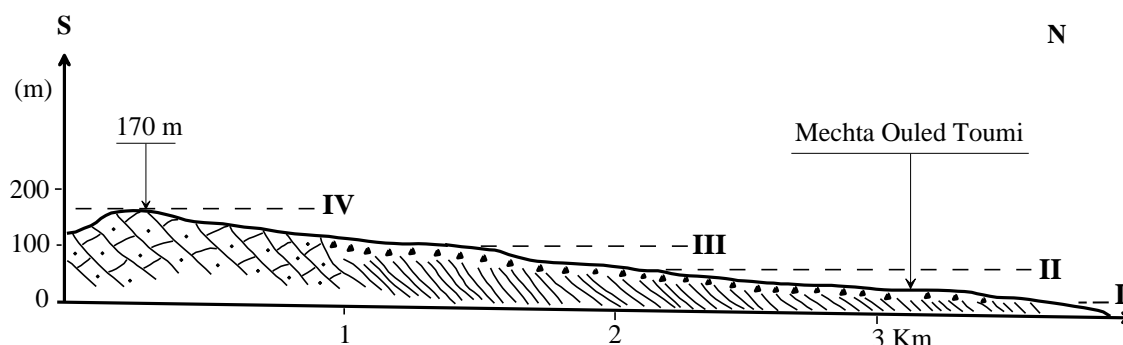
#### I.3.1. Lac Fetzara

La cuvette du lac Fetzara présente des bordures Nord et Sud nettement dissymétriques (Habes, 2013), elle est due à une tectonique active pendant le Quaternaire ayant causée une large dépression dont les dimensions sont approximativement de 17 km d'Ouest en Est et 13 km du



Nord au Sud et constitue la partie basse d'un grand sous bassin versant endoréique de 515 km<sup>2</sup> de superficie.

Au Sud, un véritable piémont avec quatre niveaux de glacis quaternaires étagés sur les grès ou les marnes, qui s'est construit en avant du Tell Nord Guelmien. La coupe ci-dessous (Fig.I.3) montre l'existence de quatre niveaux de glacis sur ce piémont de haut en bas :



**Fig.I.3.** Coupe sur le piémont de la bordure sud du Lac Fetzara (Marre, 1992)

- **Niveau IV** : Au-dessus ce dernier en piémont se trouve des replats de petites tailles qui tronquent les grès pseudo-numidiens de ce massif. Il s'agit d'une région où l'érosion a beaucoup fonctionné durant le Quaternaire (Marre, 1992).

- **Niveau III** : A plusieurs reprises, vers 150-170 m, les grès pseudo-numidiens sont tronqués par un niveau d'érosion incliné vers le Nord, il s'agit là de restes d'un glacis d'ablation. Cependant, grâce aux ravinements, cette forme est constituée par plusieurs mètres de sables argileux rouges emballant quelques blocs de forme cubique et longs de 50m (in Marre, 1992).

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

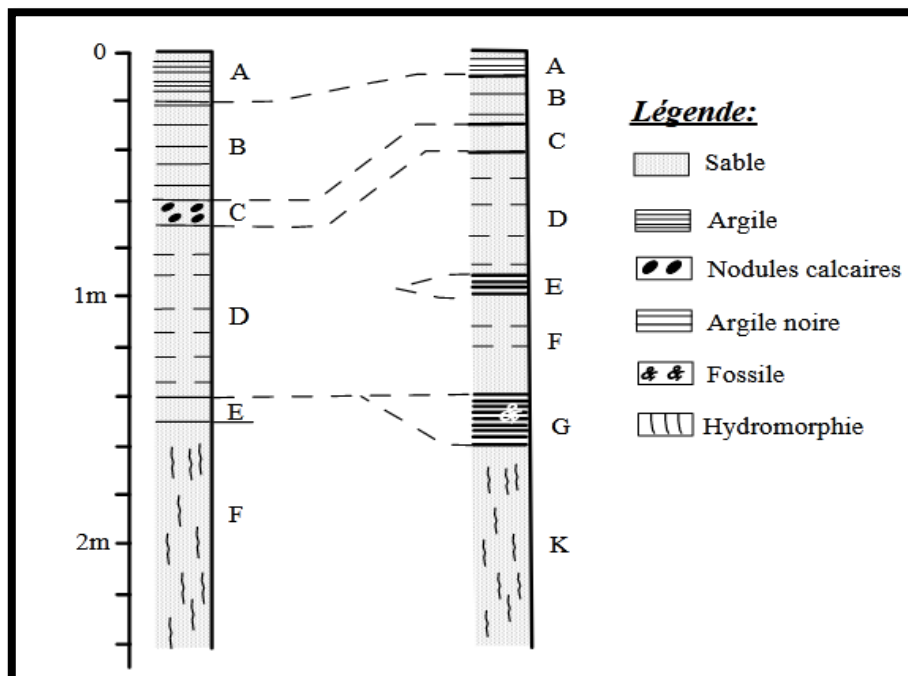
- **Niveau I** : Plusieurs glacis-cônes dominant le fond de la cuvette du lac Fetzara. Un talus d'érosion net, concave et haut de 5 à 10 m termine ces formes. Au pied de ce talus, les formations holocènes sont spatialement peu développées, sauf au débouché de l'Ouest de l'oued El Hout où se construit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

Le lac occupe le fond de la cuvette à l'Ouest, lui succédant à l'Est par la plaine d'El Hadjar qui se prolonge par celle de Annaba. Ces deux ensembles morphologiques sont séparés par un

cordons dunaires, 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 l'oued Meboudja où il assure la vidange du lac.

Une coupe le long du canal (Fig.I.4) permet d'observer des sables argileux jaunâtres avec, à la base des traces d'hydromorphie, des niveaux noirs et argileux qui se terminent en biseaux vers l'aval (Zahi, 2008). 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.



**Fig.I.4.** log stratigraphique du canal de drainage du lac Fetzara (Marre, 1992)

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.

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 (Zahi, 2008). En effet, les failles qui limitent cette cuvette sont restées actives pendant tout le Quaternaire.

D'une manière générale, la topographie du lac Fetzara est relativement simple. La partie la plus profonde du lac est à 10m. La zone du lac Fetzara est divisée en partie montagneuse (altitude > 40m), La plaine formée vers le centre du lac (altitude de 10 à 20m) et les terrains bas (altitude < 10m). La terrasse occupe environ les deux tiers de la superficie totale (Tab.I.1).

*Tab.I.1. Différentes formes topographiques du lac Fetzara (AJCI, 1985)*

Nature des formations	Superficie (ha)	%
Terrains bas (< 10m)	5800	31
Plaine (10-20m)	11800	63
Terrasses (20-40m)	1000	6
Total	18600	100

### I.3.2. Les Montagnes

Le lac Fetzara est limité dans sa partie Nord par le massif de l'Edough, qui est nettement séparé des reliefs situés au Nord-Ouest par la vallée d'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 600 m pour culminer à 1008 m d'altitude au Kef Seba et redescend à 867m vers Seraidi, elle s'abaisse ensuite régulièrement jusqu'au Cap de Garde au Nord de la ville de Annaba.

A l'Est du lac Fetzara, le massif de l'Edough est isolé du Djebel Beleleïta par une vallée à fond plat, il s'agit là d'un fossé d'effondrement de direction Ouest-Est ouvrant ainsi une dépression vers la mer méditerranée. Entre Beleleïta et Bouhamra se creuse la vallée transversale de la basse Meboudja qui prend naissance au pied de la rive dunaire limitée à l'Est par la cuvette du lac Fetzara, et qui entre en confluence avec l'oued Seybouse au Nord d'El Hadjar.

A l'Ouest, Djebel Edough est relié par deux ensembles de collines (Zahi, 2008) ; le premier situé entre les deux communes d'Oued El Aneb et Berrahal (226m), le second au Nord de Boumaiza (130m). Enfin au Sud, l'encadrement montagneux est constitué par les chaînes telliennes qui présentent ici une diversité morphologique encore plus grande que dans le reste de l'Algérie.

### I.3.3. La plaine d'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 des glacis et le littoral avec 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 (*Belhamra, 2001 ; Habes, 2006*).

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

#### **I.3.4. Les sols et le couvert végétal**

L'occupation du sol est un facteur qu'il faut tenir compte. On peut distinguer, en dehors des zones urbanisées, des zones occupées par la végétation naturelle ou par les reboisements et des zones de mise en valeur culturelle (*Fig.I.5*).

❖ **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, etc ...).

Ailleurs, principalement sur les grès, c'est le domaine du maquis méditerranéen typique à cistes et calycotomes associés à des plantes annuelles, le plus souvent tubéreuse et à des touffes de brachypodes rameux. Le Diss n'apparaît en abondance qu'au-dessus de 600 m d'altitude.

Au Nord, la forêt occupe les sommets du massif de Berrahal et la région du Douar Toubeïga à l'Ouest. Le chêne-liège est l'essence principale couvrant environ 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.

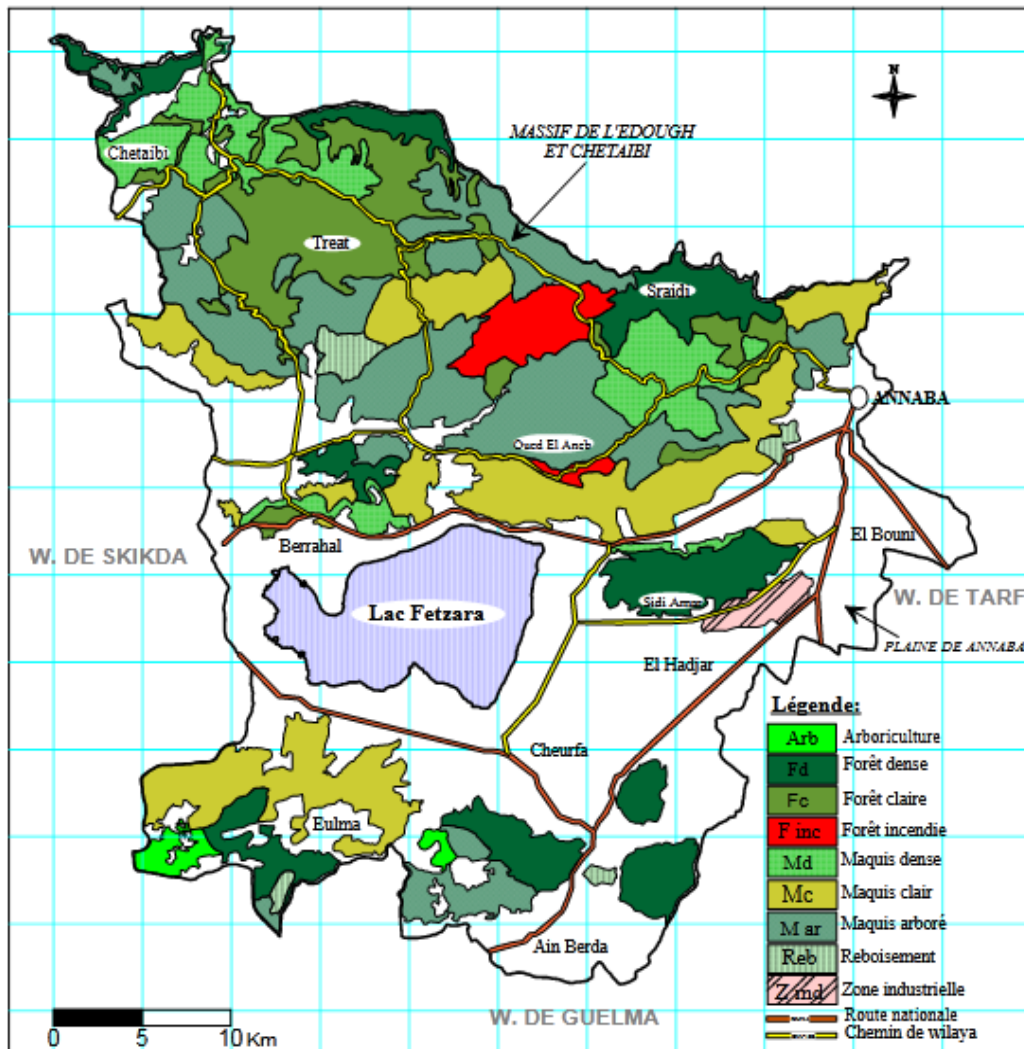


Fig.I.5. Carte des formations forestières de la wilaya de Annaba (DGF, 2007 in Zahi, 2014)

❖ **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 Garâa 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 (Habes, 2013). Le surpâturage pose le problème de régénération des herbes.

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

**I.4. Conclusion**

L'étude géomorphologique de la région du lac Fetzara nous a montré l'origine et la contribution de chaque forme au fonctionnement du lac. Le bassin a une limite Nord et Sud nettement asymétrique, sur laquelle il y a une végétation merveilleuse, frottant à des niveaux assez élevés et des bois à haute altitude. Au Sud, un vrai piémont a été construit avec plusieurs niveaux de glace, en face de la colline du Tell Nord Guelmien. Au Nord, le massif de l'Edough tombe à pic dans le bassin du lac Fetzara, et il y a peu de quadrilatères qui assurent le passage de la montagne au fond de la dépression. Enfin, à l'Est, un télescope suivant le chemin isole la dépression du lac dans la plaine du Hadjar.

## *Chapitre II*

# *Etude Hydro-climatologique*

## II.1. Climatologie

### II.1.1. Introduction

La détermination des paramètres climatiques permet l'estimation de la lame d'eau écoulée 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. Pour cela, nous avons utilisé les données de la station de Ain Berda située à 8km au Sud-est du lac Fetzara, de ce fait les résultats obtenus ne constitueront qu'une approximation des caractéristiques climatiques.

### II.1.2. Station de mesure

Pour déterminer l'évolution temporelle des paramètres climatiques de la région du lac Fetzara Nous avons pris en considération les données de précipitations et de températures de station de Ain Berda pour une période de trente-cinq ans (1975-2010), ses coordonnées sont récapitulées dans le tableau ci-dessous (*Tab.II.1.1*) :

*Tab.II.1.1 Coordonnées géographiques de station météorologique de Ain Berda*

Station	X (Km)	Y (Km)	Z(m)	Période d'observation	Distance par rapport au Lac
Ain Berda	937.6	387.75	73	1975/2010	8Km au S.E

### II.1.3. Etude des facteurs climatiques

#### II.1.3.1. Précipitations

Les précipitations sont un facteur essentiel caractérisant le climat d'une région et sont un des éléments principaux du bilan hydrique. Elles jouent un rôle prépondérant dans le comportement hydraulique des cours d'eaux et dans l'alimentation éventuelle des nappes souterraines.

##### II.1.3.1.1. Précipitations moyennes mensuelles

A partir des données pluviométriques observées à la station de Ain Berda, on a déterminé la moyenne des hauteurs de pluies mensuelles qui sont résumées dans le tableau suivant (*Tab.II.1.2*) :

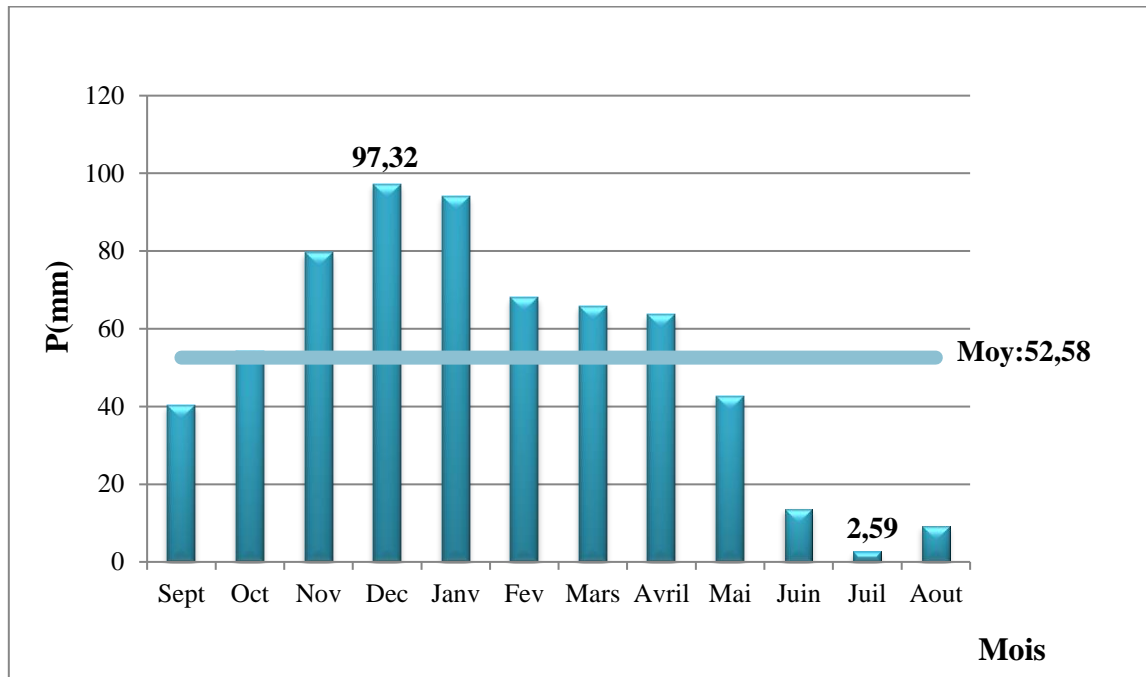
*Tab.II.1.2. Précipitations moyennes mensuelles de la station de Ain Berda (1975-2010)*

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout
P (mm)	40.23	54.13	79.59	97.32	94.01	68.1	65.90	63.63	42.53	13.60	2.594	9.32

La représentation en histogramme des précipitations moyennes mensuelles montre une hétérogénéité importante des précipitations d'un mois à un autre ; les mois les plus pluvieux sont : Décembre, Janvier, Novembre, Février, Mars et Avril. Par contre, les mois de Juin, Juillet et Août



sont les moins pluvieux. Le maximum des précipitations est enregistré au mois de Décembre avec valeur de (97.32 mm), par contre le minimum est enregistré au mois de Juillet de valeur (2.594 mm) (Fig.II.1.1).



**Fig.II.1.1** Précipitations moyennes mensuelles de la station Ain Berda (1975-2010)

### II.1.3.1.2. Coefficient pluviométrique (H)

Ce coefficient permet de déterminer pour une station donnée, si l'année est excédentaire ( $H > 1$ ) ou déficitaire ( $H < 1$ ), il est défini par le rapport de la pluviométrie P d'une année à la pluviométrie moyenne  $\bar{p}$  d'une période d'observation (Fig.II.1.2).

$$H = P / \bar{p}$$

Avec : H : Coefficient pluviométrique.

P : Pluviométrie d'une année (mm).

$\bar{p}$  : Pluviométrie moyenne (mm)

La hauteur moyenne annuelle des précipitations (p) enregistrées durant la période d'observation de la station de Ain Berda est :  $\bar{p} = 630.96$  mm

D'après la figure ci-dessous (fig.2) on peut distinguer que les années excédentaires ( $H > 1$ ) sont : 1976/77, 1978/79, 1983/84, 1984/85, 1986/87, 1990/91, 1992/93, 1995/96, 1997/98, 1998/99, 2002/03, 2003/04, 2004/05, 2008/09, 2009/10, alors que le reste des années sont considérées comme déficitaires ( $H < 1$ ).

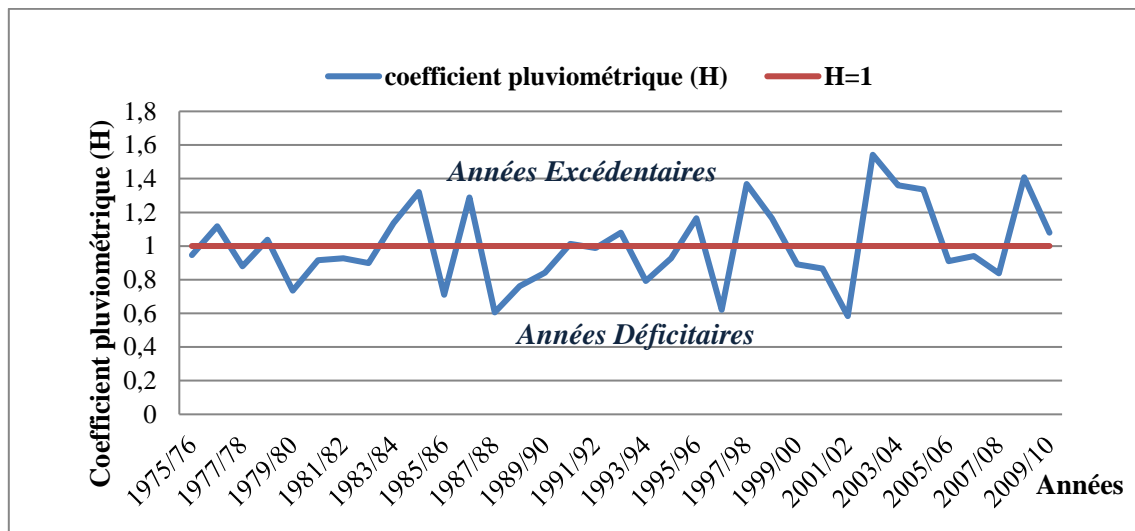


Fig.II.1.2. Coefficient pluviométrique pour la station de Ain Berda (1975/2010)

### II.1.3.1.3. Répartition saisonnière des précipitations

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

- ❖ L'automne : les mois de septembre, octobre et novembre.
- ❖ L'hiver les mois de décembre, janvier et février.
- ❖ Le printemps les mois de mars, avril et mai.
- ❖ L'été les mois de Juin, juillet et août.

La répartition saisonnière des précipitations et leur classification selon les totaux enregistrés sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tab.II.1.3. Répartitions saisonnières des précipitations de la station de Ain Berda (1975-2010)

Station	Ain Berda	
Saisons	P (mm)	P %
Automne (A)	173.96	27.57
Hiver (H)	259.43	41.12
Printemps (P)	172.06	27.27
Eté (E)	25.51	4.04
Indice saisonnier	HAPE	
Type de Climat	Hivernal.	

Les résultats obtenus (Tab.II.1.3) montrent que la saison hivernale est la plus pluvieuse (259.43mm soit 41.12 % des précipitations annuelles, l'Automne est considéré comme la seconde saison pluvieuse (173.96 mm soit 27.57%). Alors que, en saison printanière, le maximum des précipitations est de l'ordre de 172.06 mm soit 27.27 %. En fin, la saison estivale reste la plus sèche avec (25.51 mm soit 4.04 %) (Fig.II.1.3).

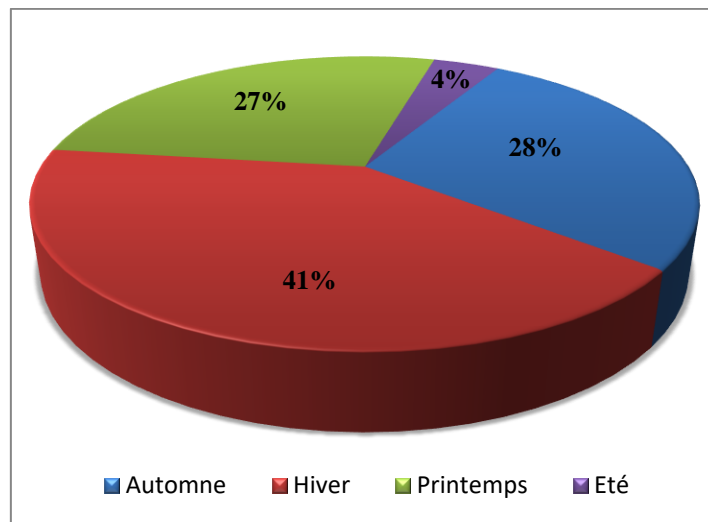


Fig.II.1.3. Répartitions saisonnières des précipitations de la station de Ain Berda (1975-2010)

### II.1.3.2. La 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 de Ain Berda sont consignées dans le tableau ci-dessous (Tab.II.1.4) :

Tab.II.1.4. Températures moyennes mensuelles de la station de Ain Berda (1975-2010)

Mois	Sept	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
T(°C)	22.96	19.67	15.39	12.91	11.56	11.80	13.13	15.18	18.26	21.71	25.18	25.54

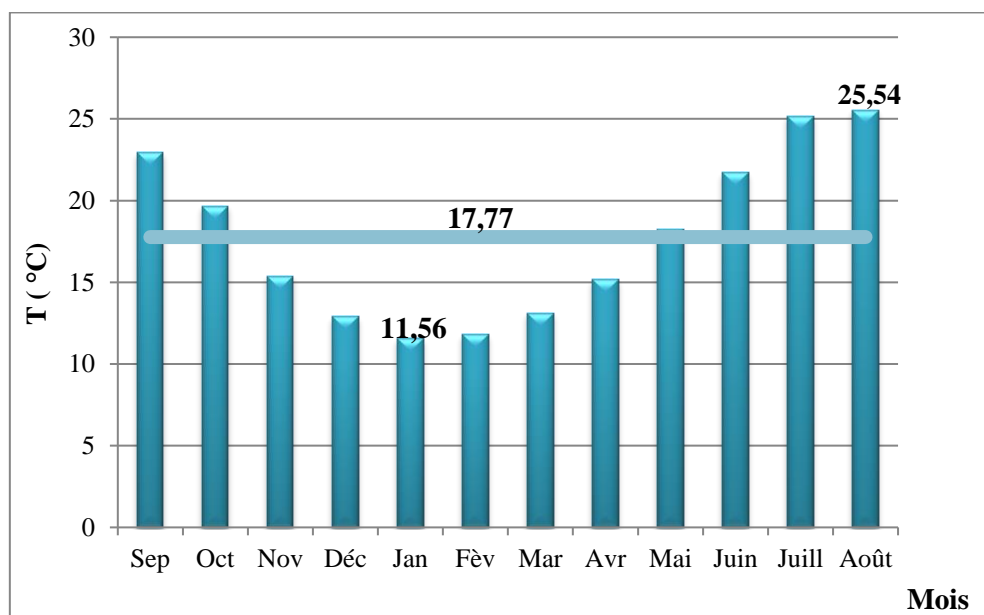


Fig.II.1.4. Températures moyennes mensuelles de la station de Ain Berda (1975-2010)

La représentation graphique de la variation des moyennes mensuelles des températures montre que le mois de Janvier est le mois le plus froid (11.56°C) (Fig.II.1.4), alors que le mois d’Août est le plus chaud (25.54 °C).

#### II.1.4. Diagramme pluviothermique

Le diagramme pluviothermique (Fig.II.1.5) est établi, en combinant les températures et les précipitations moyennes mensuelles pour déterminer les périodes sèches et humides, ensuite le type du climat régnant dans la région.

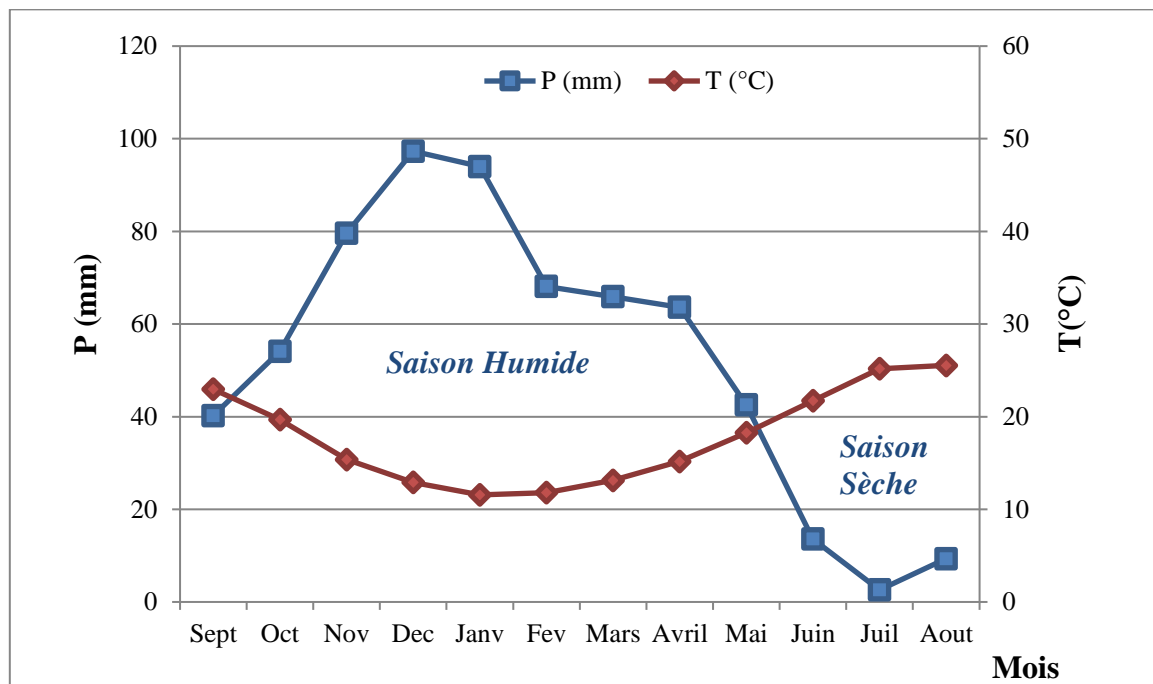


Fig.II.1.5. Diagramme pluviothermique de la station de Ain Berda (1975-2010)

D’après ce diagramme, on peut déterminer deux périodes bien distinctes : l’une humide se caractérisant par une forte pluviométrie et une faible température, elle s’étend du mois d’Octobre jusqu’au mois d’Avril, au cours de cette période les précipitations sont importantes atteignant leurs maximum au mois de Décembre avec 97.32 mm, la seconde sèche couvrant le reste de l’année allant du mois d’Avril jusqu’au mois d’Octobre, au cours de cette période les températures maximales sont atteintes et sont de l’ordre de 25.54 °C.

#### II.1.5. Bilan hydrique

Le bilan de l’eau global correspondant à une équation d’équilibre entre les apports et les pertes qui influent directement sur la variation des réserves. Ainsi pour déterminer le bilan de la zone d’étude, il est indispensable d’évaluer ses composantes (infiltration, ruissellement et évapotranspiration), pour cela, on va se baser sur les données de la station de Ain Berda en utilisant une série d’observation de 35 ans. Il est calculé par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I$$

Avec : P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

ETR : Evapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm).

R : Ruissellement moyen annuel (mm).

I : Infiltration moyenne annuelle (mm).

### II.1.5.1. Evapotranspiration

L'évapotranspiration est la plus importante des paramètres, elle représente la somme des quantités d'eau exprimées en (mm) évaporées par la surface du sol et utilisées par les plantes (*Habes, 2013*).

L'évapotranspiration ou l'évaporation totale est l'ensemble des phénomènes d'évaporation (processus physique) et de transpiration (phénomène biologique), on distingue :

❖ Evapotranspiration potentielle (ETP).

❖ Evapotranspiration réelle (ETR).

#### II.5.1.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)

C'est la somme de quantité 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 nous avons appliqué la formule de **Thornthwaite**. C.W Thornthwaite a établi une correction entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle.

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

ETP: Evapotranspiration mensuelle (mm).

T : Température moyenne mensuelle (°C).

I : Indice thermique annuel;  $I = \sum i$ .

i : Indice thermique mensuel ; déterminé par l'expression;  $i = (T/5)^{1.5}$ .

a : coefficient calculé par la formule ;  $a = 1.6 (I/100) + 0.5$ .

K : coefficient de correction.

#### II.1.5.1.2. Evapotranspiration 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. L'estimation de l'évapotranspiration réelle établie par la méthode de Thornthwaite est liée au volume de précipitations, trois cas peuvent se présenter :

✓ **1<sup>er</sup> 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<sup>ème</sup> Cas** :  $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$ . Dans ce cas, on puisera dans les réserves du sol jusqu'à satisfaction de l'ETP.

✓ **3<sup>ème</sup> Cas** :  $P < ETP$  et  $RFU = 0 \Rightarrow ETR = P$ . Dans ce cas on aura un déficit qui représentera la quantité d'eau à apporter pour l'irrigation (déficit agricole).

### II.1.5.2. Bilan hydrique selon la formule de C.W Thornthwaite

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).

Le tableau suivant (Tab.II.1.5) résume les calculs du bilan hydrologique pour la station de Ain Berda :

*Tab.II.1.5. Bilan hydrique d'après la formule de Thornthwaite (Ain Berda 1975-2010)*

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Total
P (mm)	40.23	54.13	79.59	97.32	94.01	68.10	65.90	63.63	42.53	13.60	2.59	9.32	630,95
T (°C)	22.96	19.67	15.39	12.91	11.56	11.80	13.13	15.18	18.26	21.71	25.18	25.54	17.77
i	9.84	7.80	5.41	4.15	3.51	3.62	4.26	5.30	6.97	9.04	11.30	11.54	I=82.75
K	1.05	0.91	0.75	0.7	0.73	0.78	1.02	1.15	1.32	1.33	1.33	1.24	/
ETP (mm)	108.09	70.66	37.19	25.22	21.49	23.83	37.89	55.63	89.45	123.61	161.98	154.99	910.03
ETR (mm)	40.23	54.13	37.19	25.22	21.49	23.83	37.89	55.63	89.45	66.68	2.59	9.32	463,65
RFU (mm)	0	0	42.40	100	100	100	100	100	53.08	0	0	0	/
EXC (mm)	0	0	0	14.50	72.52	44.27	28.01	8.00	0	0	0	0	167.30
DA (mm)	67.86	16.53	0	0	0	0	0	0	0	56.93	159.39	145.67	446.38

**Interprétation du bilan de Thornthwaite** : On constate qu'il y a deux périodes :

Une période hivernale s'étale du mois d'octobre à avril, caractérisée par des précipitations importantes d'ordre de 522.68mm. Tandis que, l'évapotranspiration est réduite avec une valeur de 255.38 mm. Le stockage se fait à partir d'octobre et l'écoulement se manifeste à partir de décembre et se poursuit jusqu'à avril. Durant cette période, la quantité coulée est égale à 167.30mm.

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

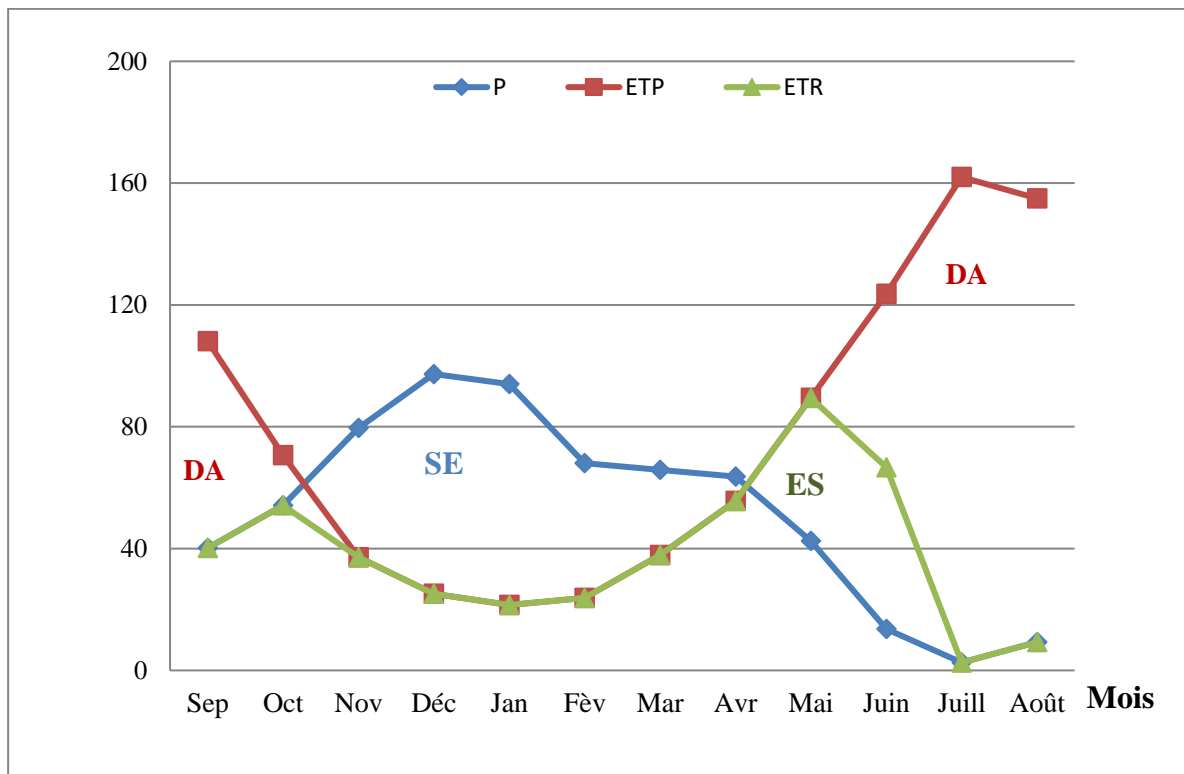


Fig.II.1.6. Bilan hydrologique selon la méthode de Thornthwaite (station de Ain Berda 1975-2010)

### II.1.5.3. Ruissellement

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

- Formule de *Tixeront Berkaloff* :  $R = P^3 / 3 * ETP^2$ , si :  $P < 600$  mm

- Formule de *Tixeront Berkaloff* modifiée par *Romantchouk (1974)* :

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

Avec : P: Précipitations moyennes annuelles (mm),

ETP: Evapotranspiration potentielle annuelle (mm),

R: Ruissellement (mm).

On a :  $P = 630.95$  mm donc on utilise la formule de *Tixeront Berkaloff* modifiée par *Romantchouk (1974)* :  **$R = 83.73$  mm**

### II.1.5.4. Infiltration

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

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

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

Les résultats du bilan hydrologique sont récapitulés dans le tableau suivant (Tab.II.1.6):

Tab. II.1.6. Résultats du bilan hydrologique (en mm)

Station	P (mm)	ETR (mm)	R (mm)	I (mm)
Ain Berda	630.95	463.65	83.73	83.57

## II.2. Hydrologie

### II.2.1. Introduction

L'hydrologie peut se définir comme étant l'étude du cycle de l'eau et l'estimation de ses différents flux, 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.

### II.2.2. Réseau hydrographique

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

Le bassin versant du lac Fetzara est constitué de 30 sous-bassins versants petits et moyens avec une superficie totale de l'ordre de 515 Km<sup>2</sup> (AJCI, 1985). Au Sud du bassin versant, se trouve une ligne de partage des eaux située entre 300 et 400 mètres d'altitude est relativement vaste et onduleux avec une légère pente en direction du lac. Au Nord, la ligne de partage des eaux se situe à une hauteur d'environ 100 mètres avec une pente raide, mis à part les versants de l'oued Zied constitués de montagnes dont la hauteur s'élève à plus de 100 mètres. La ligne de partage des eaux des parties Ouest et Est se situe entre 20 et 30 mètres, le débit d'écoulement est estimé à 210 mm par jour en moyenne (DGF, 2003).

Les eaux du lac Fetzara sont collectées à partir de plusieurs oueds à savoir ; El Hout, El Mellah et Zied ainsi que celles qui se déversent le long des pentes périphériques :

- **Oued El Hout** au Sud, c'est le plus important cours d'eau alimentant le lac, il prend sa source à Djebel Menchoura qui culmine à 795 m d'altitude (Tell Nord Guelmien), il s'écoule du Sud au Nord sur une longueur de 10 km.
- **Oued Zied** au Nord, qui a creusé sa vallée entre Djebel Edough et Djebel Bougantas, prenant naissance à environ 900 m d'altitude. Il s'écoule du Nord vers le Sud-Ouest sur une longueur de 10.5 km et débouche dans le lac Fetzara.
- **Oued Mellah** à l'Ouest, qui naît sur l'élévation de Koudiat Guendoul (100 - 130 m d'altitude) et prend sa source aux alentours de l'oued El Kébir Ouest. Il s'écoule de l'Ouest vers le canal d'assèchement du lac, avec une longueur à peu près de 8 km.



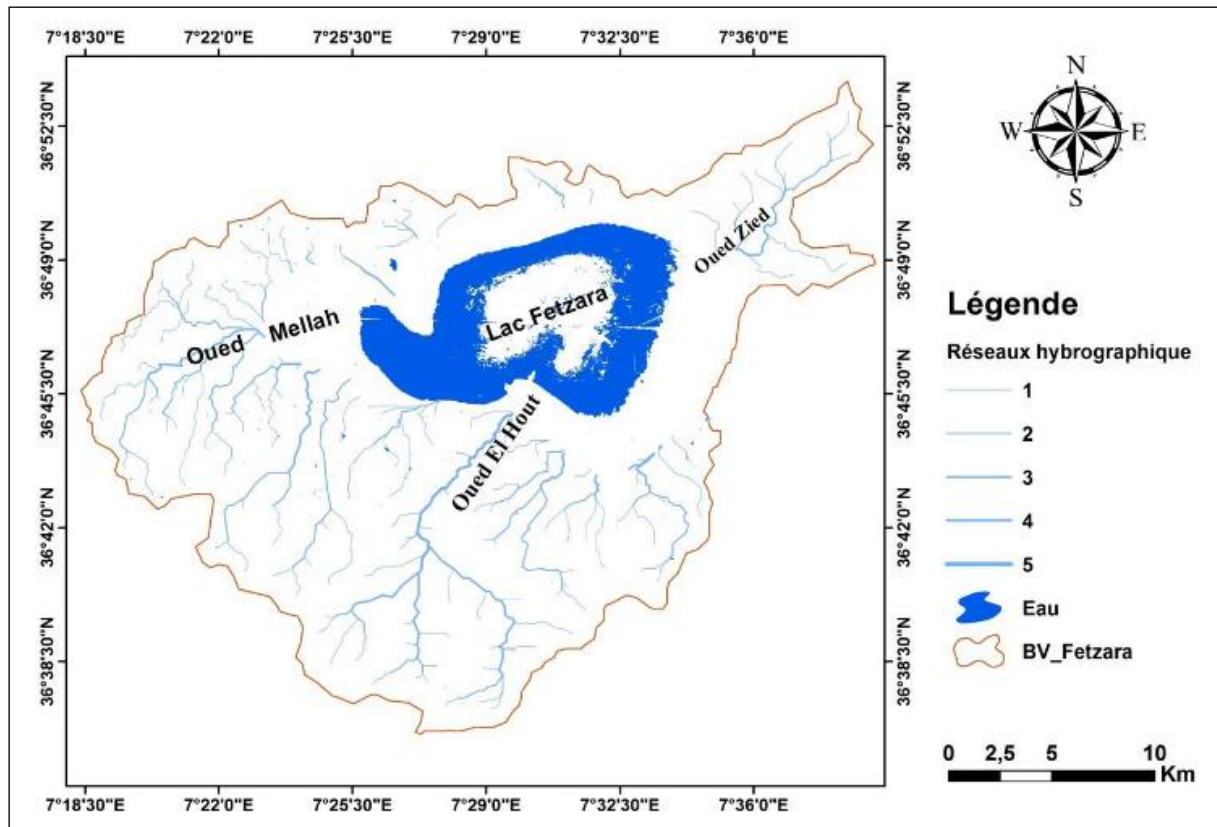
Les cours d'eau alimentant le lac Fetzara sont caractérisés par un régime très irrégulier, torrentiel en hiver et sec en été, ce qui dénote une variation importante des apports au lac, ces derniers sont importants en saison pluvieuse et sont inexistantes en période de sécheresse à l'exception de l'oued El Hout continuant seule à alimenter le site (DGF, 2003). Les nombreux affluents constituent également un apport non négligeable de la cuvette du lac à un débit de 141 à 145 m<sup>3</sup>/s (Marre, 1992).

Le drainage des eaux est assuré par le canal principal d'assèchement qui traverse le centre du lac, dont le but est de garder un bon équilibre d'écoulement à l'intérieur du lac, maintenir le niveau du lac à une certaine profondeur et lutter contre les inondations dans la partie aval (Zenati, 2010).

Ce canal se termine par un pont-vanne qui assure l'alimentation de l'oued Meboudja, ce dernier se déverse au niveau de l'oued Seybouse qui débouche dans la mer Méditerranée un peu plus à l'Est du site (DGF, 2003). Cependant, cette évacuation des eaux reste insuffisante (Habes, 2006), provoquant ainsi des phénomènes d'hydromorphie à cause des effets d'inondation et aussi une grande salinisation (Fig.II.2.7 ; Tab.II.2.7).

**Tab.II.2.7.** Quelques caractéristiques de sous bassin versant du lac Fetzara

Principaux sous bassins versants	Oued EL Hout	Oued Mellah	Oued Zied
Situation par rapport au lac	au Sud	à l'Ouest	au Nord-est
Longueur	10 Km	8 Km	10.5 Km
Superficie	81 Km <sup>2</sup>	47 Km <sup>2</sup>	19 Km <sup>2</sup>
	15.73 %	9.13 %	3.69 %



*Fig.II.2.7. Réseau hydrographique du bassin versant du lac Fetzara (Oued-Elhacen, 2016)*

### II.3. Conclusion

L'étude climatologique de la région d'étude, montre que la région est caractérisée par un climat méditerranéen avec deux périodes bien distinctes : l'une froide et humide s'étend de la fin de septembre jusqu'au mois de mai, et l'autre chaude et sèche occupe le reste des mois.

La région d'étude reçoit des précipitations annuelles moyennes de l'ordre de : 630.96 mm et une température moyenne annuelle de l'ordre de 17.77 °C. La reconstitution du stock commence au mois de novembre et s'achève en avril. Son épuisement s'observe en mai, ce qui provoque un déficit agricole (DA) nécessitant une irrigation surtout pour la période allant de juin jusqu'à octobre.

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

*Chapitre III*  
*Aperçu Géologique*  
*&*  
*Hydrogéologique*

### III.1. Introduction

L'aperçu géologique est fondamental à l'étude hydrogéologique, il 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. Pour la compréhension du fonctionnement des nappes et de leurs régimes on doit faire une étude hydrogéologique car cette approche permet l'estimation des paramètres hydrodynamiques selon le contexte de l'aquifère.

### III.2. Cadre géologique

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, Bebeleïta et Bouhamra), et des terrains sédimentaires occupent le reste de la région (Fig.III.1).

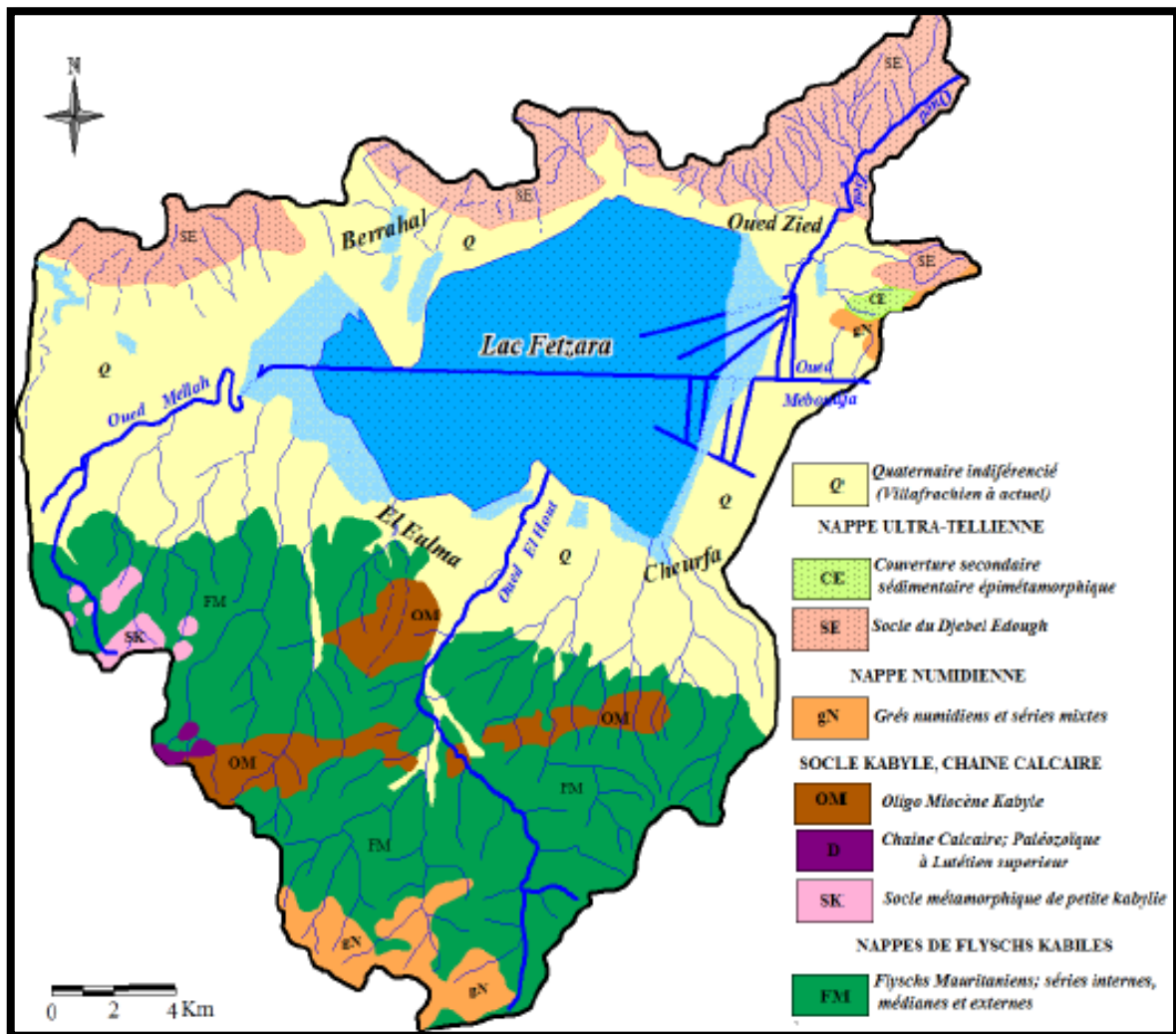


Fig.III.1. Carte géologique du bassin versant du lac Fetzara (Zahi, 2014)

### III.2.1. Massif de l'Edough

Le massif de l'Edough constitue le complexe métamorphique le plus oriental du littoral Algérien (Fig.III.2). Il a fait l'objet de plusieurs études géologiques (Hilly, 1962 ; Vila, 1970 ; Gleizes et al. 1988; Marignac et Zimmermann, 1983 ; Marignac, 1985 ; Monié et al. 1992 ; Hammor, 1992 ; Aissa et al. 1995 ; Hammor et Lancelot, 1998 ; Laouar et al. 2002) et il est considéré comme une partie des zones internes de la chaîne alpine de l'Afrique du Nord, originaire de l'activité tectonique dans le bassin méditerranéen occidental associée à la collision de la plaque africaine et européenne durant la période Oligo-Miocène (Auzende et al. 1975 ; Buillin, 1979 ; 1986 ; Cohen, 1980 ; Maurey et al. 2000 ; Laouar et al. 2005 ).

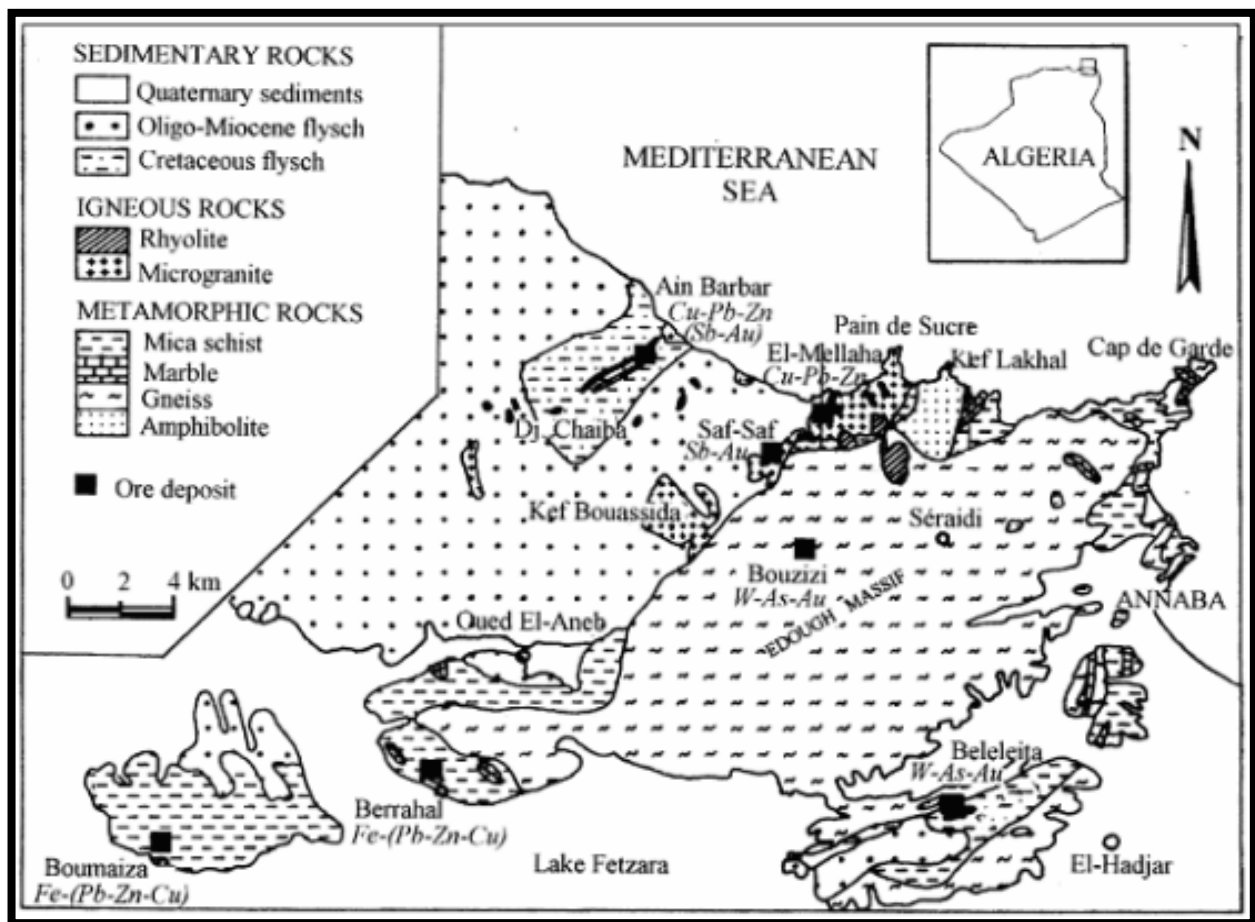


Fig.III.2. Carte géologique du massif de l'Edough (Laouar et al. 2002)

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 daté par la méthode U-Pb à  $595 \pm 51$  Ma. Pour les orthogneiss de base est  $606 \pm 55$  Ma. Pour les leucogranites supérieurs qui sont fortement déformé (Hammor et Lancelot, 1998), et donc ils ont été considérés comme des roches granitiques mises en place durant l'orogénèse

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

Les terrains cristallophylliens sont, en partie, recouverts par un système de nappes sédimentaires résultant de l'activité tectonique oligo-miocène. Ces nappes sont constituées de marnes, d'argiles et de grès crétacés (flysch crétacé), et de grès oligo-miocènes (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 (*Bolfa, 1948 ; Marignac, 1985*) ; les gîtes à W-Sn associés aux skarns de Bouzizi et Beleleïta (*Aissa et al. 1995*) ; et les gîtes de Fe-Pb-Zn-Cu associés aux skarns et amphibolites de la région de Boumaïza et de Berrahal.

### III.2.2. Description lithologique du massif

**III.2.2.1. 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. 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 ortho-gneiss et de  $1630 \pm 50$  Ma. Pour les para-gneiss. Les ortho gneiss 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 méga-cristaux 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 ortho-gneiss (*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 iso-chimique.

**b. Les micaschistes :** Ils sont constitués de deux ensembles principaux :

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

L'ensemble supérieur est constitué par une série dite « des alternances » (*Gleizes et al. 1988 ; Caby et Hammor, 1992*), surmonté par une unité épi-métamorphique. La série des alternances est caractérisée par une alternance régulière de micaschistes, souvent fortement alumineux, et quartzites feldspathiques d'épaisseur décimétrique à métrique. La découverte d'acritrches (*Ilavsky et Snopkova, 1987*) précise que cette série est d'âge Paléozoïque (Ordovicien à Dévonien). L'unité épi-métamorphique, quant à elle, est représentée par les métapélites de Bleleita, Boumaiza et de Berrahal. Elle correspond à des micaschistes à mica blanc, biotite, disthène, staurotide, rutil et parfois grenat, inter-stratifiés avec des marbres.

**c. Les roches méta basiques :** 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 Lakhel (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, rutil, 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, 1992). Parmi les roches ultrabasiques, 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 (1992) considèrent les amphibolites de Kef Lakhal comme roches ignées basiques à ultrabasiques de nature effusive, formées dans un domaine de marge continentale.

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

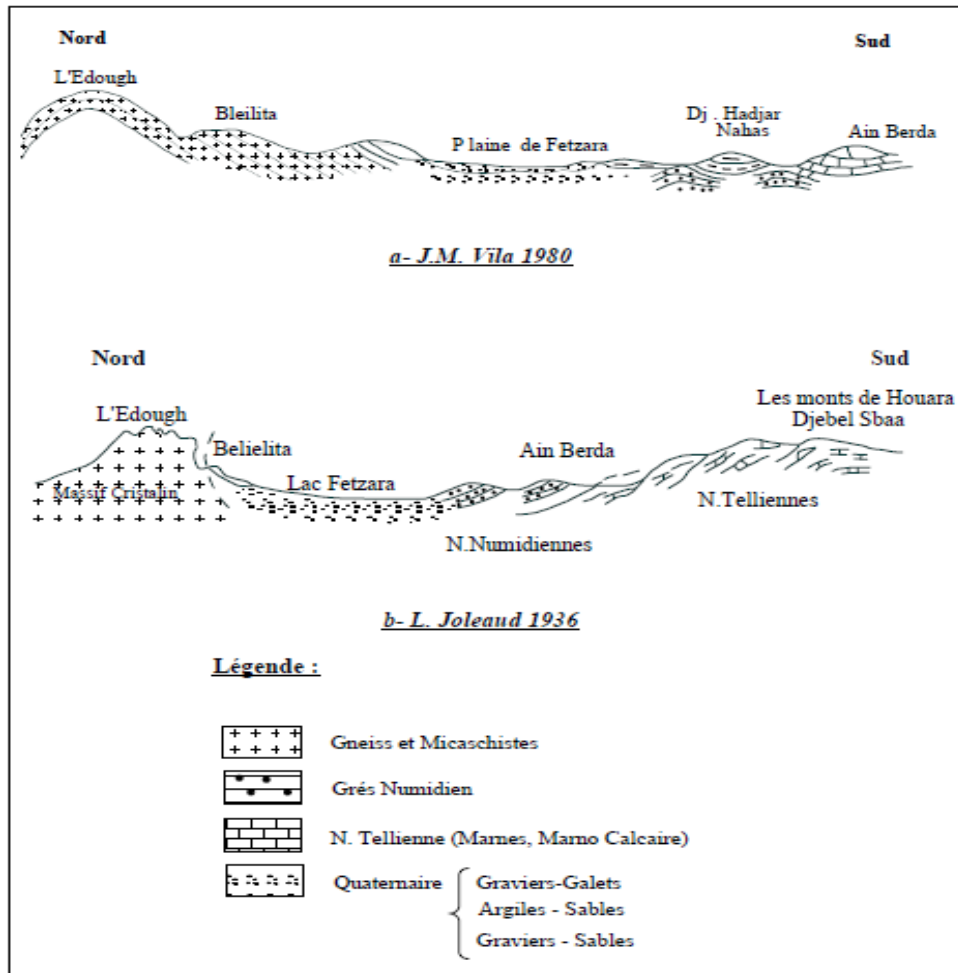
**e. Le magmatisme Tertiaire :** Le magmatisme tertiaire de l'Edough est représenté par des leucogranites et aplo-pegmatites d'âge Burdigalien (Aissa et al. 1995) et des microgranites et rhyolites d'âge Langhien (Marignac et Zimmermann, 1983). Les leucogranites et aplo-pegmatites se rencontrent souvent 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.

### III.2.2. 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 pas un ensemble homogène, car on y trouve des dunes sableuses des espaces marécageux, des plaines fertiles et petits reliefs. De l'Ouest à l'Est, on distingue successivement la plaine de Guerbes, la dépression du lac Fetzara, la plaine d'El Hadjar et, la plaine d'Annaba. Elles sont caractérisées par des sédiments quaternaires



récents, constituant ainsi le fond de cette dépression tectonique (Fig.III.3). Les grès numidiens constituent les sommets, dont les plus importants se situent autour du village de Daghoussa (Habes, 2013).



**Fig.III.3.** Coupes géologiques entre Ain Berda et l'Edough, passant par le lac Fetzara (in Zahi, 2008)

Les formations récentes jouent un rôle considérable dans la constitution géologique de la région d'Annaba qui se présente aussi comme un secteur jeune de l'Algérie (Zenati, 2010). Les études antérieures (Joleaud, 1936 ; Vila, 1980) ont fait apparaître les traits essentiels du Quaternaire :

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

### III.3. Hydrogéologie

L'étude de l'hydrogéologie de la région est très importante, car elle nous permet d'envisager les différents types d'aquifère ainsi que le processus d'alimentation de ces derniers. La région d'Annaba est caractérisée par un ensemble de nappes se répartissant de manière hétérogène selon la description géologique des terrains et des caractéristiques hydrogéologiques de la zone d'étude.

#### III.3.1. Description des différents aquifères

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

##### III.3.1.1. La nappe superficielle

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

- **La nappe des gneiss altérés** : Elle se localise dans la région Nord-Est du lac Fetzara, sur le flanc Est des massifs métamorphiques de Bouhamra et Beleleïta (*Fig.III.4*). La nappe est alimentée par les eaux de pluie, son épaisseur moyenne est de 15 m. Elle est exploitée par des puits et des forages pour divers usages (industrie, élevage, alimentation humaine), avec un débit moyen des captages d'ordre de 2 l/s et elle est caractérisée par une perméabilité qui oscille entre  $10^{-6}$  et  $10^{-5}$  m/s (*Derradji et al, 2005*).
- **La nappe des alluvions** : Cette nappe est répandue sur la majorité de la plaine d'Annaba (*Fig.III.4*). D'après la géomorphologie de la région, on peut diviser la nappe en deux régions communiquant entre elles à travers le cordon dunaire (Guantra), dont la texture est différente (sables).

La région Est présente une nappe superficielle continue localisée dans la plaine Ouest d'El Hadjar ainsi que dans la région d'Allélick.

La région Ouest est une nappe superficielle discontinue qui entoure le lac Fetzara. La lithologie de la nappe entourant le lac est constituée par des alluvions récentes (sables, limons, argiles) avec une texture argilo-sableuse et argilo-limoneuse, son épaisseur varie entre 2 et 10 m, donc à potentialités hydrauliques très limitées.

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

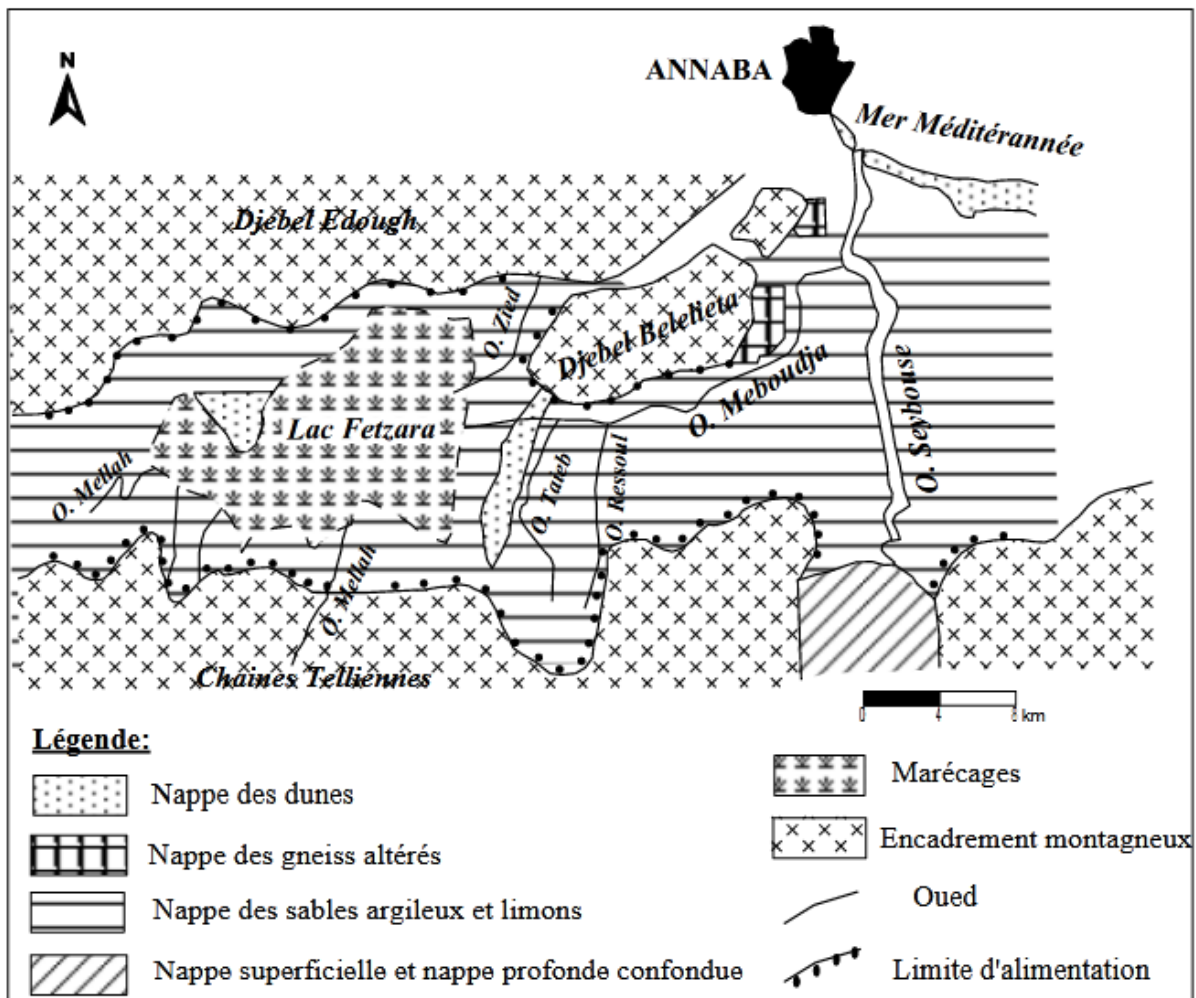


Fig.III.4. Nappes superficielles de la plaine d'Annaba (in Habes, 2006)

### III.3.1.2. Les nappes profondes

- **La nappe des cipolins (formations métamorphiques) :** Elle est contenue dans les lentilles des calcaires métamorphiques fissurés des massifs de Bouhamra et Beleleita, en contact avec la nappe des graviers (plaine Ouest de Annaba), elle profonde de 12 à 80 m, avec une épaisseur qui ne dépasse pas les 70 m et leur superficie est inférieure à 100 ha (Hani, 2003). Les débits d'exploitation des forages sont de l'ordre de 15 l/s, la transmissivité varie entre  $5 \cdot 10^{-5}$  et  $10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$  (Derradji et al. 2005) et la perméabilité entre  $10^{-6}$  et  $10^{-5} \text{m/s}$  (Zenati, 2010).

- **La nappe des graviers :** Cette nappe est tantôt libre tantôt captive, avec une épaisseur très variable selon les zones, elle varie de 2 à 70 m (Fig.III.5). La nappe est captive dans la région d'Annaba en dessous de la nappe superficielle et devient libre dans la région de Dréan. Cette nappe pourrait, dans certains cas, être alimentée partiellement par une drainance à partir de la nappe superficielle (Derradji et al. 2005). Elle est contenue dans les graviers dans sa partie captive, par contre elle est constituée de sables et de galets du Plio-Quaternaire dans sa partie libre. Cette nappe est caractérisée par une perméabilité qui varie de  $10^{-4}$  à  $10^{-5} \text{m/s}$  et une transmissivité oscillante entre  $3 \cdot 10^{-2}$  et  $3.5 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$  dans la région de Dréan, entre  $4 \cdot 10^{-2}$  et  $5 \cdot 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$  au Nord de Ben M'Hidi et dans la région de la Mafragh et

entre  $10^{-3}$  et  $2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  dans la région de Bouteldja. Le coefficient d'emmagasinement est parfois très faible de l'ordre de  $10^{-4}$  où la nappe est captive et atteint  $10^{-2}$  où elle est libre (Derradji et al, 2005 ; Zenati, 2010).

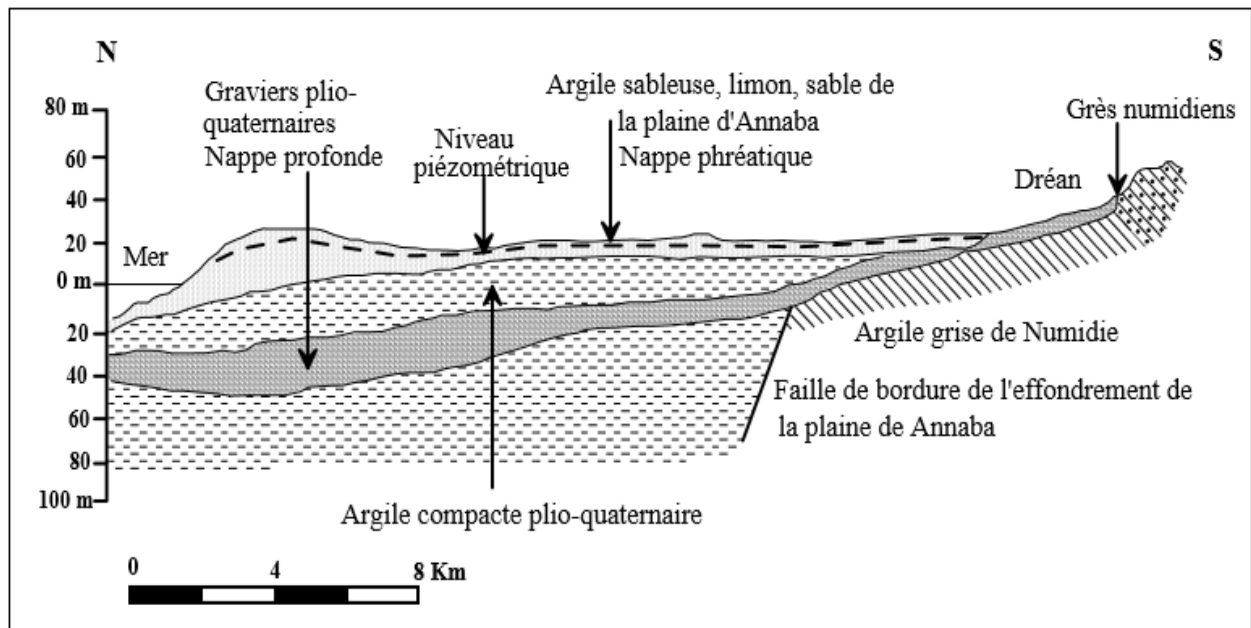


Fig.III.5. Coupe schématique du système aquifère d'Annaba (in Derradji et al, 2005)

#### III.4. Conclusion

La région d'étude fait partie de l'ensemble géologique du Tell Algérien Nord oriental. Elle comporte à la fois les affleurements de terrains métamorphiques, des roches éruptives et des terrains sédimentaires. Les formations des bordures sont constituées de gneiss, de schistes, de micaschistes, de cipolins, de marnes, de marno-calcaires métamorphiques et de formations grésio-argileuses. Elles sont relativement de faible potentialité hydraulique mais constituent des zones d'alimentations pour les nappes.

Les formations sédimentaires correspondent à un ensemble non uniforme où on trouve un espace marécageux, des dunes sableuses et des plaines fertiles. Ces deux dernières sont considérées comme des formations potentiellement aquifères. Elles sont caractérisées par des sédiments quaternaires. La nappe superficielle entourant le lac Fetzara est contenue dans des alluvions récentes et actuelles, elle présente une texture argilo-sableuse et argilo-limoneuse. La transmissivité de cette nappe varie entre  $0.13 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  et  $1.4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ , avec des sols moyennement perméables à perméables, où le coefficient de perméabilité varie entre  $0.28 \cdot 10^{-5}$  et  $5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ .

*Chapitre IV*

*Aptitudes à l'irrigation des eaux  
souterraines de la région du lac  
Fetzara*

## **IV.1. Introduction**

Généralement, l'eau d'irrigation, qu'elle que soit son origine superficielle ou souterraine, n'est jamais pure ; elle contient des sels dissous qui peuvent affecter les sols et les cultures suivant leur concentration, il est important alors d'adopter les pratiques agricoles à l'eau dont on dispose, sachant que les comportements seront différents suivant la nature des sels en cause. La composition chimique de l'eau dépend de l'environnement dans lequel elle se trouve sous forme d'un processus d'écoulement ou d'un stockage. Cette composition joue un rôle important dans la détermination de sa qualité (salinité, dureté...etc.) et ses usages (alimentation en eau potable, irrigation, industrie ... etc.).

Le présent chapitre a été menée afin de déterminer l'aptitude à l'irrigation des eaux souterraines de la région du lac Fetzara son évolution spatio-temporelle en fonction de la variation des paramètres physico-chimique de l'eau.

## **IV.2. Les ressources en eau pour l'irrigation**

L'agriculture est, de loin, l'industrie ayant la plus grande consommation d'eau. L'irrigation des régions agricoles représente 70% de l'eau utilisée dans le monde entier. Dans plusieurs pays en voie de développement, l'irrigation représente jusqu'à 95% de toutes les utilisations d'eau, et joue un rôle important dans la production de nourriture et la sécurité alimentaire. Les futures stratégies de développement agricole de la plupart de ces pays dépendent de la possibilité de maintenir, d'améliorer et d'étendre l'agriculture irriguée. Les réserves disponibles d'eaux naturelles sont constituées des eaux souterraines (infiltration, nappes), des eaux de surface stagnantes (lacs, retenues de barrages) ou en écoulement (rivières, fleuves).

### **IV.2.1. Les eaux souterraines**

L'eau souterraine est une eau qui s'accumule sous terre, elle provient principalement de l'infiltration des eaux superficielles. Les différents types de roches et de terre peuvent contenir différents montants d'eau. Les nappes d'eaux souterraines peuvent être de deux types selon qu'elles circulent sous une couche perméable ou non : (nappes libres et nappes captives). La nature géologique du terrain a une influence déterminante sur la composition chimique de l'eau retenue. À tout instant, l'eau est en contact avec le sol dans lequel elle stagne ou circule : il s'établit un équilibre entre la composition du terrain et celle de l'eau. Les eaux circulant dans un sous-sol sablonneux ou granitique sont acides et peu minéralisées. Les eaux circulant dans des sols calcaires sont bicarbonatées calciques et présentent souvent une dureté élevée.

### IV.2.2. Les eaux de surface

Elles ont pour origine, soit des nappes souterraines dont l'émergence constitue une source, soit les eaux de ruissellement. Ces eaux se rassemblent en cours d'eau, caractérisés par une vitesse de circulation appréciable. Elles peuvent se trouver stockées en réserves naturelles (lacs) ou artificielles (retenues de barrages) où peut apparaître une grande hétérogénéité de la qualité selon la profondeur. La composition chimique des eaux de surface dépend de la nature des terrains rencontrés durant leur parcours. Au cours de son cheminement, l'eau dissout les différents éléments constitutifs des terrains.

### IV.3. Systèmes des irrigations

L'irrigation est l'application de l'eau au sol dans le but de rafraîchir le sol et l'atmosphère, par ce moyen réaliser les conditions les plus favorables pour la croissance des plantes. Mais quel que soit l'origine de l'eau (cours d'eau naturel, nappe souterraine, eau de barrage) et son mode de transport (canaux, conduite sous pression), le problème qui se pose est comment répartir cette eau sur le sol de façon que les plantes en tirent le maximum de profit. Cependant le moyen de répartition de l'eau sur le sol ne doit pas toujours répondre à ce critère d'une production maximale, donc on doit essentiellement envisager un choix minutieusement détaillé du mode d'irrigation et de la technique d'arrosage et compatibilité avec les contraintes de la région d'étude. Les trois techniques les plus couramment utilisées sont : l'irrigation de surface, l'irrigation par aspersion, et l'irrigation à la goutte à goutte (FAO, 1990).

#### IV.3.1. Irrigation de surface

L'irrigation de surface (« irrigation par sillons », « à la raie » ou « gravitaire »), utilise la gravité via un réseau de canaux et rigoles de taille dégressive. L'arrosage lui-même s'effectue ensuite par ruissellement, par submersion ou par infiltration dans le sous-sol proche des cultures.

- *Irrigation par bassin* : Les bassins sont constitués de cuvettes en terre, à fond à peu près plat, entourées de diguettes de faible hauteur ou levées. Ces levées sont conçues pour empêcher le passage de l'eau aux champs adjacents. Cette technique est utilisée, d'une façon générale, pour l'irrigation des rizières sur terrain plat, ou des terrasses à flanc de coteau. La méthode par bassins est aussi utilisée pour l'irrigation des arbres fruitiers ; dans ce cas une petite cuvette (bassin) est aménagée autour de chaque arbre. En général, cette technique d'irrigation s'applique à toutes les cultures qui peuvent tolérer la submersion par les eaux pour une longue durée (FAO, 1990).

- *Irrigation par sillon / à la raie* : les sillons sont alimentés par des prises d'eau aménagées sur les berges du canal d'amenée. Ces ouvrages de prise peuvent être soit de simples ouvertures aménagées sur les berges du canal d'amenée, soit des siphons, ou bien des tuyaux d'alimentation

passant à travers la berge du canal d'amenée (FAO, 1990). L'irrigation par sillon permet d'éviter beaucoup de travaux liés à la distribution, de réduire l'érosion du sol à la tête de la raie. L'irrigation à la raie ou par rigole convient parfaitement aux sols présentant une pente comprise entre 0.2 et 3%. Les sillons sont séparés d'une distance variante entre 0.6 et 1.25 m, selon le type de sol et la culture. Suivant le débit dont on dispose, on peut irriguer un ou plusieurs sillons à la fois. Les raies peuvent être parallèles ou perpendiculaires à la rigole permanente d'amenée d'eau. D'une manière générale, l'irrigation est réalisée suivant un débit unique ou suivant une succession de deux débits différents, un premier débit important qui est appelé débit d'attaque et un deuxième débit plus faible qui est appelé débit d'entretien. L'irrigation à la raie se prête mieux à la mécanisation par siphon, par rampe à vannettes, par gaine souple ou par trans-irrigation (Azouggagh, 2001).

- *Irrigation par planche* : en agriculture, une planche désigne une portion longue et étroite d'un jardin ou d'un champ. Le principe de l'irrigation par planche est de faire couler une mince couche d'eau sur des planches longues et étroites pour un sol à pente faible selon les cultures). L'eau ruisselle et s'infiltre au cours de son parcours le long de la planche. Pour éviter un gaspillage excessif de l'eau, elle est déversée par une ou plusieurs vannes dans le canal d'amenée, guidée le long de la planche par des bourrelets latéraux peu élevés et larges (afin qu'ils n'opposent aucun obstacle au passage des machines, en période sèche). Un canal de colature recueille, au bas de la planche, les eaux en excès.

### **IV.3.2. Irrigation par aspersion**

L'irrigation par aspersion s'est rapidement développée après 2ème guerre mondiale, notamment en Europe et aux Etats-Unis. Avec les améliorations techniques de rendement et de la baisse du coût, elle s'est petit à petit développée dans les régions arides et semi-arides. L'eau est transportée dans des réseaux de conduites sous pression puis délivrée au niveau de la parcelle par des bornes qui régulent la pression et le débit. L'eau est ensuite dirigée dans d'autres conduites qui alimentent sous pression des asperseurs qui répandent l'eau en pluie. Il existe deux types d'irrigation par aspersion ; aspersion traditionnelle et aspersion mécanisée (Saiyouri, 2012).

### **IV.3.3. Irrigation au goutte à goutte**

Dans l'irrigation goutte à goutte, l'eau est livrée à la plante à faible dose entraînant ainsi l'humidification d'une fraction du sol. Ceci permet de limiter les pertes par évaporation et percolation. Elle permet aussi de réduire le développement des mauvaises herbes. Elle met également en œuvre des équipements fixes et légers, et permet la fertigation. Dans la plupart des cas, elle exige une automatisation à travers des contrôleurs associés à des vannes volumétriques et/ou hydrauliques et des électrovannes (Azouggagh, 2001).



#### IV.4. L'étude géochimique et l'aptitudes des eaux souterraines à l'irrigation de la région du lac Fetzara

La composition chimique des eaux souterraines, destinées à l'irrigation, présente un des problèmes majeurs dans les zones méditerranéennes, compte tenu de son effet sur la détérioration de la qualité de l'eau et la baisse des rendements agricoles (*Rouabhia et al. 2010*). Plusieurs études (*Kherici, 1993 ; Rouabhia, 1993 ; Djabri, 1996 ; Zenati, 2000, Djamai 2007, Zahi, 2014*) ont été effectuées sur les eaux souterraines de la région du Fetzara afin de suivre l'évolution de la salinité, de mettre en évidence ses origines et les facteurs régissant celle-ci, car la salinité des eaux reste l'une des principaux problèmes des eaux. Cette dernière est souvent mal maîtrisée car ses origines sont multiples et peuvent être d'origines naturelles ou anthropiques. Ces études antérieures indiquent que la forte salinité des eaux de l'aquifère peu profond est liée à deux origines : les dépôts évaporitiques existant dans la plaine sous forme de lentilles et la dissolution des roches carbonatées du substratum métamorphique existant au nord de la plaine. L'objectif principal de la présente étude est de contrôler l'état qui a été mesurée de la chimie des eaux souterraines, son évolution spatiotemporelle et la compréhension des différents processus qui sont à l'origine de la salinité des eaux afin de déterminer l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation dans la région du lac Fetzara.

Pour cet objectif, cette étude a été réalisée sur la base de deux campagnes d'analyses chimiques (Janvier et Mai 2007) effectuées sur les eaux souterraines des nappes entourant le lac Fetzara, pour 16 échantillons qui sont matérialisés sur la carte d'inventaire (*Fig.IV.1*).

Les mesures des paramètres physico-chimiques (potentiel d'hydrogène (pH) et conductivité électrique (CE)) ont été faites in-situ à l'aide du pH-mètre (HI 8424) et du conductimètre (HI-8733) portables de marque Hanna.

L'analyse des éléments chimiques majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{NO}_3^-$ ) a été faite au Laboratoire à l'aide d'un spectrophotomètre, spectrophotométrie à Flamme et le titrage volumétrique. Les protocoles et les méthodes d'analyse chimique sont faits selon *Rodier (2009)*.

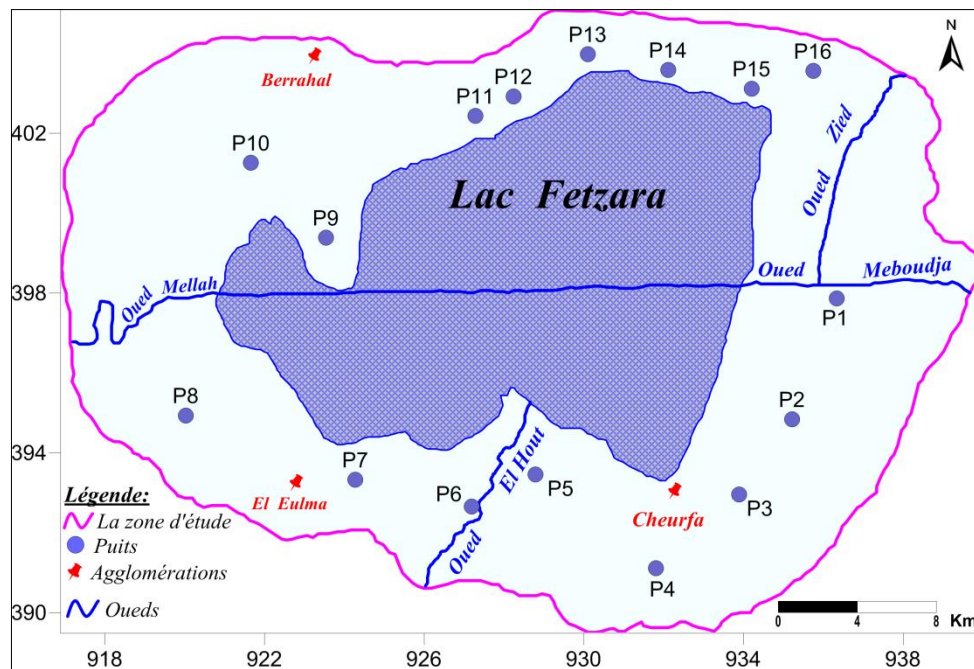


Fig.IV.1. Carte d'inventaire des points de prélèvement

#### IV.4.1. Notions des méthodes

Généralement, l'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation est basée sur plusieurs critères qui contrôlent la qualité des eaux destinées à une activité agricole. Dans le cas de notre étude, nous avons utilisé plusieurs paramètres dont : le rapport d'adsorption du sodium (SAR), l'indice de perméabilité (IP), l'indice de bicarbonate de sodium résiduel (RSBC), l'indice de Kelly (KR), le ratio d'absorption de magnésium (MAR) et le pourcentage de sodium (Na%), par la suite une représentation graphique de ces résultats a été effectué sur différents digrammes à savoir ; le diagramme de *Richards (1954)*, le diagramme de *Wilcox (1955)* et le diagramme de *Doneen (1964)*. Ces méthodes décrivent le risque potentiel de salinisation des sols et les effets négatifs des eaux d'irrigation sur les sols et les plantes.

##### IV.4.1.1. Diagramme de Richards

Ce diagramme est essentiellement utilisé pour évaluer le risque de salinisation des sols. Il utilise pour cela la conductivité électrique (CE) ou la charge totale dissoute, toutes deux relatives à la salinité de l'eau, et l'indice d'adsorption du sodium (SAR) aussi appelé (pouvoir alcalisant) qui est une mesure du risque de la sodisation du sol du fait de l'irrigation. Le diagramme est découpé en quatre classes de salinité (axe des abscisses) et quatre classes de risques de sodisation (axe des ordonnées) (*Fig.IV.2 ; Tab.IV.1 ; Tab.IV.2*). La concentration en sodium est considérée comme un facteur important pour exprimer la réaction avec le sol et la réduction de sa perméabilité. Par conséquent, le taux d'adsorption du sodium (SAR) est considéré comme une meilleure mesure du risque de sodium (alcalin) dans l'eau d'irrigation, car il est directement lié à l'adsorption de  $\text{Na}^+$

sur le sol et constitue un critère important pour estimer l'aptitude de l'eau à l'irrigation. Le SAR a été calculé à partir de l'équation proposée par *Richard (1954)* :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}} \quad (\text{Toutes les teneurs sont exprimées en méq/L})$$

Tab .IV.1. Classification des eaux d'irrigation selon le SAR et CE

Classes	SAR	CE en $\mu\text{s/cm}$	Qualité d'eau
1	< 10	< 250	Excellente
2	10 – 18	250 -750	Bien
3	18 – 26	750 -2250	Admissible
4	>26	>2250	Inappropriée

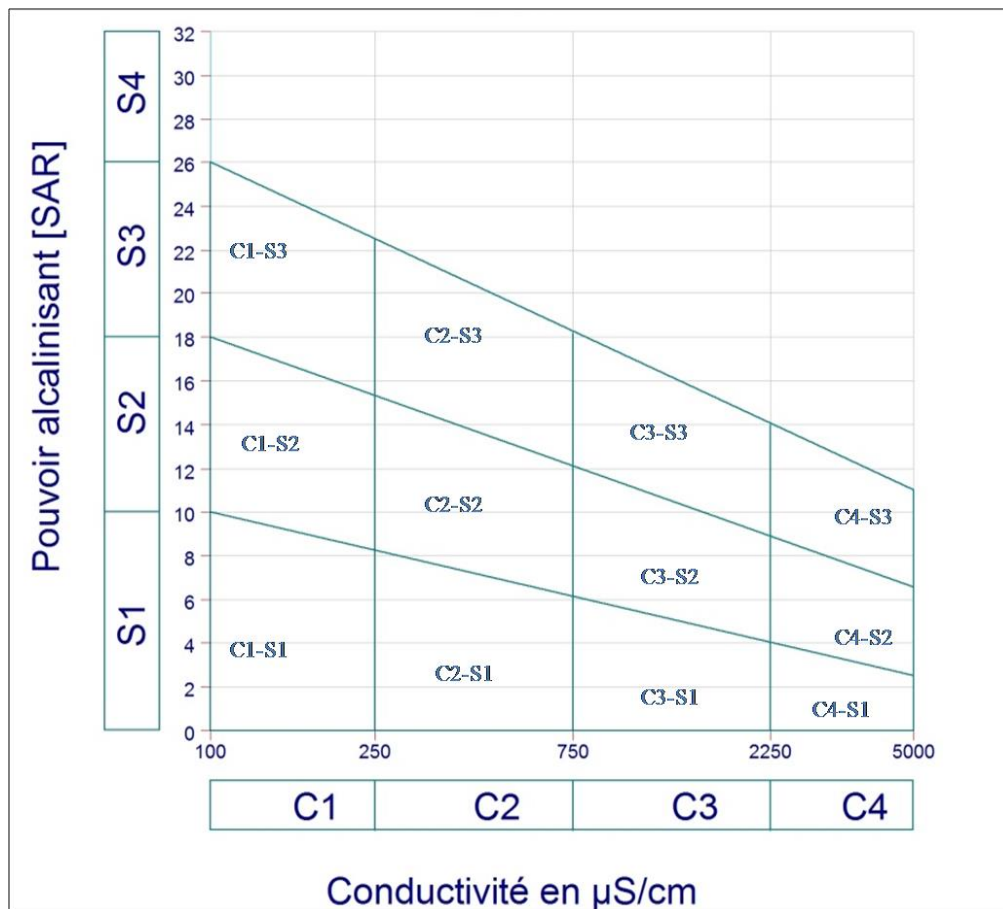


Fig.IV.2. Diagramme de Richards (1954)

La salinité pose un problème dès l'instant où l'accumulation de sel dans la zone racinaire atteint une concentration qui provoque une baisse de rendement et ralentit la croissance des végétaux, (*Perrot et al. 2009*), il faut d'abord rappeler que sur les plantes spontanées ou cultivées la salinité a deux actions bien distinctes qui peuvent très souvent se produire simultanément. L'excès de teneur en sel est l'un des soucis principaux avec l'eau utilisée pour l'irrigation. Une concentration élevée en sel dans l'eau ou dans les sols affectera négativement le rendement des récoltes, provoquera une dégradation des sols et une pollution des eaux souterraines.

Tab.IV.2. Classification des eaux d'irrigation selon le diagramme de Richards (Belhaj, 2017)

Degré	Qualité	Classe	Etat d'utilisation
1 <sup>ère</sup>	Excellente	C1-S1	Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols.
2 <sup>ème</sup>	Bonne	C2-S1 C2-S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sel, sur sols ayant une bonne perméabilité
3 <sup>ème</sup>	Admissible	C3-S1 C3-S2 C2-S3	En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.
4 <sup>ème</sup>	Médiocre	C4-S1 C4-S2 C3-S3	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.
5 <sup>ème</sup>	Mauvaise	C3-S4 C4-S3 C4-S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sols très perméables, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel

#### IV.4.1.2. Pourcentage de Sodium (Na%)

Le sodium est l'un des éléments les plus indésirables dans l'eau d'irrigation en raison de son effet sur la perméabilité du sol et l'infiltration de l'eau. Il remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les particules d'argile et provoque la dispersion des particules du sol, rendant par conséquent le sol dur et compact lorsqu'il est sec et excessivement imperméable à l'eau (Kaka et al. 2011 ; Singha, 2017 ; Singh et al. 2019). Le pourcentage de sodium est calculé selon la formule suivante (Todd, 1980) :

$$\text{Na}\% = \left[ \frac{\text{Na}^+}{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)} \right] \times 100 \quad (\text{Toutes les teneurs sont exprimées en méq/L})$$

Tab.IV.3. Classification des eaux d'irrigation selon le diagramme de Wilcox (1955)

Classe d'eau	Valeur de Na %	Qualité de l'eau
1	<20	Excellente
2	20-40	Bonne
3	40-60	Admissible
4	60-80	Médiocre
5	>80	Mauvaise

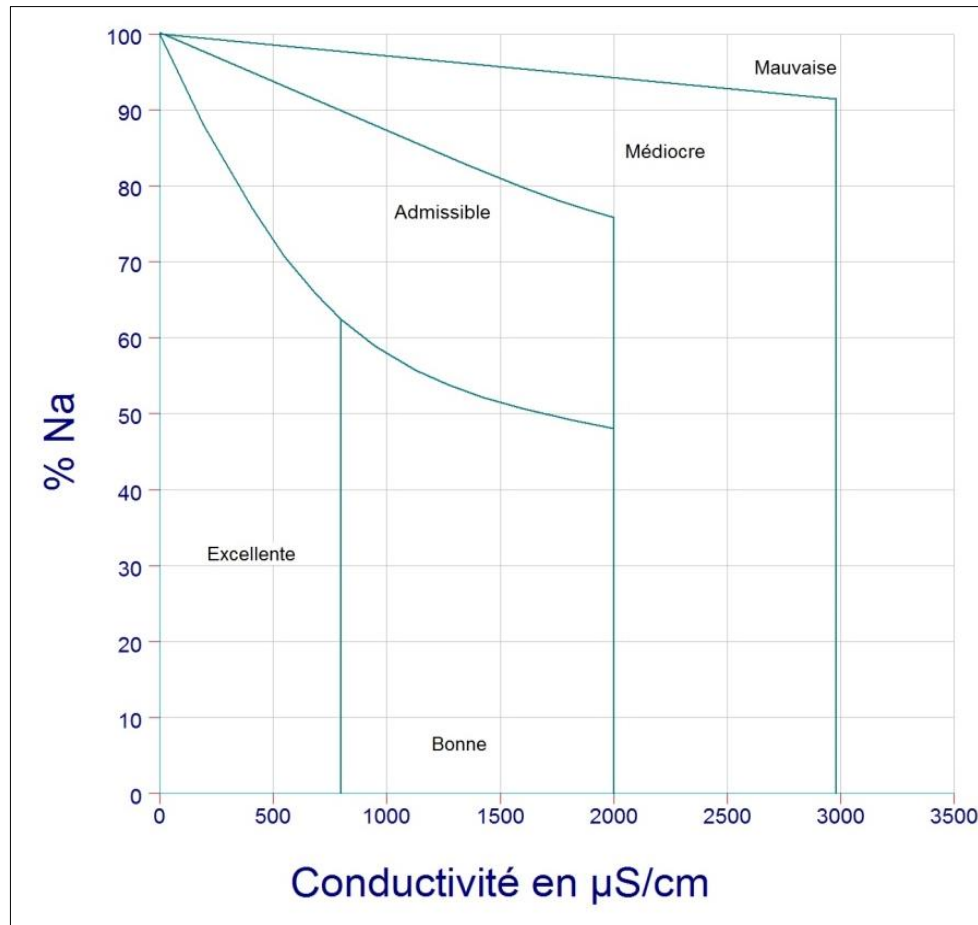


Fig.IV.3. Diagramme de Wilcox (1955)

#### IV.4.1.3. L'indice de perméabilité (IP)

La perméabilité du sol est également affectée par l'utilisation continue de l'eau d'irrigation avec l'influence de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{HCO}_3^-$  contenus dans le sol. Doneen (1964) et Ragunath (1987) ont développé un critère d'évaluation de l'aptitude de l'eau à l'irrigation basé sur un indice de perméabilité. En conséquence, la classification des eaux souterraines à l'irrigation selon l'indice de perméabilité à l'aide du diagramme de Doneen (1964) (Fig.IV.4 ; Tab.IV.4) permet de déceler trois classes ; Excellente, Bonne et Inappropriée (Kaka et al. 2011 ; Li et al. 2016 ; Singha, 2017 ; Safiur et al. 2017 ; Towfiqul Islam et al. 2017 ; Singh et al. 2019). L'indice de perméabilité est défini par l'équation de Doneen (1964) :

$$\text{IP} = \left( \frac{\text{Na}^+ + \sqrt{\text{HCO}_3^-}}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+} \right) \times 100 \quad (\text{Toutes les teneurs sont exprimées en méq/L})$$

Tab.IV.4. Classification des eaux d'irrigation selon l'indice de perméabilité

Classe d'eau	Indice de perméabilité	Qualité d'eau
Classe I	> 75 %	Excellente
Classe II	25-75%	Bonne
Classe III	<25%	Inappropriée

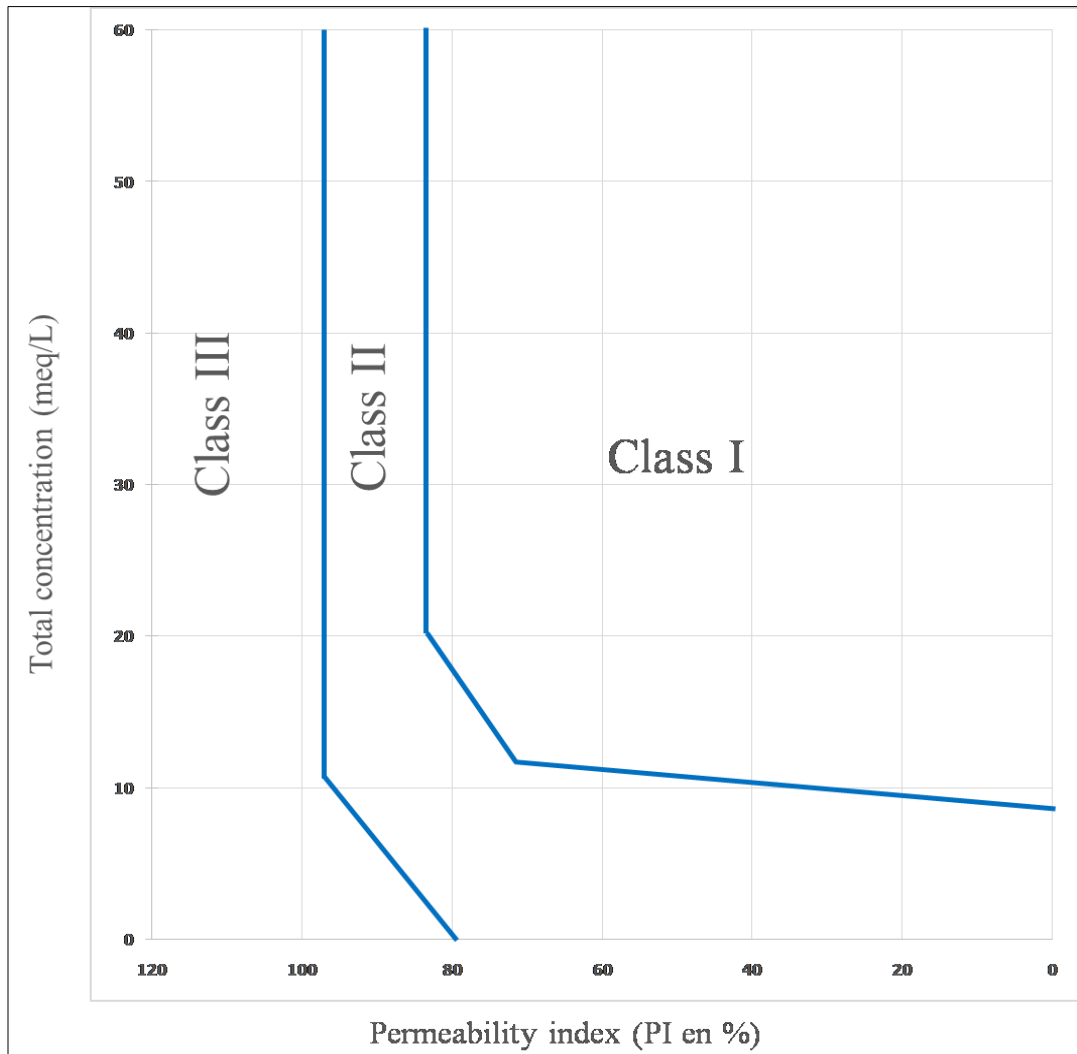


Fig.IV.4. Digramme de Doneen (1964)

#### IV.4.1.4. Indice de Kelly

L'indice de Kelley c'est le rapport entre le  $\text{Na}^+$  et la somme du  $\text{Ca}^{2+}$  et du  $\text{Mg}^{2+}$ . Un indice de Kelley supérieur à 1 indique un excès de sodium dans l'eau et donc, une eau avec un indice de Kelley inférieur à 1 est considérée comme convenable pour l'irrigation (Tab.IV.5). Le KR est défini par l'équation de Kelley (1963) (Deshpande et Aher, 2012 in Talhi, 2018) :

$$\text{KR} = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}} \text{ (Toutes les teneurs sont exprimées en méq/L)}$$

Tab.IV.5 Classification des eaux d'irrigation selon le rapport de Kelly (1963)

Class d'eau	Rapport de Kelley	Qualité de l'eau
1	<1	Approprié pour l'irrigation
2	$1 \leq \text{KR} \leq 2$	Marginal
3	>2	Inappropriée

#### IV.4.1.5. Le rapport d'absorption de magnésium (MAR)

La teneur en magnésium de l'eau est considérée comme l'un des critères qualitatifs les plus importants pour déterminer la qualité de l'eau d'irrigation. En général, le  $\text{Ca}^{2+}$  et le  $\text{Mg}^{2+}$  maintiennent un état d'équilibre dans la plupart des eaux souterraines. Pendant l'équilibre, plus de  $\text{Mg}^{2+}$  dans les eaux souterraines affectera négativement la qualité du sol en le rendant alcalin, ce qui entraînera une diminution du rendement des cultures (Dhirendra et al. 2009). Le rapport d'absorption de magnésium (MAR) est calculé par la formule suivante (in Dhirendra et al. 2009), tel qu'un risque de magnésium inférieur à 50 peut être utilisé en toute sécurité pour l'irrigation (Tab.IV.6).

$$\text{MAR} = \frac{\text{Mg}^{2+}}{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})} \times 100 \quad (\text{Toutes les teneurs sont exprimées en méq/L})$$

Tab.IV.6. Classification des eaux d'irrigation selon le risque de magnésium

Classed'eau	MAR (%)	Qualité d'eau
1	0-50	Adapté
2	50-65	Marginal
3	>65	Inapproprié

#### IV.4.1.6. Bicarbonate de sodium résiduel (RSBC)

La concentration de bicarbonate et de carbonate affecte l'aptitude de l'eau à l'irrigation. L'eau à haute RSBC à un pH élevé. Le sol irrigué avec une telle eau devient infertile et conduit au dépôt de carbonate de sodium (Eaton, 1950 in Talhi, 2018). Le RSBC est calculé par l'équation suivante (Gupta, 1987 in Rifat et al. 2021),

$$\text{RSBC} = \text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+} \quad (\text{Toutes les teneurs sont exprimées en méq/L})$$

L'eau d'irrigation peut être classée comme Satisfaisante ( $\text{RSBC} < 5$ ), marginale ( $5 < \text{RSBC} < 10$ ), et insatisfaisante ( $\text{RSBC} > 10$ ). Une valeur négative du RSBC indique une présence excessive d'ions bicarbonate par rapport au  $\text{Ca}^{2+}$  dans l'eau (Tab.IV.7).

Tab.IV.7. Classification des eaux d'irrigation selon le RSBC (Gupta, 1987)

Classes d'eau	Valeurs de RSBC	Qualité d'eau
1	<5	Satisfaisante
2	05-10	Marginale
3	> 10	Insatisfaisante

#### IV.4.2. Résultats et Discussions

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de la région du lac Fetzara des deux campagnes (janvier 2007 et Mai 2007), ainsi que les indicateurs de qualité des eaux d'irrigation (SAR, IP, KR, MAR, %Na et RSBC) en termes de valeurs maximales (max), minimales (min), d'écart type (ET) et de moyenne (Moy) sont présentés dans le tableau suivant (Tab.IV.8).

Tab.IV.8. Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la région du lac Fetzara

Campagne		Campagne (Janvier. 2007)				Campagne (Mai. 2007)			
	Unité	Min	Max	Moy	Ecart-type	Min	Max	Moy	Ecart-type
CE	µs/cm	914.00	3 420	1 496.13	803.09	424	4240.00	1402.25	1149.98
pH	/	6.12	8.13	7.55	0.57	7.96	8.79	8.50	0.29
Ca <sup>2+</sup>	mg/l	36.20	167	84.12	40.44	18.40	51.20	33.60	11.48
Mg <sup>2+</sup>	mg/l	32.40	112.60	70.60	26.50	23.04	156.48	79.80	38.49
Na <sup>+</sup>	mg/l	134.15	649.23	282.69	139.08	139	445.00	349.50	84.40
K <sup>+</sup>	mg/l	1.12	12.30	5.54	4.04	1.50	12.70	5.47	3.87
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	233.02	579.50	383.05	108.49	262.30	542.90	383.86	94.49
Cl <sup>-</sup>	mg/l	205.90	1 368	442.84	305.37	78.10	1 204.00	390.15	366.67
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/l	73.44	254.40	144.96	68.49	60	418.08	216.84	120.19
SAR	/	2.38	11.43	5.60	2.96	1.98	10.87	7.05	2.41
IP	%	44	80	64	13	62	89	77	08
KR	/	0.48	2.52	1.27	0.70	1.22	3.62	1.99	0.65
MAR	%	46.51	76.95	61.19	10.42	59.26	87.29	77.74	9.23
Na	%	32.19	70.89	51.86	13.73	54.53	77.94	64.91	6.62
RSBC	mécq/l	- 1.98	6.45	2.30	3.21	3.06	7.30	4.71	1.44

##### IV.4.2.1. Faciès chimiques

Afin de connaître le régime hydrogéochimique de la zone étudiée, les données analytiques obtenues par l'analyse hydrochimique sont reportées sur le diagramme tri-linéaire de Piper (Piper, 1944) pour en déduire les faciès hydrogéochimiques à l'aide du logiciel *Diagrammes*, version 6.73, du Roland Simler Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon. Ce type de diagramme permet de représenter plusieurs échantillons d'eau simultanément. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global. Le diagramme de Piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants.

La représentation des données physico-chimiques des eaux souterraines de la région du lac Fetzara (28 échantillons) des deux campagnes (janvier et mai 2007) (Fig.IV.5) sur le diagramme de Piper a montré l'existence de plusieurs éléments chimiques ; le sodium est l'élément le plus



important avec des concentrations variantes entre 5.83 et 28.23 méq/l. Ensuite, pour les concentrations de calcium et magnésium varient respectivement de 0.92 à 8.35 méq/l et de 1.92 à 13.04 méq/l. Concernant les anions, les concentrations en chlorures varient entre 2.20 et 38.54 méq/l et les bicarbonates, leurs concentrations varient de 3.82 à 9.50 méq/l. Ces éléments permettent de dégager des groupes à comportement commun qui reflètent des faciès chimiques, dont les plus dominants sont les suivants :

**Faciès chloruré-sodique :** pour la première campagne (janvier 2007) représente 81.25% des échantillons et 66.67% pour la deuxième campagne (mai 2007). Le  $\text{Na}^+$  et le  $\text{Cl}^-$  présentent une bonne corrélation indiquant que le  $\text{Cl}^-$  et le  $\text{Na}^+$  sont issus de la dissolution de l'halite ( $\text{NaCl}$ ) disséminée dans les sédiments à grains fins (Rouabhia et al. 2012) et d'autre part aux apports salifères du lac Fetzara par l'effet de l'évaporation.

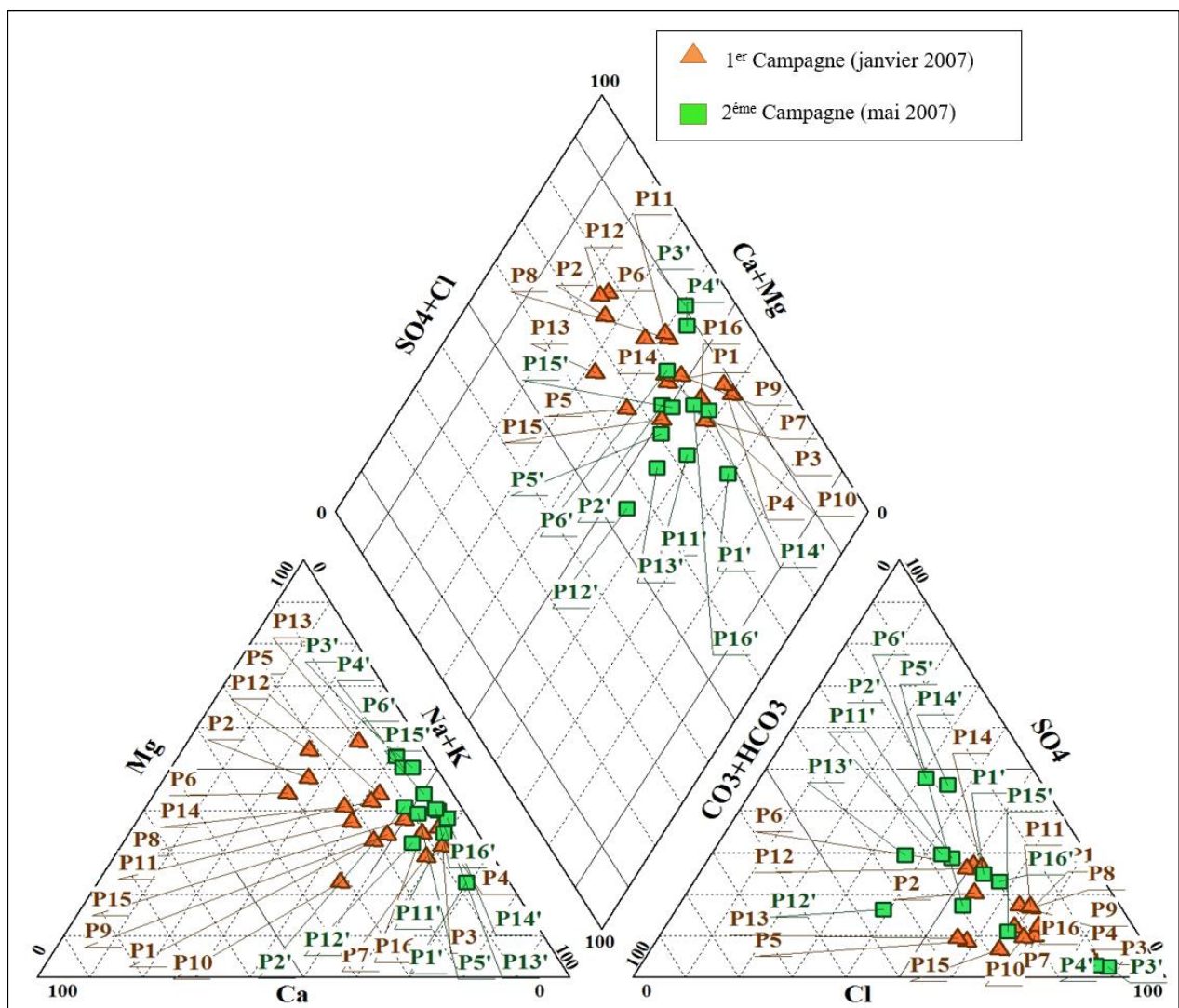


Fig.IV. 5. Faciès chimiques des eaux souterraines selon le diagramme de Piper

**Faciès chloruré-magnésien et calcique :** représente 12.5 % des eaux souterraines seulement pour la campagne janvier 2007. Les deux éléments (calcium et magnésium) indiquent la

dissolution et les précipitations secondaires des carbonates, l'échange cationique avec les minéraux argileux et la dissolution des minéraux gypseux.

**Faciès bicarbonaté-sodique:** représente 6.25 % des échantillons pour la campagne (janvier 2007) et 33.33% pour la campagne (mai 2007). La forte présence des bicarbonates est due principalement à la dissolution des cipolins par les apports souterrains sortant du socle métamorphique de l'Edough (Zahi et al. 2013).

#### IV.4.2.2. Evolution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques

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

##### a. Potentiel hydrogène (pH)

Durant la première campagne (janvier 2007) les valeurs du pH fluctuent entre 6.12 et 8.13 avec une moyenne de 7.55 (Fig.IV.6 -A), elles se sont conformes aux normes d'irrigation (6.5 à 8.5). Cependant, au cours de la deuxième campagne (mai 2007), on observe une légère augmentation du pH où les valeurs varient entre 7.96 et 8.79 avec une moyenne de 8.5 (Fig.IV.6 -B), donc les eaux deviennent légèrement alcalines.

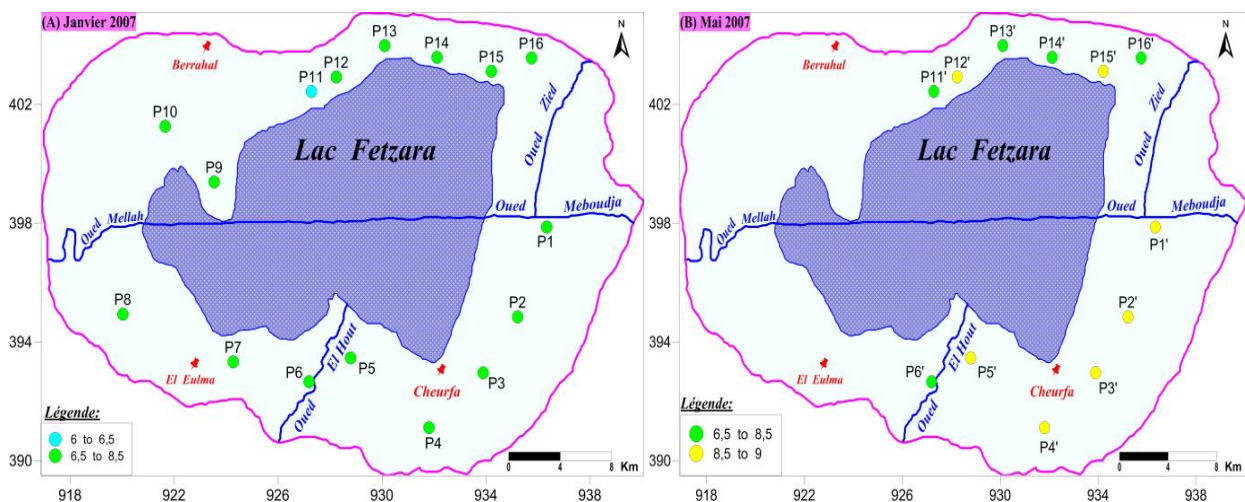


Fig.IV.6. Cartes du potentiel d'hydrogène (pH)

##### b. La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique est un excellent indicateur de la minéralisation qui reflète la concentration de l'ensemble des minéraux dissous. Généralement, les valeurs de la conductivité électrique oscillent entre 914 et 3420  $\mu\text{S}/\text{cm}$  avec moyenne de 1496.13  $\mu\text{S}/\text{cm}$  durant le mois de janvier 2007, dont 87.5% de l'échantillon ont des valeurs inférieures à la norme recommandée pour les eaux d'irrigation (3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). La valeur maximale (3420  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) enregistrée au niveau

du puits P4 (Fig.IV.7-A). Cependant, durant la deuxième campagne (mai 2007), les valeurs de conductivité électrique varient entre 424 et 4240  $\mu\text{S}/\text{cm}$  avec une moyenne de 1402.25  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Fig.IV.7-B). La répartition spatiale des valeurs est analogue à la période précédente (janvier 2007), avec une légère augmentation où la valeur maximale (4240  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) observée au Sud-Est du lac (P3'). Les faibles valeurs de la conductivité électrique ( $< 1500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) sont enregistrées presque sur l'ensemble des puits de la partie Nord du lac (Piémont de djebel Edough).

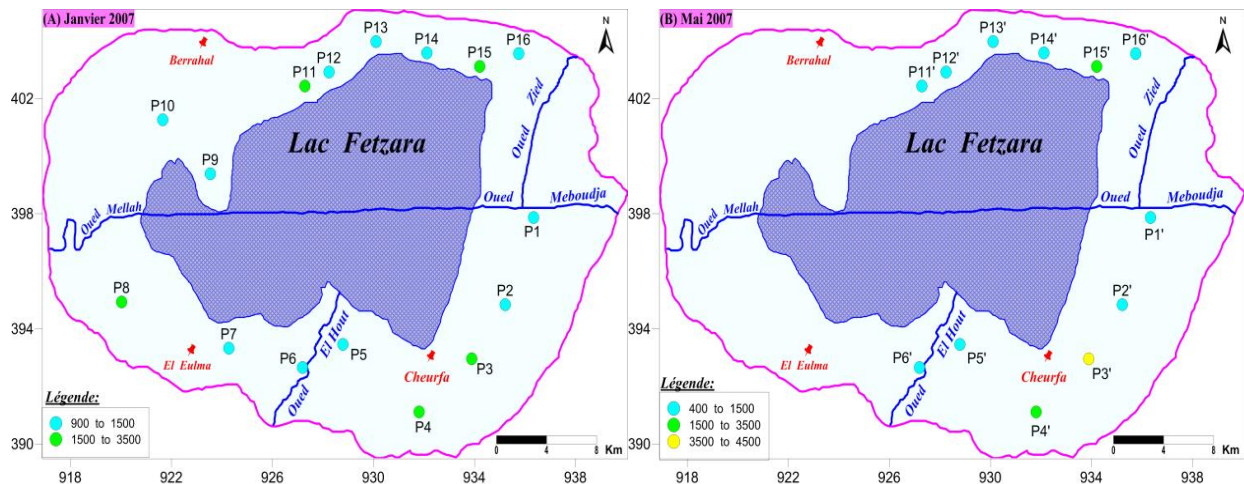


Fig.IV. 7. Cartes de la conductivité électrique (CE en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

### c. Cartes du calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ en mg/l)

La présence de cet élément dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles : soit la dissolution des formations carbonatées ( $\text{CaCO}_3$ ), soit la dissolution des formations gypseuses ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

Durant la première campagne, les concentrations en calcium varient entre 36.20 et 167.00 mg/l avec une moyenne de 84.12 mg/l. Les faibles teneurs ( $< 60 \text{ mg/l}$ ) représentent 43.75% des échantillons. Alors que, les teneurs les plus élevées ( $> 120 \text{ mg/l}$ ) sont observées dans la région Berrahal (P10), à proximité de l'oued el Hour (P6) et dans la partie Sud-Est du lac (P2). Le reste de la plaine est caractérisé par des teneurs moyennes qui varient entre 60 et 120 mg/l. Elles atteignent un maximum de 167 mg/l au puits P11 (Fig.IV.8-A). Ce qui indique que ces eaux sont influencées par la dissolution des formations carbonatées et gypseuses. Comparativement à celles de la première campagne (Janvier 2007), on remarque une baisse des concentrations en  $\text{Ca}^{2+}$ , elles oscillent entre 18.40 et 51.20 mg/l avec une moyenne de 33.60 mg/l (Fig.IV.8-B).

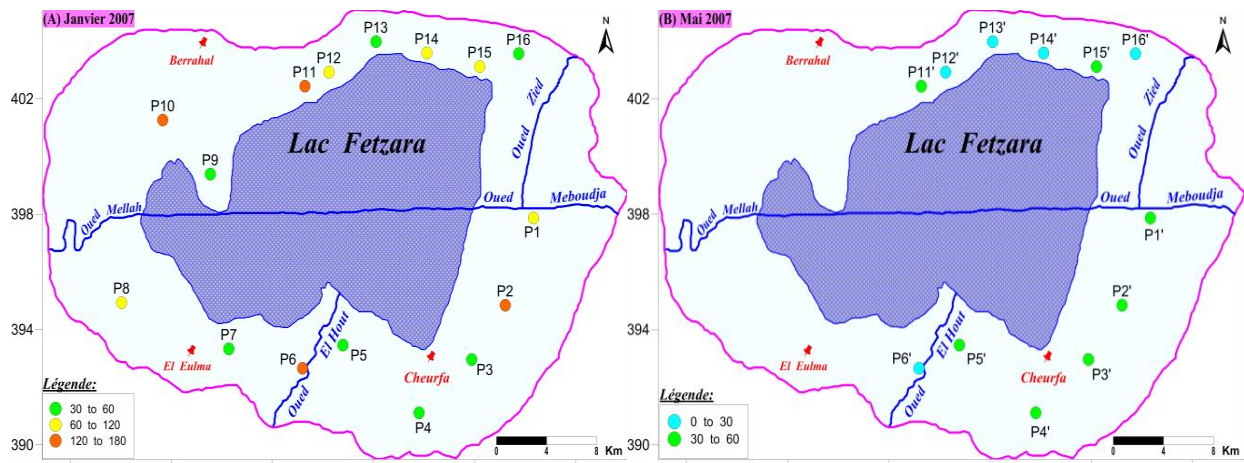
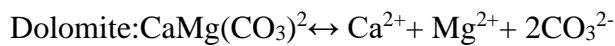
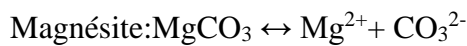


Fig.IV. 8. Cartes du calcium ( $Ca^{2+}$  en mg/l)

**d. Cartes du magnésium ( $Mg^{2+}$  en mg/l)**

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



Durant le mois janvier, les teneurs en magnésium varient entre 32.40 et 112.60 mg/l avec une moyenne de 70.60 mg/l, dont les plus élevées (> 50 mg/l) représente 68.75% des puits, où la valeur maximale enregistrée dans la commune de Cheurfa (P4), le reste des échantillons ont des faibles teneurs (<50 mg/l) (Fig.IV.9-A). Cependant, durant la deuxième campagne (mai 2007), nous remarquons une augmentation importante des teneurs en magnésium (>120 mg/l) par rapport la première campagne (janvier 2007) notamment aux puits P3 et P4. Elles sont relativement faibles (<50 mg/l) dans les puits P1 et P12 (Fig.IV.9-B).

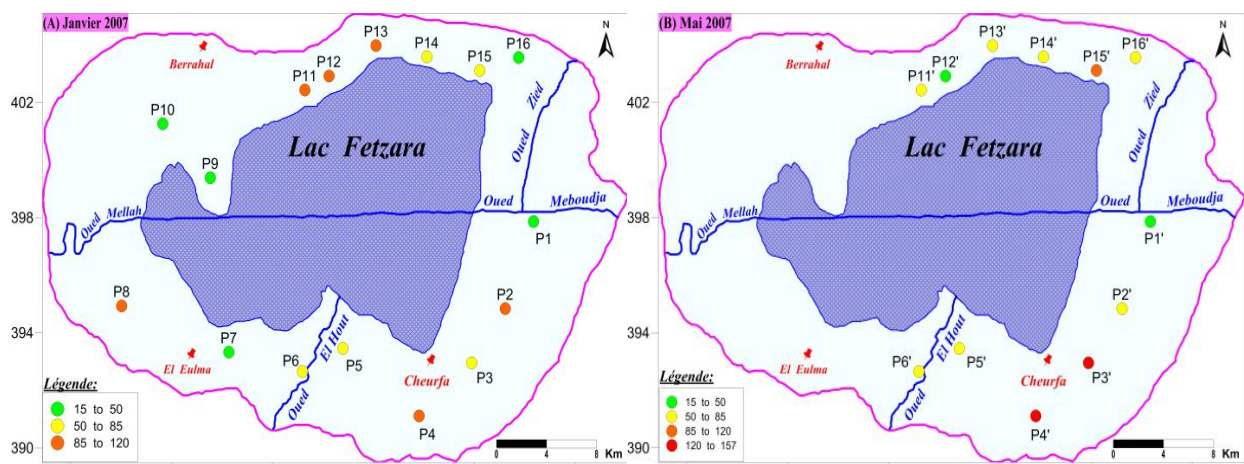
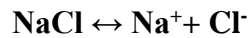


Fig.IV.9. Cartes du magnésium ( $Mg^{2+}$  en mg/l)

### e. Cartes du sodium ( $\text{Na}^+$ en mg/l)

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



Les teneurs en sodium varient entre 134.15 et 649.23 mg/l durant la première campagne (janvier 2007), où les fortes teneurs ( $> 200$  mg/l) enregistrées dans la partie ouest du lac (P7, P8, P10) et à l'Est du lac (P16, P1 et P2). Le maximum est enregistré au niveau de la partie sud-est (Cheurfa) au niveau des puits P3 et P4 respectivement avec 512.9 mg/l et 649.23 mg/l, le reste (la partie Nord-Ouest et Sud-Ouest du lac) présente des faibles concentrations inférieures à 200 mg/l (Fig.IV.10-A). Au cours de la deuxième campagne (mai 2007), nous remarquons que les teneurs du sodium varient entre 139 et 445 mg/l avec une moyenne de 349.50 mg/l (Fig.IV.10-B). Toutes les teneurs dépassent 200 mg/l, sauf le puits P12 avec 139 mg/l. Ces fortes teneurs en sodium indiquant l'existence de forts apports salifères à partir des formations évaporitiques.

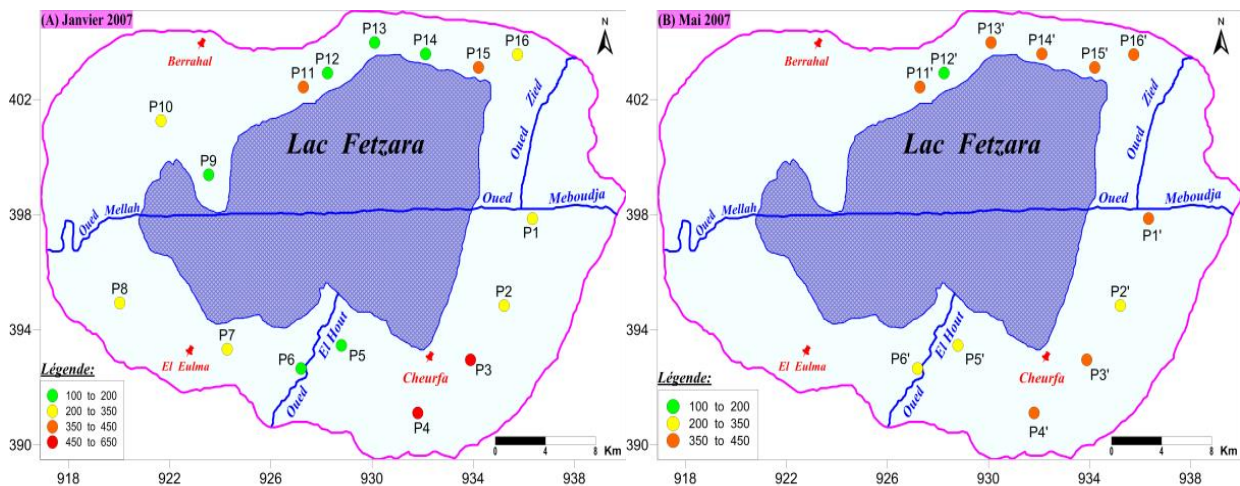


Fig.IV.10. Cartes du sodium ( $\text{Na}^+$  en mg/l)

### f. Cartes du potassium ( $\text{K}^+$ en mg/l)

Le potassium ( $\text{K}^+$ ) peu fréquent dans les eaux, ses sources principales sont les roches cristallines, mais dans des minéraux moins altérables que ceux qui contiennent du sodium, les évaporites (sylvinite), les argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques.

Les teneurs en potassium varient entre 1.12 et 12.30 mg/l avec une moyenne de 5.54 mg/l au mois de janvier (2007) (Fig.IV.11-A), et entre 1.50 et 12.70 mg/l avec une moyenne de 5.47 mg/l au mois de mai (2007). Une légère augmentation des teneurs est notée durant la deuxième campagne notamment au puits P2 atteignant 12.7 mg/l (Fig.IV.11-B).

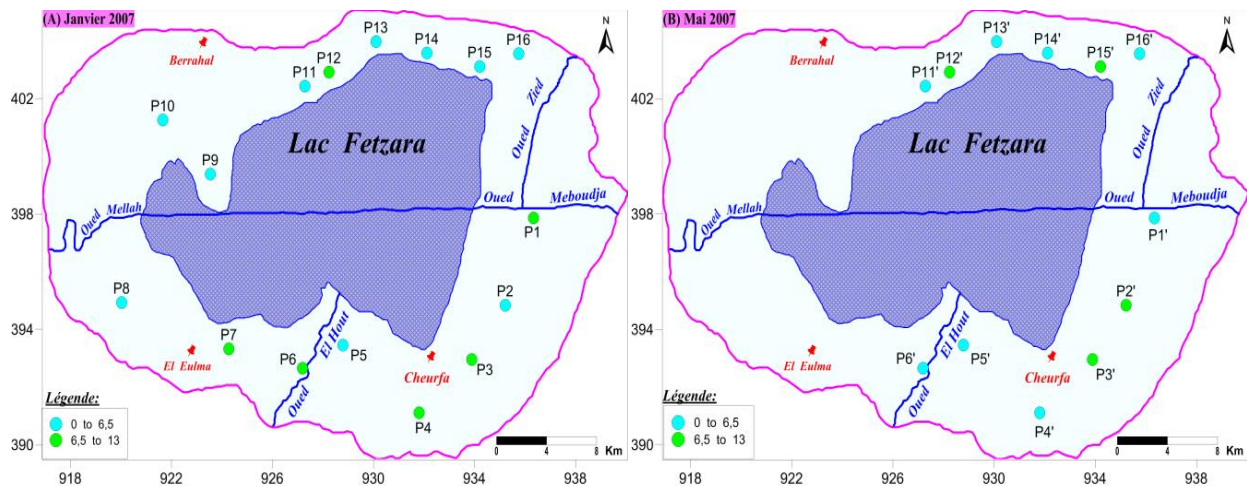


Fig.IV.11. Cartes du potassium ( $K^+$  en mg/l)

### g. Cartes des chlorures ( $Cl^-$ en mg/l)

Les chlorures peuvent avoir plusieurs origines : l'intrusion des eaux marines, ou la contamination par des eaux usées, soit la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères, soit à partir des argiles sableuses gypsifères, des dépôts d'évaporites et des marnes gypsifères.

Durant le mois de janvier, les teneurs en  $Cl^-$  varient entre 205.90 et 1368 mg/l avec une moyenne de 442.84mg/l. La carte des ions chlorurés (Fig.IV.12-A) montre que les fortes concentrations (>600 mg/l) sont observées dans la région de Cheurfa (P3 et P4). Le reste des échantillons a dépassé largement les normes (200 mg/l). Alors que, les teneurs en  $Cl^-$  dans la deuxième campagne de (mai 2007) varient entre 78.10 et 1204mg/l avec une moyenne de 390.15 mg/l. Les faibles concentrations (< 200 mg/l) sont enregistrées dans la partie nord du lac Fetzara (P12, P13, P14) et dans la partie sud à proximité d'oued El Hout (P6) (Fig.IV.12-B). Cette importante variation des teneurs liée aux caractéristiques spéciales de cet élément qui ne rentre pas dans les phénomènes de précipitation chimique, ne s'adsorbe pas par les formations géologiques et qui reste très mobile (Debièche, 2002 ; Zahi, 2013).

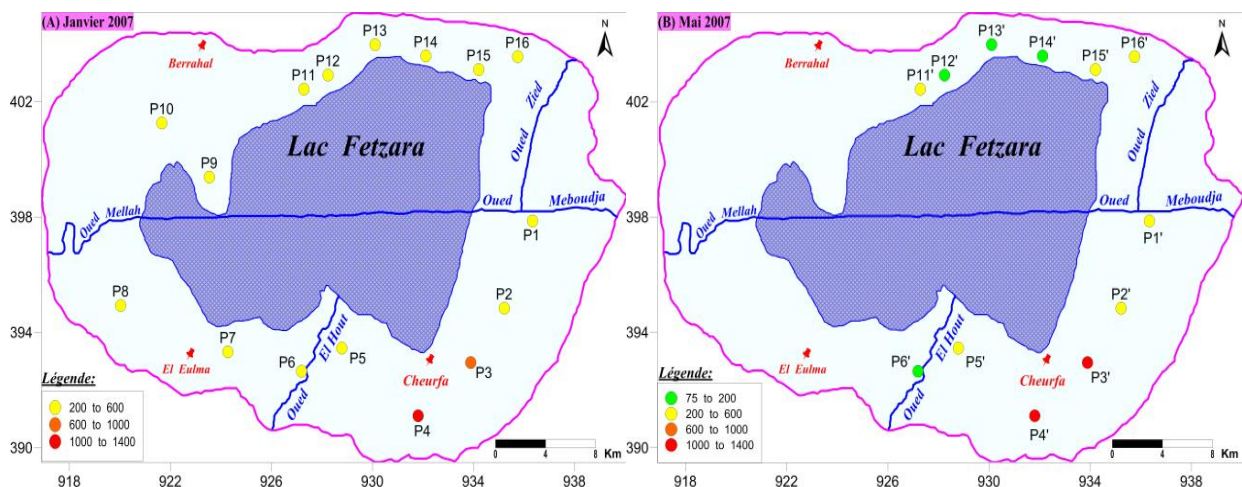


Fig.IV.12. Cartes des chlorures ( $Cl^-$  en mg/l)

### h. Cartes des sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ en mg/l)

Les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) peuvent être trouvés dans presque toutes les eaux naturelles. L'origine de la plupart des composés sulfatés est l'oxydation des minerais de sulfites, elles sont liées à l'eau de pluie (évaporation d'eau de mer) et à la mise en solution de roches sédimentaires évaporitiques, notamment les formations gypseuses, selon la relation :  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$ .

Durant la première campagne (janvier 2007) les teneurs en sulfates oscillent entre 73.44 et 254.40mg/l avec une moyenne de 144.96mg/l, dont les fortes teneurs ( $> 200$  mg/l) enregistrées au niveau des puits P6, P8, P11, P12 et P2 (Fig.IV.13-A), elles sont inférieures à 200 mg/l dans le reste des points d'eau. Cependant durant la deuxième campagne (mai 2007), les teneurs en sulfates varient entre 60 et 418.08 mg/l avec une moyenne de 216.84mg/l (Fig.IV.13-B). Les fortes concentrations ( $>250$  mg/l) observées à proximité d'oued El Hout (P6) et au sud du lac (P11), avec un pic de 418.08 mg/l enregistré dans la région d'oued Zied (P14), probablement dû aux formations géologiques qui fourniront cet élément d'argile et de gypse.

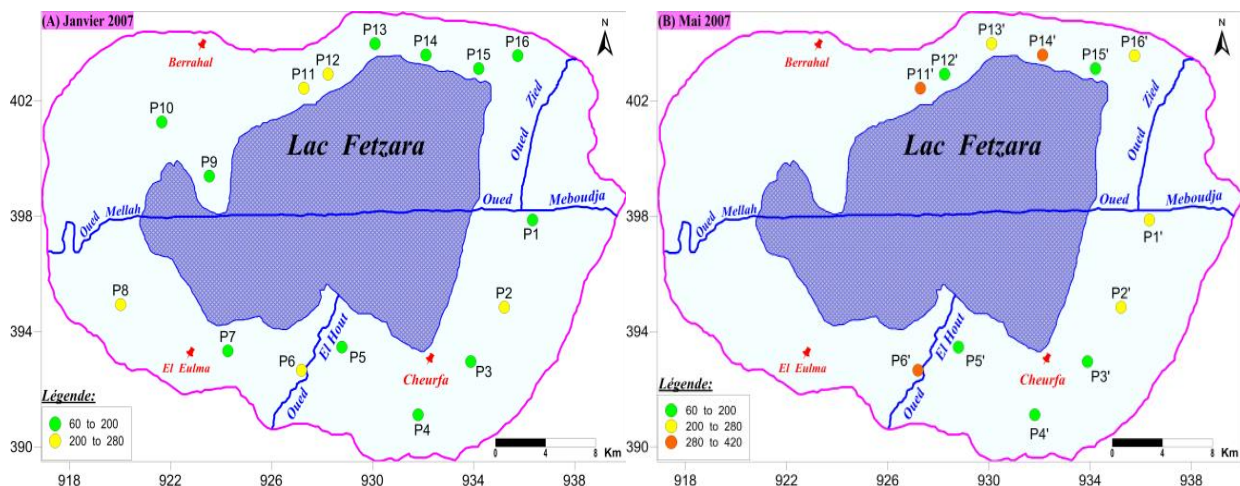


Fig.IV.13. Cartes des sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$  en mg/l)

### i. Cartes des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ en mg/l)

Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique, leur origine principale est la dissolution des roches carbonatés et gypsifères selon l'équation suivante :  $(\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}) \text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = 2\text{HCO}_3^- + (\text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+})$ .

Durant la première campagne (janvier 2007), les teneurs en bicarbonates varient entre 233.02 et 579.50mg/l avec une moyenne de 383.05mg/l (Fig.IV.14-A). Elles sont supérieures à 200 mg/l dans tous les puits avec des pics enregistrés au niveau des puits P15, P4 et P13, indiquant que la présence de lessivage des roches calcaires d'une part et des formations salifères d'autre part.

En ce qui concerne la deuxième campagne, les concentrations en bicarbonates varient entre 262.30 et 542.90 mg/l avec une moyenne de 383.86 mg/l, tous les teneurs dépassent la valeur de 200 mg/l avec un pic de 542.90 mg/l enregistré au niveau de P15 et l'autre de 516.06 mg/l aux

puits P13 (Fig.IV.14-B). Ces fortes teneurs observées sur les bordures de la région d'étude, montrant ainsi l'effet des apports qui se font par les formations extérieures.

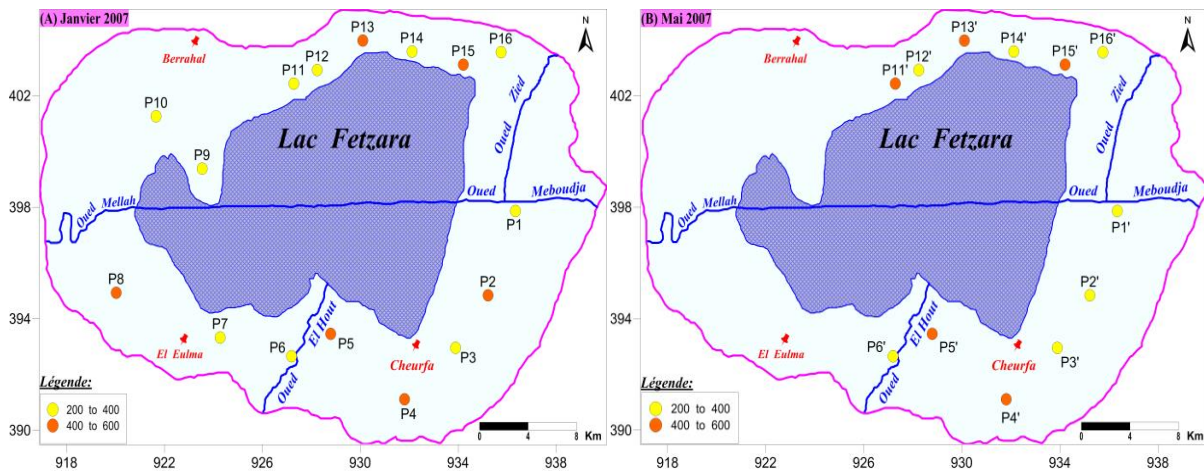


Fig.IV.14. Cartes des bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$  en mg/l)

#### IV.4.2.3. Risque de salinité

La salinité peut entraîner des effets nocifs conséquents en raison de la fixation de certains sels par les colloïdes du sol tel que le sodium qui exerce alors une action néfaste sur la végétation de façon indirecte et en dégradant les propriétés physiques des sols qui deviennent compacts et asphyxiants pour les plantes (Todd K, 1980 ; Zahi et al. 2013). Le risque est déterminé à partir d'une combinaison entre la valeur du sodium adsorbé (Sodium Absorption Ratio : SAR) et la conductivité électrique (CE) sur le diagramme de Richards (Fig.IV.15) pour apprécier la qualité d'une eau. Ce dernier montre trois classes d'eaux souterraines pour le lac Fetzara : Bonne, Admissible et Médiocre. Chacune de ces catégories à ses propres caractéristiques :

- **Bonne (C2-S1)** : eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sel, sur sols ayant une bonne perméabilité. Cette catégorie est présente uniquement pour la deuxième campagne (mai 2007) au niveau trois puits P1, P6 et P12.
- **Admissible (C3-S1)** : eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Cette classe représente la majorité des puits avec 87.5% des échantillons durant la première campagne et 68.75% durant la seconde (mai 2007).
- **Médiocre (C4-S1)** : eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés. Ces eaux de qualité médiocre occupent la partie Sud-est du lac près de Cheurfa (P3 et P4) pour les deux campagnes.



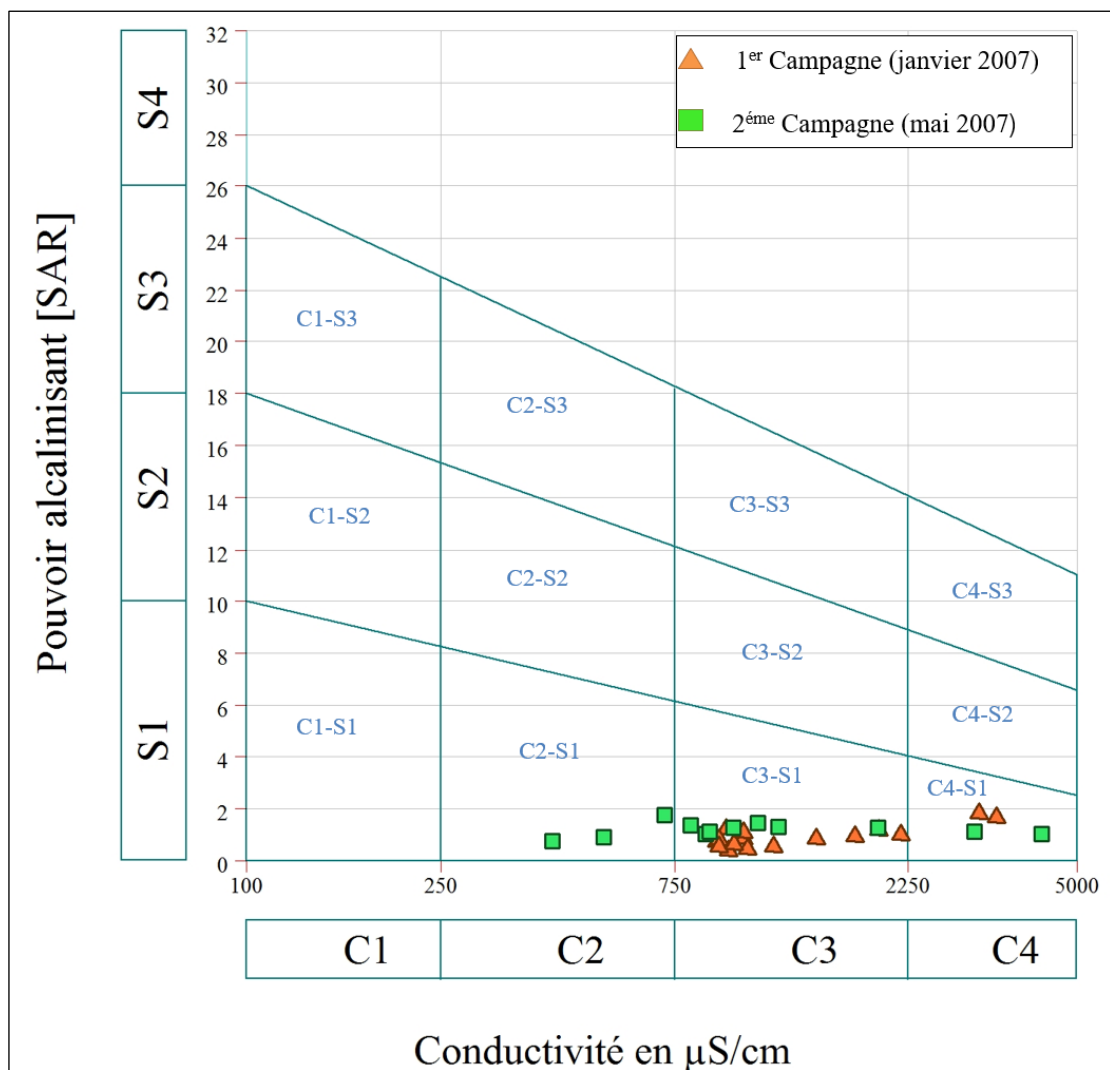


Fig.IV.15. Aptitude des eaux à l'irrigation de la région du lac Fetzara selon le diagramme de Richard

#### IV.4.2.4. Pourcentage de Sodium (Na%)

Le diagramme de Wilcox (1948), pourcentage de sodium en fonction de la conductivité électrique (Fig.IV.16), montre que les eaux souterraines de la région du lac Fetzara appartiennent aux cinq classes d'eau : excellent, bonne, admissible, médiocre et mauvaise.

- **Excellente** : Cette classe d'eau observée durant la deuxième campagne (mai 2007) au niveau P6 et P12.
- **Bonne** : Cette classe représente la majorité des puits 75% des échantillons durant la première campagne (janvier 2007) et 25% des échantillons durant la deuxième campagne (mai 2007).
- **Admissible** : Cette classe apparaît durant la première campagne (janvier 2007) au niveau de P15, et quatre puits (P1, P11, P15 et P16) durant la deuxième campagne (mai 2007).
- **Médiocre** : Cette classe est observée seulement au niveau de P11 durant la première campagne.
- **Mauvaise** : Cette catégorie est présente au niveau de la partie Sud-est du lac (Cheurfa) (P3et P4) pour les deux campagnes.

En général, il y a une légère détérioration de la qualité de l'eau pendant la deuxième campagne, cela reflète l'augmentation de la salinité due à l'existence de forts apports salifères à partir des formations évaporitiques.

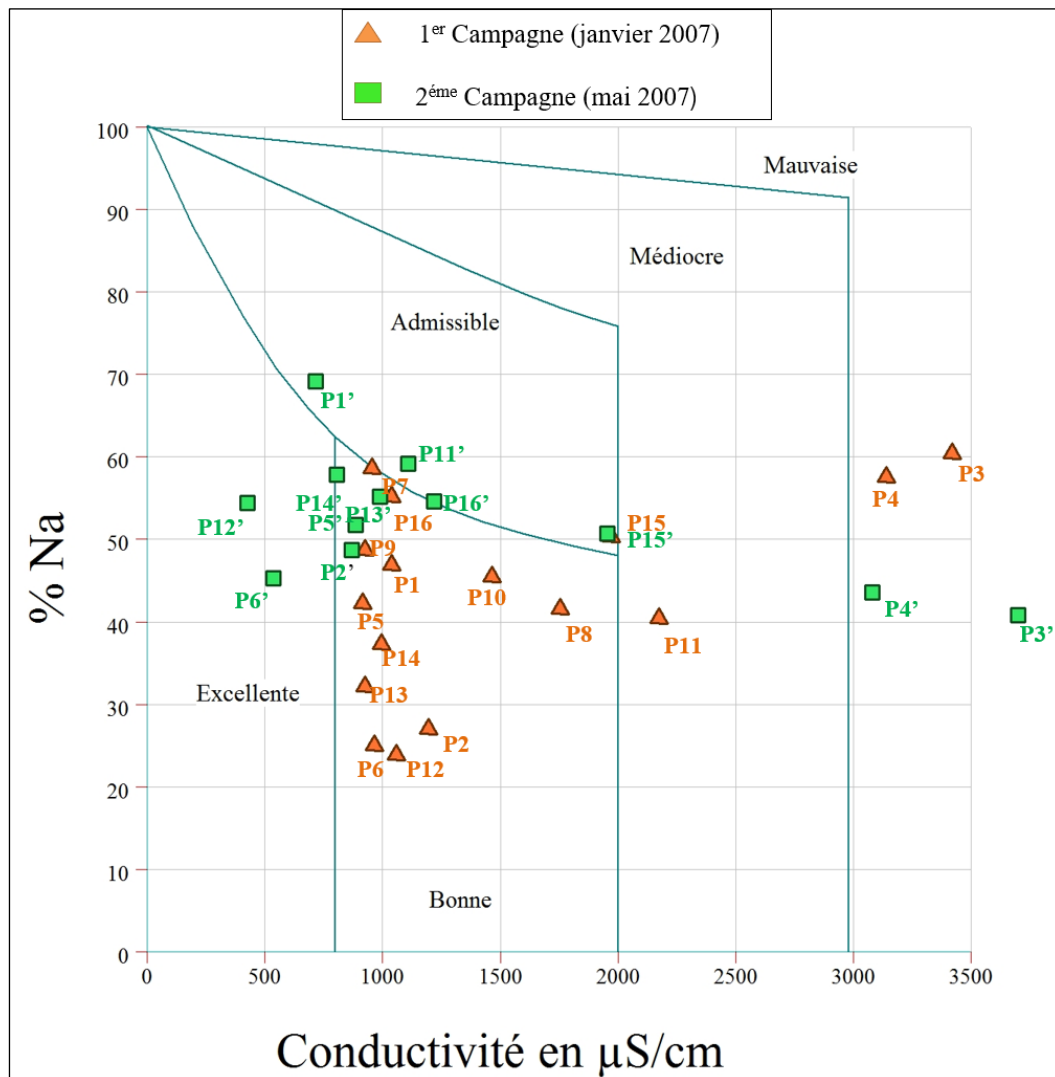


Fig.IV.16. Aptitude des eaux à l'irrigation de la région du lac Fetzara selon le diagramme de Wilcox

#### IV.4.2.5. Indice de Kelly

Le rapport de Kelly ( $KR > 1$ ) indique un excès de sodium dans l'eau. Par conséquent, l'eau avec un rapport de Kelly ( $KR < 1$ ) convient à l'irrigation, tandis que celles avec un ratio supérieur à un ne conviennent pas (tab.5). Dans notre cas d'étude, l'indice de Kelly varie de 0.48 % à 2.52% avec une valeur moyenne de 1.27 % durant la première campagne (janvier 2007) et il varie entre 1.22% et 3.62% avec une valeur moyenne de 1.99 % durant la deuxième (Tab.IV.8), indiquant 68.75 % des échantillons d'eau sont impropres à l'irrigation avec un  $KR > 1$ .

#### IV.4.2.6. Indice de perméabilité

L'indice de perméabilité (IP) des eaux souterraines de la région du lac Fetzara varie entre 44% et 89% pour les deux campagnes (Tab.IV.8). La représentation graphique de ces résultats sur le diagramme de Doneen (Fig.IV.17), montre que les eaux souterraines de la zone d'étude appartiennent aux classes (I et II), elles sont appropriées pour l'irrigation (eau excellente à bonne pour l'irrigation) sans aucun effet sur les propriétés du sol.

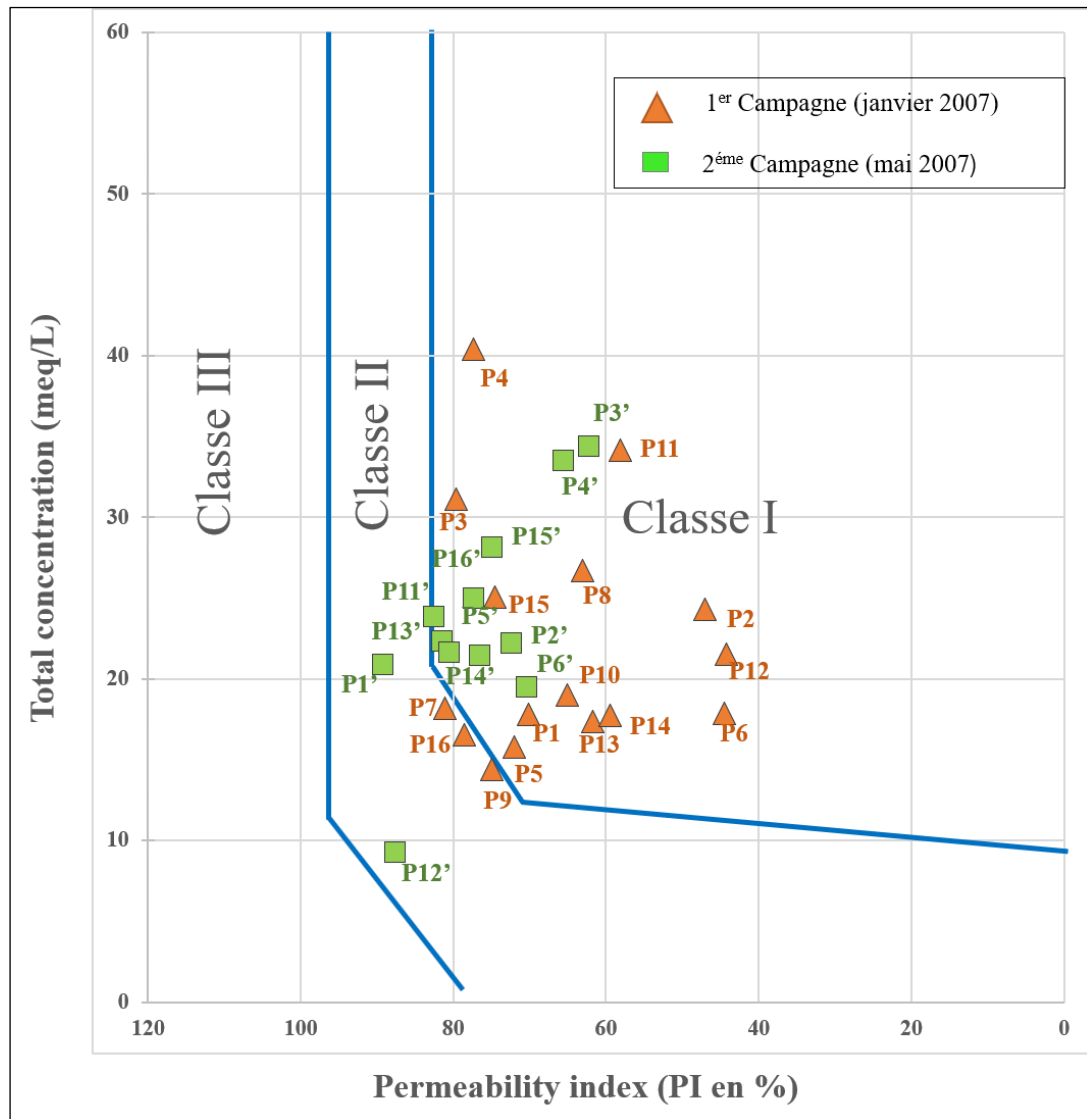


Fig.IV.17. Aptitude des eaux à l'irrigation de la région du lac Fetzara selon le diagramme de Doneen

#### IV.4.2.7. Risque de magnésium

Le rapport d'absorption de magnésium (MAR) dans les eaux souterraines de notre région d'étude oscille, généralement, entre 30.34% et 76.95% avec une valeur moyenne de 58.72 % durant la campagne (janvier 2007) et il varie entre 59.26 % et 87.29 % avec moyenne de 77.74 % durant la deuxième campagne (Tab.IV.8). Presque tous les échantillons d'eau ont un rapport d'absorption de magnésium supérieure à 50 %, ce qui affecte négativement le rendement des

cultures en rendant les sols plus alcalins (*Paliwal, 1972 ; Nagaraju, 2014*), indiquant que les eaux souterraines de la région du lac Fetzara ne pouvant pas être utilisées pour l'irrigation.

#### IV.4.2.8. Bicarbonate de sodium résiduel (RSBC)

Les eaux souterraines de la région du lac Fetzara présentent des valeurs RSBC oscillant entre - 1.98még/l et 6.45még/l avec une valeur moyenne de 2.07még/l durant la première campagne et varient de 3.06 még/l à 7.30még/l avec une valeur moyenne de 3.06még/l pour la deuxième (mai 2007) (*Tab.IV.8*). Dans l'ensemble, 25 % des échantillons ont un RSBC inférieur à 5 még/l (une qualité satisfaisante) et le reste (75 %) varie entre 5 et 10 még/l (une qualité marginale) (*Tab.IV.7*). Enfin, toutes les valeurs indiquent que les eaux souterraines de la zone d'étude sont appropriées pour l'irrigation.

#### IV.5. Conclusion

Dans cette partie, nous avons évalué l'aptitude des eaux à l'irrigation sur la base de plusieurs critères à savoir : le rapport d'adsorption du sodium, l'indice de perméabilité, l'indice de bicarbonate de sodium résiduel, l'indice de Kelly, le ratio d'absorption de magnésium et le pourcentage de sodium. Ces méthodes décrivent le risque potentiel de salinisation des sols et les effets négatifs des eaux d'irrigation sur les sols et les plantes.

Le diagramme de Richard, montre que la majorité des échantillons d'eau appartiennent à la catégorie C3S1, indiquant une eau à haute salinité et faiblement alcaline, qui ne peut pas être utilisée sur des sols à drainage restreint et nécessite une gestion spéciale pour le contrôle de la salinité. Le diagramme de Wilcox suggère que la plupart des eaux sont bonnes à admissibles, et que certains puits de la région de Cheurfa (P3, P4) sont de mauvaise qualité. Sur la base du SAR, Na%, RSBC et IP, les eaux souterraines sont appropriées à des fins d'irrigation. Alors que, sur la base de MAR (87.5 %) et KR (68.75 %) les eaux se sont avérées impropres à l'irrigation.

D'une manière générale, la richesse des eaux souterraines de notre région en éléments ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) est liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées en sels et par dissolution des formations évaporitiques. Alors que, les éléments  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  sont liés à la dissolution des cipolins de l'Edough et des formations carbonatées environnantes. Les eaux sont caractérisées par la dominance de trois faciès chimiques : chloruré-sodique, chloruré-magnésien et calcique et bicarbonaté-sodique. La variation des teneurs d'une campagne à l'autre, due à une dilution des eaux sous l'effet des apports des fortes précipitations durant la période d'étude. Ces eaux sont en général acceptables pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés, mais nécessitent un contrôle préalable de l'évolution de la salinité.

# *Conclusion Générale*

## **Conclusion Générale**

La présente étude menée sur lac Fetzara qui se situe à l'extrême Nord-est Algérien, à 18 km au Sud-ouest de la ville d'Annaba, il s'allonge sur 17 km d'Est en Ouest et sur 13 km du Nord au Sud dans sa plus grande largeur, avec une superficie d'environ 18600 ha. Cette étude a été effectuée afin d'évaluer l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation dans cette région, et leur évolution spatio-temporelle en fonction de la variation des paramètres physico-chimique de l'eau.

L'étude géomorphologique de la région du lac Fetzara nous a montré l'origine et la contribution de chaque forme au fonctionnement du lac, Il existe deux formes bien distinguées ; il s'agit des reliefs montagneux qui correspondent à la retombée des djebels Edough et Belleleita au Nord et aux chaînes telliennes au Sud, et de la plaine d'Annaba. Alors que, l'étude climatologique montre que la région est caractérisée par un climat méditerranéen avec deux périodes bien distinctes : l'une froide et humide s'étend de la fin de septembre jusqu'au mois de mai, et l'autre chaude et sèche occupe le reste des mois. La région d'étude reçoit des précipitations annuelles moyennes de l'ordre de :630.96 mm et une température moyenne annuelle de l'ordre de 17.77 °C. La reconstitution du stock commence au mois de novembre et s'achève en avril. Son épuisement s'observe en mai, ce qui provoque un déficit agricole (DA) nécessitant une irrigation surtout pour la période allant de juin jusqu'à octobre.

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

La région d'étude fait partie de l'ensemble géologique du Tell Algérien Nord oriental, elle comporte à la fois les affleurements de terrains métamorphiques, des roches éruptives et des terrains sédimentaires. Les formations des bordures sont constituées de gneiss, de schistes, de micaschistes, de cipolins, de marnes, de marno-calcaires métamorphiques et de formations grésos-argileuses. Elles sont relativement de faible potentialité hydraulique mais constituent des zones d'alimentations pour les nappes.

Du point de vue hydrogéologique, les formations sédimentaires correspondent à un ensemble non uniforme où on trouve un espace marécageux, des dunes sableuses et des plaines fertiles. Ces deux dernières sont considérées comme des formations potentiellement aquifères, elles sont caractérisées par des sédiments quaternaires. La nappe superficielle entourant le lac Fetzara est contenue dans des alluvions récentes et actuelles, elle présente une texture argilo-sableuse et argilo-limoneuse.

L'évaluation de l'aptitude des eaux à l'irrigation est basée sur plusieurs critères à savoir : le rapport d'adsorption du sodium, l'indice de perméabilité, l'indice de bicarbonate de sodium résiduel, l'indice de Kelly, le ratio d'absorption de magnésium et le pourcentage de sodium. Ces méthodes décrivent le risque potentiel de salinisation des sols et les effets négatifs des eaux d'irrigation sur les sols et les plantes.

Le diagramme de Richard, montre que les eaux appartiennent à la catégorie C3S1, indiquant une eau à haute salinité et faiblement alcaline, qui ne peut pas être utilisée sur des sols à drainage restreint et nécessite une gestion spéciale pour le contrôle de la salinité. Alors que, le diagramme de Wilcox suggère que la plupart des eaux sont bonnes à admissibles, et que certains puits de la région de Cheurfa (P3, P4) sont de mauvaise qualité. Sur la base du SAR, Na%, RSBC et IP, les eaux souterraines sont appropriées à des fins d'irrigation. Enfin, le ratio d'absorption de magnésium (MAR) et l'indice de Kelly (KR) montre que les eaux sont impropres à l'irrigation.

D'une manière générale, la richesse des eaux souterraines de notre région en éléments ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) est liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées en sels et par dissolution des formations évaporitiques. Alors que, les éléments  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{HCO}_3^-$  sont liés à la dissolution des cipolins de l'Edough et des formations carbonatées environnantes. Les eaux sont caractérisées par la dominance de trois faciès chimiques : chloruré-sodique, chloruré-magnésien et calcique et bicarbonaté-sodique. La variation des teneurs d'une campagne à l'autre, due à une dilution des eaux sous l'effet des apports des fortes précipitations durant la période d'étude. Ces eaux sont en général acceptables pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés, mais nécessitent un contrôle préalable de l'évolution de la salinité.

Afin de protéger le lac et de minimiser la dégradation des eaux souterraines destinées à l'irrigation de la région d'étude, nous proposons les recommandations suivantes :

- ✓ Le contrôle de la qualité des eaux d'irrigation et l'amélioration du réseau de drainage aux alentours du lac, pour protéger les sols contre le phénomène de la salinisation.
- ✓ Approfondir les études hydro géophysiques afin d'expliquer le phénomène de la salinisation ponctuelle des eaux souterraines (exemple : puits 3 et 4).
- ✓ Mettre en veille un réseau de surveillance pour la qualité des eaux de souterraines.
- ✓ Le contrôle qualitatif et quantitatif des apports d'eau vers le lac.
- ✓ Eviter le pompage intensif au niveau des ouvrages situés aux alentours du lac, car cela produirait un abaissement du niveau piézométrique dans l'ouvrage et un écoulement des eaux du lac vers la nappe, ce qui amènerait une modification de la qualité de la nappe.

*Références  
Bibliographiques*



## Références Bibliographiques

- Ahmed-Said Y & Leake B.E., 1993.** The Cap de Garde pelites and gneisses, Edough, Annaba, NE Algeria: their petrology, geochemistry and origin. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie* 4 :3-24.
- Aissa D.E., Cheilletz A., Gasquet D & Marignac C., 1995.** Alpine metamorphic core complexes and metallogenesis: The Edough case (NE Algeria). In: Pasava, J., Kribek, B., Zak, K. (Eds.). Mineral deposits: from their origin to their environmental impacts. *Balkema, Rotterdam* : 23–26.
- AJCI., 1985.** Etude de la faisabilité du projet d'aménagement agricole de la région périphérique du lac Fetzara. *Agence Japonaise de Coopération Internationale(AJCI), Vol. 3, 56 p.*
- Auzende J.M., Bonnin J & Olivet J.L., 1975.** La marge nord africaine considérée comme marge active. *Bulletin de la Société Géologique de France* 7 : 486-495.
- Azougghagh M., 2001.** Matériel d'irrigation choix, utilisation et entretien, *transfert de technologie en agriculture, n°81.*
- Belhaj M.Z., 2017.** Qualité des eaux de surface et leur impact sur l'environnement dans la wilaya de Skikda. *Thèse de doctorat en sciences, Univ. de Biskra, 148p.*
- Belhamra A., 2001.** Contrôle de la salinité des eaux du lac Fetzara jusqu'à la mer. *Mémoire de Magister, Univ. de Annaba, 110 p.*
- Bolfa J., 1948.** Contribution à l'étude des gîtes métallifères de la Kabylie de Collo et de la région de Bône. *Bulletin du Service de la Carte Géologique de l'Algérie* 6, 216p.
- Bouillin J.P., 1979.** La transversale de Collo et d'El-Milia (Petite Kabylie) : une région-clef pour l'interprétation de la tectonique alpine de la chaîne littorale d'Algérie. *Mémoire de la Société Géologique de France* 57, 135, 84p.
- Bouillin J.P., 1986.** Le "bassin maghrébin" : une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'ouest des Alpes. *Bulletin de la Société Géologique de France* 8: 547-558.
- Caby R & Hammor D., 1992.** Le massif de l'Edough (Algérie) : Un Metamorphic Core Complex d'âge miocène dans les Maghrébides. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris* 314 : 829-835.
- Cohen C.R., 1980.** Plate tectonic model for the Oligo-Miocene evolution of the western Mediterranean. *Tectonophysics*68 : 283-311.
- Debièche T.H., 2002.** Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse, Nord-Est algérien. *Thèse de Doctorat, Univ. Franche-Compte, France, 235 p.*
- Derradji F., Kherici H & Caruba R., 2005.** Etude de la drainance dans un système d'enappes superposées. Exemple de la nappe d'Annaba (Nord-Est d'Algérie). *La Houille Blanche, 1* : 65-72.
- DGF., 2003.** Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar. Lac de Fetzara, wilayade Annaba, *Direction Générale des Forêts (DGF), 6p.*
- DGF., 2007.** Carte des formations forestières, wilaya de Annaba (échelle 1/50 000). Edition provisoire, Direction générale des Forêts (DGF).
- Dhirendra M.J., Alok K & Namita A., 2009.** Assessment of the irrigation water quality of river ganga in Haridwar district. *Rasayan journal of chemistry (2)* :195-203.
- Djabri L., 1996.** Mechanism of Seybouse water pollution and vulnerability, geological, industrial, agricultural and urban origins. *Doctorat Thèse, University of Annaba, 176p.*

- Djamai R., 2007.** Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du système endoréique du lac Fetzara (Nord-Est algérien). Approche géochimique et évolutionspatio-temporelle des phénomènes. *Thèse de Doctorat d'Etat, Institut National Agronomique d'Alger, Algérie, 167p.*
- Doneen L.D., 1964.** Notes on water quality in agriculture. published as a water science and Engineering, Paper 4001, *University of California, Davis.*
- FAO, 1990.** Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, n°5.
- Fekrache F., Djamai R & Cherif A., 2014.** Quality of the Fetzara Lake ground water from north-east Algeria Laboratory of Soil and Sustainable Development. *Journal Advances in Environmental Biology, 8(5):1205-1211.*
- Gleizes G., Bouloton J., Bossiere G & Collomb P., 1988.** Données lithologiques et pétrostructurales nouvelles sur le massif cristallophyyllien de l'Edough (Est Algérie). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 36 :1001-1008.*
- Gupta M. D., 1987.** Selective discrimination against female children in rural Punjab, India. *Population and development review: 77-100.*
- Habes S., 2006.** Pollution saline d'un lac, cas du lac Fetzara, Est Algérienne. *Mémoire de Magister, option : Hydrogéologie. Univ. de Annaba, Algérie, 103 p.*
- Habes S., 2013.** Caractéristiques chimiques d'un lac appartenant aux écosystèmes humides du Nord de l'Algérie ; Cas : Lac Fetzara Nord -Est Algérien. *Thèse de Doctorat, Univ. de Annaba, 218p.*
- Hammor D & Lancelot J., 1998.** Métamorphisme miocène de granites panafricains dans le massif de l'Edough (Nord-est de l'Algérie). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 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). Retracsés par la pétrologie, la tectonique et la géochronologie (U/Pb, Rb/Sr, Sm/Nd et  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ ). *Thèse de Doctorat, l'UST Languedoc, Univ. de Montpellier II, France, 205p.*
- 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, Univ. de Annaba, Algérie, 214 p.*
- Hilly J., 1962.** Etude géologique du massif de l'Edough et du Cap de Fer (Est-Constantinois). Publications du Service de la Carte Géologique de l'Algérie (*Nouvelles séries*) 19, 408 p.
- Ilavsky J & Snopkova P., 1987.** Découverte d'acritarches paléozoïques dans les terrains métamorphiques de l'Edough (Wilaya d'Annaba, Algérie). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, 305(série II) : 881-884*
- Joleau L., 1936.** Etude géologique de Bone (Annaba)- la calle (El Kala). *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie (2), n°12, Algérie, 199p.*
- Kaka E.A., Akiti T.T., Nartey V.K., Bam E.K.P & Adomako D., 2011.** Hydrochemistry and evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in the southeastern Volta River basin: Manyakrobo area, Ghana. *Elixir Agriculture 39: 4793-4807.*
- Kelly J., 1963.** "Bitopological spaces". *Proceedings of the London Mathematical Society 3(1):71-89.*
- Kherici N., 1993.** Vulnerability to chemical pollution of superposed water tables groundwater system in industrial and agricultural area (Annaba-Mafragh) NE Algeria. *Thèse de doctorat ès-sciences. Univ. de Annaba, Algérie, p 170.*

- Laouar R., Boyce A.J., Arafa M., Ouabadi A., & Fallick A.E. 2005.** Petrological, geochemical, and stable isotope constraints on the genesis of the Miocene igneous rocks of Chetaibi and Cap de Fer (NE Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, 41 : 445-465.
- Laouar R., Boyce A.J., Ahmed-said Y., Ouabadi A., Fallick A.E & Toubal A., 2002.** Stable isotope study of the igneous, metamorphic and mineralized rocks of the Edough complex, Annaba, North-East Algeria. *Journal of African Earth Sciences*, 35 (2): 271-283.
- Li P., Zhang Y., Yang N., Jing L & Yu P., 2016.** Major ion chemistry and quality assessment of groundwater and around a mountainous tourist town of China. *Exposure and Health* 8: 239-252. <https://doi.org/10.1007/s12403-016-0198-6>.
- Marignac C & Zimmermann J.L., 1983.** Ages K-Ar de l'évènement hydrothermal et des intrusions associées dans le district minéralisé Miocène d'Aïn-Barbar (Est Constantinois, Algérie). *Mineralium Deposita*, 18 : 457-467
- Marignac C., 1985.** Les minéralisations filoniennes d'Ain Barbar (Algérie). Un exemple d'hydrothermalisme lié à l'activité géothermique alpine en Afrique du nord. *Thèse de Doctorat d'Etat (2 tomes), I.N.P. Lorraine, Nancy, France*
- Marre A., 1992.** Le Tell oriental Algérien de Collo à la frontière Tunisienne, Etude géomorphologique. Vol. 1 & 2, *Office des Publications Universitaires. Alger, Algérie.*
- Maury R.C., Fourcade S., Coulon C., El Azzouzi M., Bellon H., Coutelle A., Ouabadi A., Semroud B., Megartsi M., Cotton M., Belanteur O., Louni-Hacini A., Piqué A., Capdevila R., Hernandez J. & Réhault J.P., 2000.** Post-collisional neogene magmatism of the Mediterranean Maghreb margin a consequence of slab breakoff. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris* 331 : 159-173.
- Monie P., Montigny R & Maluski H., 1992.** Age Burdigalien de la tectonique ductile extensive dans le massif de l'Edough (Kabylie, Algérie). Données radiométriques <sup>39</sup>As-<sup>40</sup>Ar. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 5 : 571-584.
- Mouhoub L & Touaibia B., 2013.** Modélisation du bilan hydrologique annuel : cas du lac Fetzara. w. Annaba. *Journal de l'Eau et de l'Environnement* 2 (23): 60-67.
- Nagaraju A., Sunil Kumar K & Thejaswi A., 2014.** Assessment of groundwater quality for irrigation: a case study from bandalamottu leads mining area, Guntur district, and hrapradesh, south India. *American Journal of Water Resources*, 2 (3) : 63-70.
- Ould El-hacen I., 2016.** Evolution spatiotemporelle du lac Fetzara (Nord-est algérien), *Mémoire de Master, Univ. de Ouargla*, 43p.
- Perrot C., Derville M., et al. 2009.** "Le lait dans les montagnes européennes. Un symbole menacé. *Rech. Ruminants* 16 : 215-218.
- Piper A.M., 1944.** A graphic procedure in geochemical interpretation of water analysis. *American Geophysical Union Transom* 25: 914-923.
- Raghunath I.I.M., 1987.** Groundwater, *Second edition; Wiley Eastern Ltd. New Delhi, India:* 344-369.
- Richards L.A., 1954.** Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *U.S.D.A hand book, Vol.60, 160p.*
- Rifat A.H., Howlader I.S & Ganguli S., 2021.** Groundwater suitability for irrigation and livestock consumption in the chittagong university campus, Bangladesh: a hydro-geochemical and multivariate analysis. *Journal of Materials and Environmental Science*, 12 (2):308-328.

- Rouabhia A., 1993.**Hydrogéologie et évolution des chlorures dans la périphérie d'un lac. Cas du Lak Fetzara N.E. *Algérie. Mémoire d'ingénieur. Univ. de Annaba.* 90 p.
- Rouabhia A., Djabri L., Hadji R., Baali F., Fahdi Ch & Hanni A., 2012.** Geochemical characterization of groundwater from shallow aquifer surrounding Fetzara Lake NE Algeria, *Arabian Journal of Geosciences*, 5 (1): 1–13.
- Safiur Rahman M., Saha N., Towfiqul Islam A.R.M., Shen S & Bodrud-Doza, M., 2017.** Evaluation of water quality for sustainable agriculture in Bangladesh. *Water, Air & Soil Pollution* 228, 385. <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3543-x>.
- Saiyouri. V N., 2012.** Méthodes d'irrigation en milieu aride, rapport, 57p
- Singh K.R., Goswami A.P., Kalamdhad A.S & Kumar B., (2019).**Development of irrigation water quality index incorporating information entropy. *Environment, Development and Sustainability* 22:3119-3132. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00338-z>.
- Singha D., (2017).** A study on groundwater quality analysis in the district of Idukki, Kerala. *International Journal of Scientific and Engineering Research* 8 (3):842-858.
- Talhi A., 2018.**Étude de l'aptitude à l'irrigation des eaux épurées de la station d'épuration de Lalallik -wilaya de Annaba. *Mémoire de master*, 62p.
- Thornthwaite, C.W., 1948.** An approach towards a rational classification of climate. *Geographical Review* 38: 55-9.
- Todd D.K., 1980.** Groundwater Hydrology. 2nd Ed., Wiley, New York.
- Towfiqul Islam A.R.M., Shen S., Bodrud-Doza M & Safiur Rahman M., 2017.** Assessing irrigation water quality in Faridpur district of Bangladesh using several indices and statistical approaches. *Arabian Journal of Geosciences* 10, 418.
- Vila J.M., 1970.**Le Djebel Edough un massif externe du Nord-est de la Berbérie. *Bulletin de la Société Géologique de France* 7 (tome XII) : 805–812.
- Wilcox L.V., 1955.**Classification and use of irrigation waters. *US Department of Agriculture, Arc 969, Washington DC.*
- Zahi F., 2008.** La qualité des eaux et de sols de la région du lac Fetzara (Nord-Est de l'Algérie). *Mémoire de Magister, Univ. de Annaba.* 156 p.
- Zahi F., Djamai R., Chaab S., Djabri L., Drouiche A., & Medjani F., 2013.**Dynamique de la nappe et qualités physico-chimiques des eaux souterraines du lac Fetzara (Nord-Est Algerien). *Rev. Sci. Technol., Synthèse*26 : 86 -95.
- Zahi F., 2014.** Contribution a l'étude hydro chimique du sous bassin versant du lac Fetzara (nord-est algérien), approche géochimique et fonctionnement des sols et des eaux. *Thèse de Doctorat es-sciences, Univ. de Annaba* 164 p.
- Zenati N., 1999.** Relation nappe-lac, Confirmation par l'hydrochimie, Cas de la nappe superficielle de la plaine Ouest d'El Hadjar, lac Fetzara N-E algérien. *Mémoire de Magister, option : Chimie et Environnement, Univ. de Annaba*, 151p.
- Zenati N., 2010.** Pollution de l'environnement aquatique : diagnostic et proposition« Région de Annaba ». *Thèse de Doctorat en géologie appliquée, Univ. de Annaba, Algérie*, 289p.

**Résumé :**

La présente étude a été réalisée afin d'évaluer l'aptitude à l'irrigation des eaux souterraines dans la région du lac de Fetzara, leur évolution spatio-temporelle en fonction de la variation des paramètres physico-chimiques des eaux. Deux campagnes d'échantillonnage des eaux ont été réalisées, au cours des mois de Janvier et Mai 2007. Les paramètres physico-chimiques (potentiel hydrogène (pH) et conductivité électrique (CE)) ont été mesurés in-situ tandis que, les éléments majeurs ont été analysés en laboratoire. Les résultats obtenus ont été interprétés et évalués en utilisant des indicateurs de la qualité de l'eau d'irrigation tels que le rapport d'adsorption du sodium (SAR) et le pourcentage de sodium (Na%) en combinaison avec la conductivité électrique (CE), en plus, l'indice de perméabilité (PI), l'indice de bicarbonate de sodium résiduel (RSBC), l'indice de Kelly (KR) et le rapport d'absorption du magnésium (MAR). En général, les eaux souterraines sont acceptables pour l'irrigation des cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés, mais nécessitent un contrôle préalable de l'évolution de la salinité, sauf les eaux de la région de Cheurfa (P3 et P4) qui sont de mauvaise qualité en raison de la forte minéralisation de l'eau ( $CE > 3000 \mu S/cm$ ).

**Mots clés :** Aptitude des eaux souterraines, irrigation, lac Fetzara, Annaba, Algérie.

**ملخص:**

أجريت هذه الدراسة من أجل تقييم مدى ملاءمة المياه الجوفية للري في منطقة بحيرة فذازرة، وتطورها المكاني والزمني كدالة لتغير الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية. تم إجراء حملتين لأخذ عينات من المياه خلال شهري يناير ومايو 2007. كما تم قياس الخصائص الفيزيائية والكيميائية (درجة الحموضة (pH) والتوصيل الكهربائي (CE)) في الموقع بينما تم تحليل العناصر الرئيسية في المختبر. تم تفسير النتائج التي تم الحصول عليها وتقييمها باستخدام مؤشرات جودة مياه الري مثل نسبة امتصاص الصوديوم (SAR) ونسبة الصوديوم (Na%) مقارنة مع التوصيل الكهربائي (CE)، بالإضافة إلى مؤشر النفاذية (PI) وكذلك مؤشر بيكربونات الصوديوم (RSBC)، مؤشر كيلي (KR) ونسبة امتصاص المغنيسيوم (MAR). بشكل عام، تعتبر المياه الجوفية للمنطقة مقبولة لري المحاصيل المقاومة للملوحة في تربة جيدة التصريف، ولكنها تتطلب مراقبة مسبقة للتغيرات في الملوحة، باستثناء المياه في منطقة الشرفة (P3 و P4) ذات النوعية الرديئة بسبب التمعدين القوي للماء ( $CE < 3000$  ميكرو سيمنس / سم).

**الكلمات المفتاحية:** ملاءمة المياه الجوفية، الري، بحيرة فذازرة، عنابة، الجزائر.

**Abstract:**

The present study was carried out in order to evaluate the suitability for irrigation of groundwater in the Fetzara Lake area, their spatio-temporal evolution according to the variation of the physico-chemical parameters of groundwater. Two water sampling campaigns were carried out, during January and Mai 2007. The physico-chemical parameters (hydrogen potential (pH) and electrical conductivity (EC)) were measured in-situ while the major elements were analysed in the laboratory. The obtained results have been interpreted and evaluated by using indicators of water irrigation quality such as sodium adsorption ratio (SAR) and percent sodium (Na%) in combination with the electrical conductivity (EC), in addition, the permeability index (PI), the residual sodium bicarbonate index (RSBC), the Kelly index (KR) and the magnesium absorption ratio (MAR). In general, groundwaters are acceptable for irrigation of salt-tolerant crops on well-drained soils, but require prior control of salinity evolution, excluding waters in the Cheurfa area (P3 and P4) which are of poor quality due to the high mineralization of the water ( $EC > 3000 \mu S/cm$ ).

**Keywords:** groundwater suitability, irrigation, Fetzara lac, Annaba, Algeria.