



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة باجي مختار

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE BIOLOGIE

THESE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité: BIOLOGIE VEGETALE

**Intitulée**

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'ORIGINE DE LA SALINITE DES  
EAUX DU LAC FETZARA-ANNABA (ALGERIE)**

**Présentée par: FEKRACHE Fadila**

**Membres du Jury:**

BENSLAMA Mohamed (Pr.)	Président	Université Badji Mokhtar-Annaba
DJAMAI Rachid (Pr.)	Directeur de thèse	Université Badji Mokhtar-Annaba
REHAMNIA Rabah (Pr.)	Examineur	Université Badji Mokhtar-Annaba
BENSAID Rabah (Pr.)	Examineur	Université 20 Aout 1955- Skikda
FADEL Djamel (Pr.)	Examineur	Université Souk-Ahras
ALAYAT Hacène (Dr.)	Examineur	Université El-Tarf

Année universitaire: 2014/2015

## **REMERCIEMENTS**

*Ce travail de thèse n'aurait pu voir le jour sans la collaboration de nombreuses personnes qu'il m'est particulièrement très agréable de remercier.*

*Je tiens à remercier en tout premier lieu le Professeur **DJAMAI Rachid** en tant que directeur de thèse qui s'est impliqué à des moments stratégiques: prélèvements d'eau dans des conditions climatiques difficiles, les analyses en laboratoire, la correction du manuscrit*

*ci-dessous, pour la confiance qu'il m'a témoigné et pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de diriger ce travail. Je le remercie également pour la confiance qu'il m'a témoigné de m'avoir initié dans le domaine de la recherche scientifique. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour toute l'attention, la patience et le temps qu'il m'a consacré, malgré ses lourdes responsabilités et ses nombreuses préoccupations et surtout pour son soutien moral, je lui dis « MERCI ».*

*Si j'ai la joie d'écrire ces lignes aujourd'hui, c'est bien sûr grâce aux autres membres du jury qui ont évalué ce travail et qui, par leurs remarques m'ont permis d'avoir un peu plus de recul sur cette étude. Mes vifs remerciements vont également pour Monsieur le Professeur **BENSLAMA Mohamed**, de l'université de Annaba, pour avoir bien voulu s'intéresser à ce travail et qui a accepté de me faire le grand honneur de présider le Jury de ma soutenance de thèse.*

*Le professeur **REHAMNIA Rabah** a accepté de participer en tant que membre examinateur du jury pour juger ce travail. Je tiens à lui exprimer mes vifs remerciements. Je suis très heureuse que ce travail soit jugé par, le Professeur **FADEL Djamel**, de l'Université de Souk-Ahras. Ses remarques me seront d'une grande utilité.*

*Je dois remercier vivement le professeur **BENSAID Rabah**, de l'Université de Skikda pour m'avoir examiné cette thèse.*

*Le Dr **AYALAT Hacène**, Maître de Conférence à l'Université El Tarf, a accepté d'évaluer ce travail en tant que membre examinateur du jury. Je le remercie vivement.*

*Je tiens également à remercier profondément l'ensemble des collègues et amis du laboratoire « sols et développement durable » de l'Université de Annaba.*

*Enfin je remercie affectueusement toute ma famille.*

*En bref, merci à tous!*

## ملخص

### مساهمة في دراسة مصدر ملوحة مياه بحيرة فتزارة- عنابة (الجزائر)

مياه حوض بحيرة فتزارة تعتبر من بين المصادر المهمة في سقي الأراضي المتواجدة في ضواحي هذه البحيرة هذا المياه من جهة تشهد فترات من الجفاف طويلة و متكررة و من جهة أخرى تعرف تدهور في طبيعتها هذا التدهور يفسر من خلال ظاهرة الملوحة.

قمنا بدراسة متعددة الجوانب لمعرفة تطور ملوحة مياه بحيرة فتزارة انطلاقا من الدراسة الجيولوجية و المناخية و كذلك الدراسة الجيوكيميائية و الاحصائية و ذلك لتفسير و ايجاد مختلف العوامل المؤدية الى ملوحة هذه المياه.

ان تحديد سيرورة ملوحة مياه بحيرة فتزارة تم عن طريق متابعة التطور المكاني و الزماني للعناصر الكيميائية ( $Na^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{--}$ ,  $CO_3^{--}$ ,  $HCO_3^-$ ) و ( $Br^-$ ) البروم.

من خلال هذه الدراسة تم التوصل الى ان هذه الملوحة ناتجة عن ظاهرة التبخر بالاضافة الى ظاهرة الترسيب و التحلل لمختلف العناصر الكيميائية المتواجدة كل هذه العوامل هي السبب في تغير الطبيعة الكيميائية للمياه من فصل إلى آخر.

اسقاط النتائج على مخططي Durov و Piper بينت نوعين من السحن الكيميائية كلوريدي صودي و بيكاربونات صودي.

من خلال هذه دراسة قابلية هذه المياه للسقي تبين أن معظم عينات الدراسة التي تم أخذها لها خاصية مقبولة. هذه المياه يمكن استعمالها لسقي محاصيل زراعية مقاومة للأملح فوق تربة قابلة للصرف و لكن تتطلب مراقبة مستمرة لمعرفة تطور هذه الملوحة.

**الكلمات المفاتيح:** ملوحة, مياه, جيوكيمياء, مقارنة إحصائية, ترسيب/تحلل, فتزارة.

## RESUME

### Contribution à l'étude de l'origine de la salinité des eaux du lac Fetzara-Annaba (Algérie)

Les eaux du bassin versant du lac Fetzara est l'une des principales ressources pour l'irrigation des terres agricoles situées à la périphérie du lac. Ces eau subissent les contraintes des périodes de sécheresse répétées et longues d'une part et, d'autre part, connaissent une dégradation de leurs qualité, cette dégradation est exprimée par la salinisation.

La détermination du processus de salinisation des eaux du lac Fetzara a été approchée à partir de l'étude de l'évolution spatio-temporelle des éléments chimiques majeurs ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{CO}_3^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) et mineur ( $\text{Br}^-$ ).

Une approche pluridisciplinaire intégrant la géologie, le climat, la géochimie et une analyse statistique multivariable a été entreprise pour caractériser les processus et les facteurs qui contrôlent l'acquisition de la minéralisation des eaux du lac Fetzara.

La projection des résultats des analyses dans les diagrammes de Piper et Durov montre deux faciès chimiques: chloruré-sodique et bicarbonaté-sodique.

Les processus de concentration par évaporation, de dissolution/précipitation des minéraux calcite et évaporitiques et de dilution après la saison pluvieuse, sont responsables des variations saisonnières de la chimie des eaux.

L'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation, a révélé que la majorité des échantillons prélevés ont une qualité admissible. Ces eaux sont en général acceptables pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés, mais nécessitant un contrôle préalable de l'évolution de la salinité.

**Mots clés :** salinité, eaux, géochimie, approche statistique, dissolution/précipitation, Fetzara.

## ABSTRACT

### Contribution to the study of the origin of the salinity of waters of the lake Fetzara-Annaba (Algérie)

Waters of the pond overturning of the lake Fetzara is one of the main resources for the irrigation of farmlands place in the periphery of the lake. These waters undergo the constraints of the repeated and long periods of drought on one hand and, on the other hand, know a degradation of their quality, this degradation is expressed by the salinization.

The determination of the process of salinisation of the waters of the lake Fetzara was approached from the study of the spatiotemporal evolution of the major chemical elements ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{CO}_3^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) and the minor ( $\text{Br}^-$ ).

A pluri-disiplinary approach was used involving structural geology, water geochemistry and a multi-variable statistical analysis applied to the morphology of the sites and to the borehole parameters in order to describe the processes and the factors controlling the mineralization of the water.

The projection of the results of analyses in the diagrams of Piper and Durov shows two chemical facies: chlorinated sodic and bicarbonaté-sodic.

The processes of concentration by evaporation, dissolution/haste of minerals calcite and évaporitique and of dilution after the rainy season are responsible seasonal variations of the chemistry of waters.

The study of the capacity of waters in the irrigation revealed that waters of the majority of the taken samples have an acceptable quality; these waters are generally acceptable for the irrigation of the tolerant cultures in salts on well drained grounds, but require a preliminary control of the evolution of the salinity.

**Key words:** salinity, water, geochemistry, statistical approach, dissolution/haste, Fetzara.

---

---

## TABLE DES MATIERES

<b>Remerciements.....</b>	<b>1</b>
<b>Résumé en arabe.....</b>	<b>2</b>
<b>Résumé en français.....</b>	<b>3</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>4</b>
<b>Table des matières.....</b>	<b>5</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>9</b>
<b>Chapitre I. Les origines de la salinité des eaux en zones côtières.....</b>	<b>13</b>
1. Définition de la salinité des eaux.....	13
2. Sources de la salinité des eaux.....	14
2.1. Le domaine marin.....	14
2.1.1. Les embruns marins.....	14
2.1.2. Le biseau d'eau salée.....	16
2.1.3. Mécanismes de l'intrusion marine.....	16
2.1.4. Facteurs déterminants de l'intrusion marine.....	18
2.1.4.1. Effet de l'exploitation.....	18
2.1.4.2. Situation par rapport à la mer.....	18
2.1.4.3. Alimentation de la nappe.....	18
2.1.4.4. Hydrogéologie.....	19
2.2. Le domaine continental.....	19
2.2.1. Dissolution des évaporites.....	19
2.2.2. Concentration par évaporation.....	20
2.2.3. Facteurs déterminants la salinité continentale.....	21
2.3. Sources anthropiques des sels.....	24

---

2.4. La salinisation des lacs et des zones humides.....	25
Conclusion.....	25
<b>Chapitre II. Caractéristiques du paysage.....</b>	<b>26</b>
1. Situation géographique.....	26
2. Description du lac.....	27
3. Géologie.....	29
4. Pédologie.....	30
4.1. Les sols peu évolués (SPE).....	31
4.2. Les vertisols (SV).....	32
4.3. Les sols hydromorphes (SH).....	32
4.4. Les sols halomorphes (SHA).....	33
4.5. Utilisation agricole des sols.....	34
5. Géomorphologie.....	35
5.1. Les montagnes.....	35
5.2. Les collines.....	35
5.3. Les glacis.....	36
6. Hydrologie et Hydrogéologie.....	36
6.1. Hydrologie.....	36
6.2. Hydrogéologie.....	39
6.3. Ressources en eaux.....	40
6.3.1. Ressources en eaux superficielles.....	40
6.3.2. Ressources en eaux souterraines.....	41
7. Etude climatique.....	41

---

---

7.1. Le régime pluviométrique.....	42
7.2. Le régime thermique.....	42
7.3. L'humidité .....	43
7.4. Le vent.....	43
7.5. L'évaporation.....	44
7.6. Le bilan hydrique.....	44
7.6.1. L'évapotranspiration.....	45
7.6.2. L'interprétation du bilan hydrique .....	48
7.7. L'indice d'aridité de de Martonne (1926).....	49
Conclusion.....	50
<b>Chapitre III. Matériel et méthodes.....</b>	<b>52</b>
1. Echantillonnage et analyse.....	52
2. Méthodes d'étude.....	53
2.1. Traitement statistique.....	53
2.2. Diagrammes interprétatifs.....	54
2.3. Indice de saturation (IS).....	55
2.4. Les relations ions-chlore.....	56
2.4.1. La relation sodium-chlore.....	56
2.4.2. La relation brome-chlore.....	57
Conclusion.....	58
<b>Chapitre IV. Histoire des études réalisées.....</b>	<b>59</b>
1. Etude Durand (1950).....	59
2. Etude d'Ifagraria (1964).....	60
3. Etude AJCI (1985).....	60

---



---

4. Etude Djamai (1993).....	61
5. Etude BNEDER (1997).....	62
6. Etude Djamai (2000).....	62
7. Etude GHI 2009.....	63
7.1. Etude pédologique.....	63
7.2. Etude hydrologique.....	65
Conclusion.....	66
<b>Chapitre V. Etude statistique multivariee des eaux du lac Fetzara.....</b>	<b>67</b>
1. Statistiques descriptives.....	67
2. Matrice de corrélation.....	72
3. Analyse en Composantes Principales (ACP).....	74
Conclusion.....	80
<b>Chapitre VI. Approche géochimique des eaux.....</b>	<b>81</b>
1. Les paramètres physico-chimiques.....	81
1.1. La température (T °C).....	81
1.2. Le potentiel d'hydrogène (pH).....	82
1.3. Le potentiel d'oxydo-réduction (Eh).....	83
1.4. La conductivité électrique (CE).....	83
2. Diagrammes interprétatifs.....	86
2.1. Diagramme de Piper.....	86
2.2. Diagramme de Durov.....	88
3. Indice de Saturation (IS).....	90
4. Relations ions-chlorures.....	94
4.1. Relation Na <sup>+</sup> -Cl <sup>-</sup> .....	94

---

4.2. Relation Br <sup>-</sup> -Cl <sup>-</sup> .....	97
5. Aptitude des eaux à l'irrigation.....	99
Conclusion.....	104
<b>Chapitre VII. Synthèse et discussion.....</b>	<b>105</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>112</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>115</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>128</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>131</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>133</b>

## **INTRODUCTION**

La salinisation est l'une des principales causes de dégradation de la qualité de l'eau dans le monde. Les mécanismes à l'origine de la salinité d'un système hydrologique sont diverses et complexes. Ainsi, le mode de salinisation dépend du contexte géographique (côtier, continental...), géologique (nature de l'aquifère, minéralogie des sédiments...) et climatique. Les principaux vecteurs impliqués dans la salinisation des masses d'eau sont l'intrusion marine, la dissolution des formations évaporitiques (Bourhane, 2010).

Les eaux de surfaces et souterraines, initialement faiblement minéralisées, peuvent, par interaction avec les roches du bassin versant et par évaporation successives, devenir salines. Les concentrations en sels, peuvent augmenter jusqu'à la précipitation d'évaporites. Les lieux principaux de la formation de sels solides sont les sols agricoles irrigués et les bassins endoréiques où l'évaporation atteint ou excède l'influx d'eaux continentales (Kloppmann et al., 2011).

Les ressources en eau des nappes phréatiques du pourtour méditerranéen, et plus particulièrement celles du Moyen Orient et de l'Afrique du Nord, connaissent de plus en plus une dégradation qualitative et quantitative (Custodio et Bruggeman, 1987; Edmunds et Droubi, 1998; Vengosh et Rosentha, 1994; Vengosh et al., 1999).

Le développement économique et social est directement lié à la disponibilité et à l'utilisation des ressources en eau, et notamment les eaux souterraines, qui sont souvent les seules disponibles tout au long de l'année (Genxu et Guodong, 1999; Hamdy et al., 2003; Braune et Xu, 2010), mais une partie de ces ressources est "fossile" et leur exploitation n'est pas durable (Scanlon et al., 2002).

L'Afrique du Nord est une région typiquement semi-aride où les ressources en eau sont susceptibles d'évoluer spectaculairement sous l'influence de fluctuations climatiques ou d'actions humaines (Cudennec et al., 2007). Ces changements peuvent affecter les stocks d'eau souterraine, rarement en augmentation (Idder, 2007), souvent en diminution importante (Karaoul et al., 2008), mais aussi leur qualité (Karaoul et al., 2008; Bouhlassa et al., 2008). En dehors des flux passant d'un système aquifère à un autre, la recharge naturelle des nappes phréatiques provient essentiellement de l'infiltration des eaux des oueds, lors de leurs crues les plus fortes. En région méditerranéenne, un tel phénomène est souvent très variable dans le temps et dans l'espace (Lange et Leibundgut, 1999).

L'Algérie septentrionale présente un climat semi-aride qui se caractérise par une forte irrégularité pluviométrique. D'une manière générale, les bassins versants sont imperméables (ANRH, 1993). Ce qui donne sur le plan des régimes hydrologiques, une extrême irrégularité saisonnière et interannuelle des écoulements qui est accentuée par de longues périodes de sécheresse, des crues violentes et rapides, et une érosion intense et des transports solides importants (Kadi, 1997).

La salinité des eaux présente l'un des grands problèmes en Algérie, vu son effet dévastateur sur la qualité des eaux. Elle est souvent liée à la dissolution des formations géologiques, à l'effet de l'évaporation et à l'effet d'une intrusion marine (Habes, 2013).

La salinité des eaux et du sol du lac Fetzara, a fait l'objet d'un bon nombre de travaux antérieurs (Durand, 1950; IFAGRARIA, 1967; A.J.C.I, 1985; Djamai, 1993 et 2007; Zenati, 1999; Belhamra, 2001; Habes, 2006 et 2013; Zahi, 2008), pour expliquer l'origine, les causes et l'évolution de ce phénomène.

Le climat de la région du lac Fetzara présente un déficit pluviométrique important. Par ailleurs, la structure temporelle des termes du bilan hydrique est assez complexe. La pluie et surtout l'évaporation présente des variations cycliques annuelles avec une saisonnalité indiscutable, c'est une caractéristique des climats arides, ceci conduit habituellement à la concentration des éléments solubles dans les sols se traduisant par la salinisation de ces derniers. Cependant, les pluies peuvent être importantes pour certaines années, le bilan sera plus positif, traduisant ainsi la recharge de la nappe et le lessivage des éléments solubles vers cette dernière (Djami et al., 2006).

Notre objectif est de contribuer à la compréhension du processus de minéralisation des eaux souterraines et de surfaces dans cette zone. Cette étude a été menée dans ce sens, avec l'intention de déceler les facteurs provoquant cette salinité, et de localiser leurs foyers.

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour pouvoir déterminer les différentes origines de la salinité à savoir ; l'analyse en composantes principales (ACP) et l'approche géochimique.

Cependant, la prédiction de l'aspect géochimique de la salinité des eaux est une démarche originale qui pourrait s'avérer fructueuse pour une meilleure connaissance de l'origine de cette salinité dans cette région. Cette démarche s'appuie sur les éléments suivants: Utilisation des rapports ioniques caractéristiques, parmi les critères géochimiques qui peuvent aider à l'identifier l'intrusion de l'eau de mer en zones côtières, on utilise

notamment les rapports ioniques  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$ . L'utilisation des teneurs en anion bromure est un complément indispensable des mesures de concentrations en chlorures pour expliquer l'origine des anomalies de salinité dans l'eau. Il permet, grâce à la relation  $\text{Br}^- = f(\text{Cl}^-)$  et au rapport molaire  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$ , de distinguer les zones à influence marine des zones à influence évaporitique.

Utilisation du logiciel « Diagramme » pour déterminer l'état de saturation des eaux par les principales espèces chimiques sous l'effet de l'évaporation isotherme (25°C).

La thèse est structurée autour de sept chapitres précédés par une introduction qui décrit l'origine du sujet, les objectifs visés et l'approche méthodologique utilisée pour atteindre l'objectif.

Le premier chapitre du travail présente une recherche bibliographique sur l'origine de la salinité des eaux.

Le deuxième chapitre est essentiellement dédié à la présentation du secteur d'étude d'un point de vue géographique, géologique, hydrogéologique et climatologique.

Dans le troisième chapitre, il sera question du matériel et les méthodes d'étude, dans le quel sera présenté les travaux effectués sur les eaux du lac Fetzara, les campagnes d'échantillonnages, les techniques analytiques et les outils de traitement des données.

Le quatrième chapitre traitera toutes les principales études effectuées sur le site.

Le chapitre cinq utilisera une approche statistique à partir d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) afin de déterminer les différentes sources de variabilité de la chimie des eaux, en utilisant le logiciel « Xlstat ».

Le chapitre six caractérise de manière globale la géochimie des eaux (minéralisation, faciès chimiques des eaux et origine de la minéralisation).

Le dernier chapitre intitulé synthèse et discussion fera état de la synthèse globale des résultats obtenus avec une discussion en vue d'une meilleur compréhension du comportement hydrochimique des eaux et le processus d'acquisition de la salinité des eaux du la Fetzara.

Enfin, le document sera finalisé par une conclusion générale et les perspectives.

## **CHAPITRE I. LES ORIGINES DE LA SALINITE DES EAUX EN ZONES COTIERES**

Bien que le phénomène d'intrusion marine soit une des origines principales de la salinisation des eaux côtières, il est important de mentionner qu'il existe d'autres origines de la salinité (Custodio, 1997; Bear et al, 1999; Barlow, 2003) telles que:

- L'évaporation et la reconcentration des eaux de surface ou d'aquifères peu profonds.
- La dissolution d'évaporites et l'influence des réservoirs géologiques.

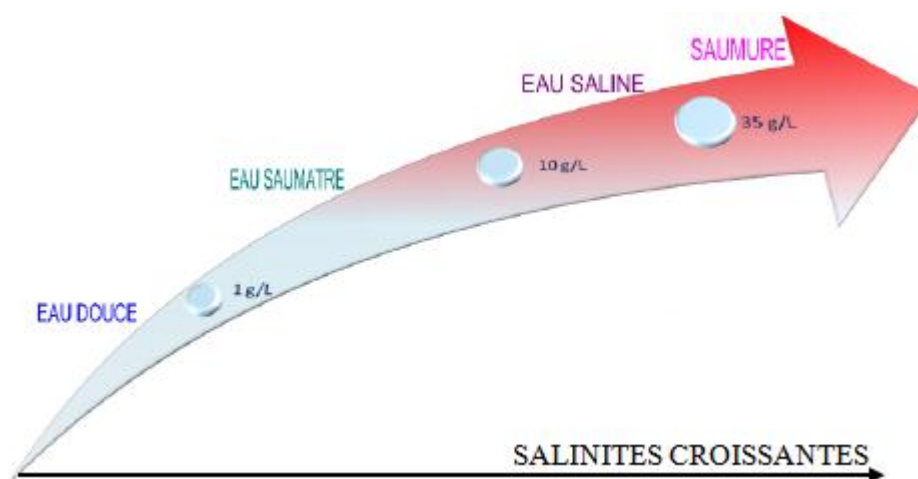
### **1. Définition de la salinité des eaux**

La salinité peut être déterminée directement par la somme des concentrations mesurées en éléments dissous et indirectement, à partir de la conductivité électrique (mS/cm). Toutefois, le terme de salinité est souvent utilisé comme synonyme de chlorinité qui désigne la concentration en chlore dissous sous forme de chlorures (mg/l ou g/l) (Klopman et al, 2011).

Par le terme minéralisation, on désigne la concentration des solides totaux dissous (CTD), ou charge totale dissoute (CTD). Le terme correspondant dans la littérature internationale est TDS, l'abréviation anglaise de Total Dissolved Solids. Le terme salinité est synonyme de TDS et s'exprime généralement en mg/l ou g/l.

Usuellement, on considère en fonction de leur salinité, les eaux douces, saumâtres, salines et les saumures (Kharaka et Hanor, 2005).

- Eau douce: eau dont la salinité est inférieure à 1g/l.
- Eau saline: eau dont la salinité est comprise entre 1 g/l et 35 g/l.
- Saumure: eau dont la valeur de salinité est supérieure à la valeur moyenne de celle de l'eau de mer, c'est-à-dire plus de 35 g/l TDS ( $3.5 \times 10^4$  mg/l TDS).



**Figure 1.** Gammes de concentrations et terminologie (Kharaka et Hanor, 2005).

## 2. Sources de la salinité des eaux

Le cycle de la salinité dans les eaux continentales (figure 2) peut être subdivisé en deux grands domaines, le domaine « marin » lié directement ou indirectement à l'eau de mer et le domaine « continental » pour lequel les sels dissous sont issus essentiellement de l'interaction avec des roches sédimentaires (hors évaporites marines) et concentrées par l'évaporation.

### 2.1. Le domaine marin

L'intrusion marine représente l'un des mécanismes de salinisation les plus répandus impactant la qualité de l'eau côtière. Ce phénomène entraîne des niveaux de salinité qui peuvent dépasser les normes de potabilité de l'eau mais également compromettre son aptitude à l'irrigation (Jones et al, 1999).

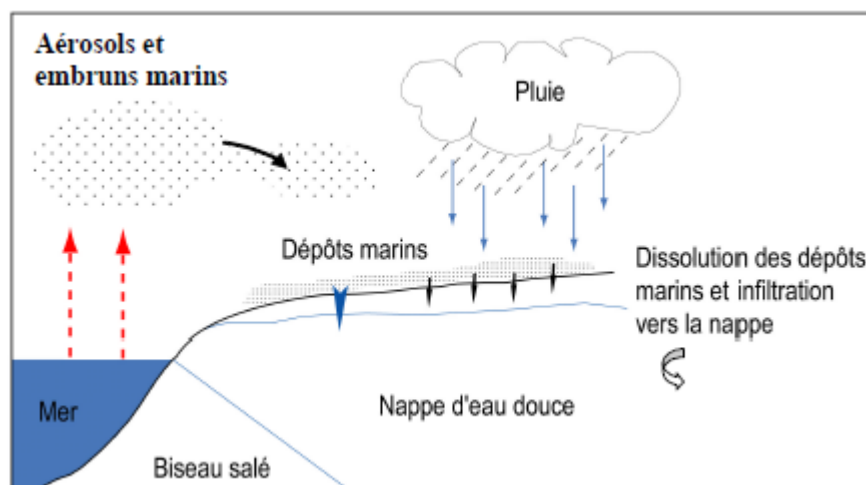
#### 2.1.1. Les embruns marins

Les embruns marins sont des aérosols enlevés par le vent à la crête des vagues. Ils contiennent une forte concentration en sels minéraux, surtout le chlorure de sodium et constituent une source naturelle potentielle de la salinisation des eaux côtières. Ces embruns chargés en cristaux de NaCl, vont se déposer sur les sols. Pendant la période pluvieuse où l'on observe une recharge efficace de la nappe, les eaux infiltrées vont lessiver les cristaux de sels et les entraîner jusqu'à la nappe; ce qui engendre une salinisation de celle-ci (Haddani, 2010).

Dans le domaine « marin » la salinité résulte de la présence d'aérosols marins dans les précipitations, après évaporation partielle et vont s'infiltrer dans les aquifères. La salinité peut être associée également à une intrusion directe de l'eau de mer qui n'est pourtant pas limitée au littoral. En effet, des transgressions marines ont pu engendrer, dans le passé, à l'échelle des temps géologiques, des infiltrations d'eau de mer bien au-delà de la ligne de cote actuelle. Les eaux marines des sédiments marins peuvent également être préservées au sein même de ces sédiments. L'évaporation de saumures sédimentaires, dites « primaires » et peut conduire au dépôt de roches évaporitiques. Ces dernières, lorsqu'elles sont traversées par des eaux souterraines ou de surfaces peuvent se dissoudre donnant des saumures mélangées aux eaux souterraines et suffisent pour induire une salinisation des nappes pouvant impacter et compromettre certains usages.

L'invasion des eaux douces par les eaux salées aura pour effet une dégradation des sols et une salinisation par suite des irrigations avec ces eaux (Boutkhil, 2007).

Dans le cas d'un simple mélange eau douce-eau de mer, l'analyse des teneurs de  $\text{Cl}^-$  et du rapport ionique  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$  permet de montrer la contribution de l'eau de mer à la salinisation de la nappe côtière. Le plus souvent, l'analyse des autres éléments (sodium, calcium...) met en évidence l'influence de processus complémentaires jouant sur la chimie des eaux: échanges nappe-encaissant, interaction eau-roche (échange de cations monovalents contre bivalents), réduction des sulfates, ou précipitation de calcite/dolomite (Vallet-Coulomb et al. 2009).



**Figure 2.** Dissolution des sels marins issus des aérosols et embruns marins (Hsissou, 1999).



### **2.1.2. Le biseau d'eau salée**

Généralement, le long des côtes se développent des plaines à remplissage alluvionnaire, caractérisées par des réservoirs aquifères dont les niveaux piézométriques sont très proches d'un sol fertile (Oulaaross, 2009).

L'équilibre hydrodynamique des systèmes aquifères dans les zones côtières est le plus précaire. Leur mise en exploitation présente des aspects spécifiques liés en particuliers aux relations qui s'établissent entre l'eau douce et l'eau marine. Lorsqu'une pollution de l'eau douce par une eau salée a lieu, il est en général difficile d'en faire disparaître les effets (Khammari et De Marsily, 1994; Marjoua et al., 1997).

Il est alors préférable d'essayer de prévoir les risques d'intrusion marine, ce qui nous place directement devant un double problème complexe, associant la notion de quantité à celle de qualité.

D'autant plus que dans ces zones côtières (arides et semi-arides), la demande en eau est en général forte pour l'alimentation quotidienne des populations rurales et pour l'irrigation.

Les investissements réalisés dans les zones côtières agricoles exigent beaucoup d'eau, ce qui pousse les agriculteurs à creuser d'avantage de puits sollicitant des nappes côtières qui ne sont, généralement que des minces lentilles d'eau douce nageant fragilement sur un biseau d'eau salée omniprésent.

En période sèche, les pompages s'intensifient et engendrent un abaissement du niveau de la nappe et une éventuelle intrusion marine. Parallèlement à cette progression du biseau, la zone de mélange « eau douce- eau salée » s'élargit et lorsqu'elle atteint les crépines du pompage, l'eau pompée devient contaminée.

### **2.1.3. Mécanismes de l'intrusion marine**

En l'absence de perturbation (surexploitation par exemple), la pénétration du niveau de la mer à l'intérieur des terres est naturellement régie par une différence de masse volumique entre deux eaux (UNESCO, 1987; Calvache et Polido-Bosch, 1996):

- L'une salée et marine, plus dense et donc plus assujettie aux forces gravitationnelles;

- L'autre plus ou moins « douce » provenant de l'infiltration des précipitations et constituant ainsi une nappe côtière s'écoulant vers la mer.
- L'interface eau douce- eau salée prend une allure hyperbolique, qui limite la partie basale nommée « biseau ». Dans la réalité, on observe une zone de transition dont l'épaisseur ne dépasse guère quelques mètres.

La forme et l'épaisseur de cette interface dépendent de plusieurs facteurs:

- Les variations des niveaux de la nappe et du niveau de la mer;
- La différence de densité entre les deux liquides qui tend à maintenir l'eau salée en profondeur;
- La diffusion moléculaire du sel dans l'eau douce tendant à minimiser les gradients de concentration;
- Le débit de la nappe qui est fonction du régime d'exploitation et d'implantation des différents aménagements hydrauliques et de la recharge de la nappe;
- La porosité et la perméabilité des terrains aquifères littoraux;
- La géométrie de l'aquifère : topographie du substratum imperméable au niveau de l'interface eau douce- eau salée;
- Les pluies susceptibles de recharger une nappe côtière engendrent une augmentation du débit des eaux souterraines et une poussée de l'interface eau douce- eau salée vers la mer voire une expulsion des niveaux salés vers des niveaux plus profonds.
- En présence de pompages intensifs et périodiques et lorsque l'aquifère est hétérogène, ce phénomène va engendrer une propagation des sels marins vers les eaux souterraines et une augmentation de la salinité de ces eaux pompées.

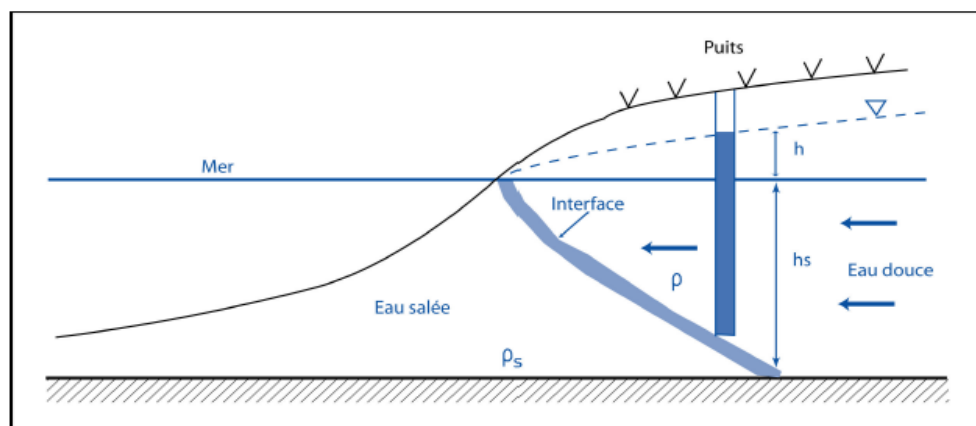


Figure 3. Relation eau douce eau de mer (Custodio, 2002).

## **2.1.4. Facteurs déterminants de l'intrusion marine**

### **2.1.4.1. Effet de l'exploitation**

Toute exploitation intense de la nappe côtière par creusements anarchiques des puits va entraîner un déséquilibre hydrodynamique de l'interface « eau douce – eau salée marine ». Cela se traduit par une diminution des débits souterrains et un abaissement du niveau de la nappe. Celui-ci va devenir inférieur à celui de la mer, ce qui va provoquer un écoulement des eaux marines vers l'aquifère côtier.

Ainsi, l'aspect lié à l'exploitation d'un aquifère en zone côtière peuvent être énumérés comme suite (Olive, 1996; Simmers, 1997):

Baisse du niveau de la nappe;

Pénétration du biseau d'eau salée vers les terres;

Salinisation des eaux de la nappe côtière à cause de cette pénétration, principalement dans les deux premiers kilomètres du rivage;

Abandon des puits à cause des fortes salinités des eaux.

### **2.1.4.2. Situation par rapport à la mer**

La distance du point de captage par rapport à la mer joue un rôle déterminant dans l'évolution de la qualité des eaux. En effet, ces eaux accusent une salinité de plus en plus élevée au fur et à mesure que l'on se rapproche du rivage.

### **2.1.4.3. Alimentation de la nappe**

Généralement, les nappes d'eau souterraine côtières sont alimentées principalement par l'infiltration et la percolation efficaces des eaux de pluie. Le taux d'infiltration efficace conditionne l'évolution piézométrique et par conséquent l'évolution de la qualité des eaux souterraines. En effet, une importante infiltration efficace va favoriser une élévation du niveau de la nappe, une augmentation de son débit et un phénomène de dilution de sa salinité. Dans le cas contraire d'une infiltration efficace moindre ou nulle combinée à des pompages intensifs, nous observons un abaissement du niveau de la nappe et une surconcentration saline des eaux souterraines.

#### **2.1.4.4. Hydrogéologie**

La nature lithologique de l'aquifère, sa perméabilité, sa productivité, son épaisseur, la topographie du substratum à proximité de la mer, sont tous des facteurs qui jouent des rôles importants dans les mécanismes de pollution des eaux souterraines. Les débits souterrains faibles et une bonne perméabilité de l'aquifère côtier favorisent des intrusions marines dont l'extension dépend de l'intensité des pompages dans ces endroits vulnérables.

### **2.2. Le domaine continental**

Les eaux, initialement faiblement minéralisées, peuvent par interaction avec les roches du bassin versant et par évaporation successive, devenir salines.

#### **2.2.1. Dissolution des évaporites**

Les évaporites, terme désignant des dépôts riches en chlorures et sulfates alcalins (avec les ions  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^+$ ). La précipitation de ces sels succède à des concentrations par évaporation intense, généralement dans des lagunes peu ou pas reliées à la mer, ou encore dans des lacs salés. Par ordre de cristallisation, on a les principaux minéraux suivants: le gypse, l'anhydrite, le sel gemme (halite), la carnallite et la sylvite. Ils donnent soit des lits continus, soit des masses lenticulaires, soit des cristaux ou des amas isolés au sein d'argiles ; de sables argileux ou de dolomies (Raoult et Foucault, 2005).

Les halogénures comme par exemple l'halite ( $NaCl$ ) et les sulfates, ainsi que le gypse ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) font partie des minéraux salifères les plus souvent impliqués dans les cas de salinisation par une réaction eau-roche. Les réactions de dissolution dépendent des conditions physico-chimiques et thermodynamiques bien particulières (pression, température, constante de solubilité du minéral impliqué, force ionique de la solution...). La dissolution de l'halite se traduit par une augmentation de la concentration en ions Chlore ( $Cl^-$ ) et sodium ( $Na^+$ ), tandis que la dissolution du gypse conduit à une augmentation des ions calcium ( $Ca^{++}$ ) et sulfate ( $SO_4^{--}$ ) (Bourhane, 2010).

Une fois en contact avec l'aquifère, l'eau de la nappe peut s'enrichir d'éléments nouveaux provenant du réservoir géologique. Cette interaction est d'autant plus importante que le temps de résidence est long et les minéraux des roches aquifères sont solubles (Vengosh, 2003).

### **2.2.2. Concentration par évaporation**

L'aridité du climat se manifeste essentiellement par une faible hauteur pluviométrique, combinée à une forte évapotranspiration potentielle ce qui aboutit à l'augmentation de la salinité des eaux.

Les conditions climatiques se manifestent par deux caractéristiques qui s'ajustent parfaitement aux mécanismes de la mobilisation et de l'accumulation des sels

(Hsissou, 1999):

- Un régime irrégulier des précipitations avec une dominance des averses brutales qui sont séparées par des périodes de sécheresse ;
- Une saison sèche prolongée, pendant laquelle la chaleur et l'insolation provoquent une intense évaporation. Sous climat chaud et aride, le sel peut circuler grâce au lessivage des horizons superficiels salés (mobilisation), et de la remontée capillaire (remobilisation et accumulation).

L'effet de la concentration des eaux par évaporation peut être aussi important dans le cas d'une nappe d'eau souterraine proche de la surface. En effet, le climat constitue un facteur déterminant dans les phénomènes de dilution et de surconcentration en sels des eaux souterraines superficielles (Younsi, 2001), et principalement celles dont l'alimentation se fait exclusivement à partir de l'infiltration efficace des eaux pluviales. En effet, pendant les saisons humides où l'on observe une infiltration efficace importante, on note une élévation piézométrique, une augmentation du débit souterrain et une dilution de la charge saline des eaux. Par contre, pendant les saisons sèches caractérisées par une absence d'alimentation de la nappe à laquelle s'ajoute une exploitation de celle-ci, on observe une concentration des eaux en sels.

Les minéraux naturels de la croûte terrestre constituent la source principale de sel dans le sol, et dans l'eau. En effet durant le processus d'altération chimique, qui implique l'hydrolyse, l'hydratation, l'oxydation et carbonatation, les sels sont libérés progressivement avant de subir une solubilisation.

Cependant la minéralisation des eaux dépend de la nature des formations avec lesquelles elles entrent en contact (Gaucher et Bardin, 1974).

La perméabilité des sols joue un rôle important dans la protection des nappes d'eau souterraine sous jacentes. Ils pourraient arrêter et fixer une grande part de la pollution des eaux qui transite par les sols pour percoler vers la nappe.

La dissolution des aérosols et des embruns marins, constitue une source potentielle naturelle de la salinité des eaux souterraines côtières (BRGM, 1996). Ces aérosols et embruns chargés en cristaux de sels, vont se déposer sur les sols. Pendant la période pluvieuse où l'on observe une recharge efficace de la nappe, les eaux infiltrées vont lessiver les cristaux de sels et les entraîner jusqu'à la nappe, ce qui engendre une pollution de celle-ci. Cette pollution est localisée dans les premiers kilomètres du rivage.

Quand les pluies sont faibles (périodes sèches), ne faisant qu'imprégner les couches superficielles sans pouvoir atteindre la nappe, la concentration des sels dissous dans l'eau du sol par évaporation est intense. Il s'ensuit une salinisation progressive des solutions de la zone non saturée et par conséquent celle de la zone saturée lors des périodes d'infiltration.

Les nappes d'eaux souterraines dans les zones côtières circulent à des profondeurs généralement faibles qui ne dépassent pas 15 mètres, et qui diminuent au fur et à mesure qu'on se rapproche de la côte marine. A cela vient s'ajouter les hauteurs pluviométriques accompagnées d'une intense évaporation, tous ces facteurs s'unissent pour augmenter la concentration des sels dans les zones non saturées, qui vont par la suite être lessivées par les eaux de pluie efficace au cours des averses, pour assurer l'alimentation des nappes phréatiques ce qui provoquent une élévation de leur salinité ainsi que leurs minéralisation (Hsissou, 1999).

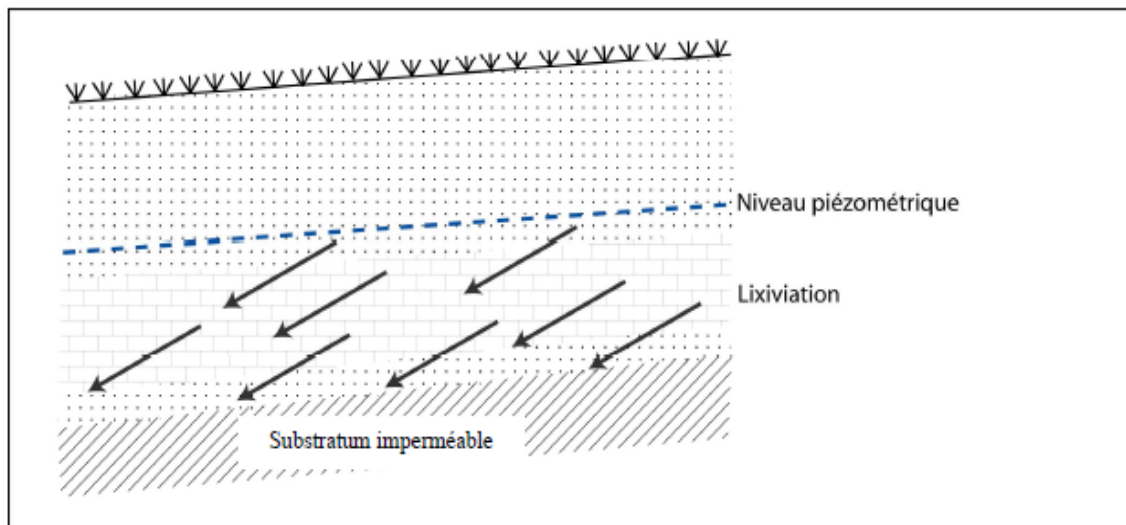
La composition lithologique, la porosité et la perméabilité des terrains aquifères pourraient constituer une autre source de salinité des eaux souterraines ou faire augmenter cette salinité (Oulaaross, 2009).

### **2.2.3. Facteurs déterminants la salinité continentale**

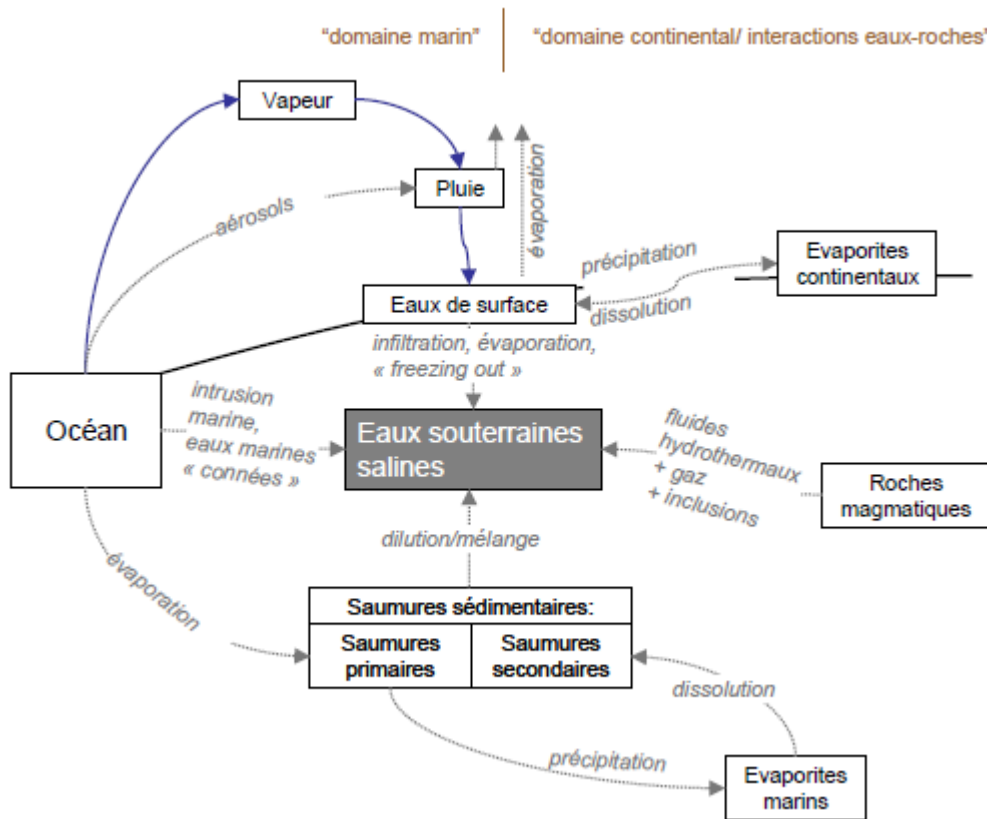
La dissolution de la roche réservoir pourrait constituer une autre source de salinité des eaux souterraines. Elle dépend principalement de la composition lithologique, la porosité et la perméabilité des terrains aquifères (Haddani, 2010).

Plusieurs facteurs jouent un rôle essentiel dans la mise en solution des éléments chimiques et sont étroitement liés à la nature des formations en place (Stumm et Morgan, 1981; Fetter, 1993). Parmi ces facteurs, nous pouvons distinguer :

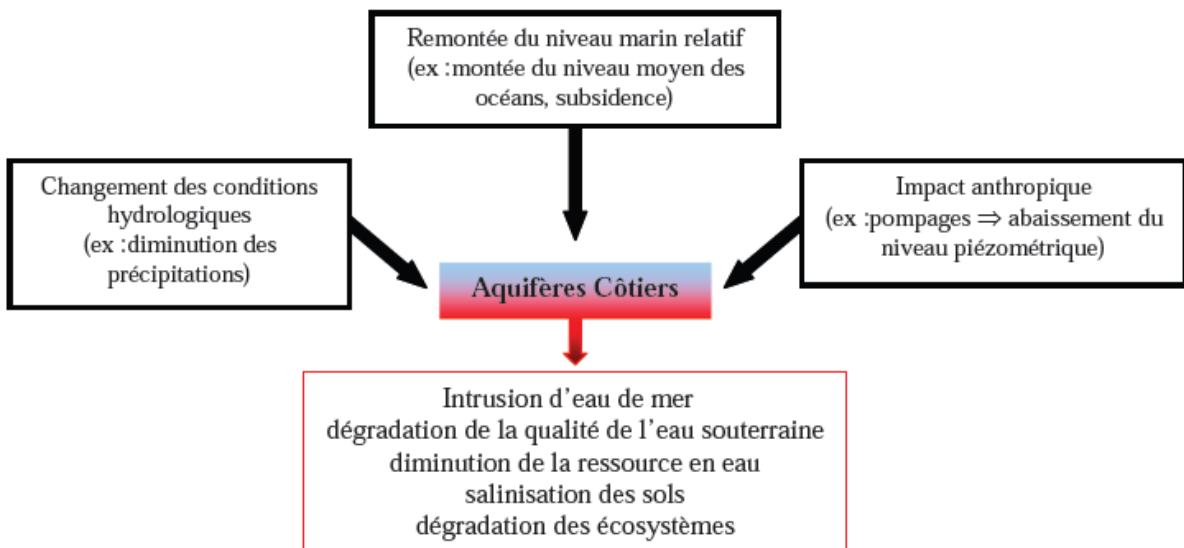
- L'importance de la surface de contact eau-roche et la durée de contact entre l'eau et la matrice de l'aquifère, l'eau est d'autant plus chargée que la surface et la durée sont grandes (forte porosité ouverte);
- Les facteurs physiques telles que la température et la pression influencent de manière significative les échanges eau- roche ;
- La perméabilité ou la vitesse de circulation de l'eau dans le terrain : plus l'eau circule lentement dans une formation, plus sa minéralisation augmente.
- La nature de la roche réservoir et de celle de la zone non saturée. A titre d'exemple, les terrains évaporitiques libèrent par lessivage des teneurs importantes en NaCl, dans les eaux souterraines qui y circulent; dans des formations aquifères calcaires, elles seront très riches en calcium.



**Figure 4.** Source naturelle de salinité des eaux souterraines par lixiviation (Hsissou, 1999).



**Figure 5.** Mécanismes naturels de salinisation des eaux de surfaces et souterraines (Kloppman et al., 2011).



**Figure 6.** Exemple et conséquences des différentes pressions s'exerçant sur un aquifère côtier (Kloppman et al., 2011).



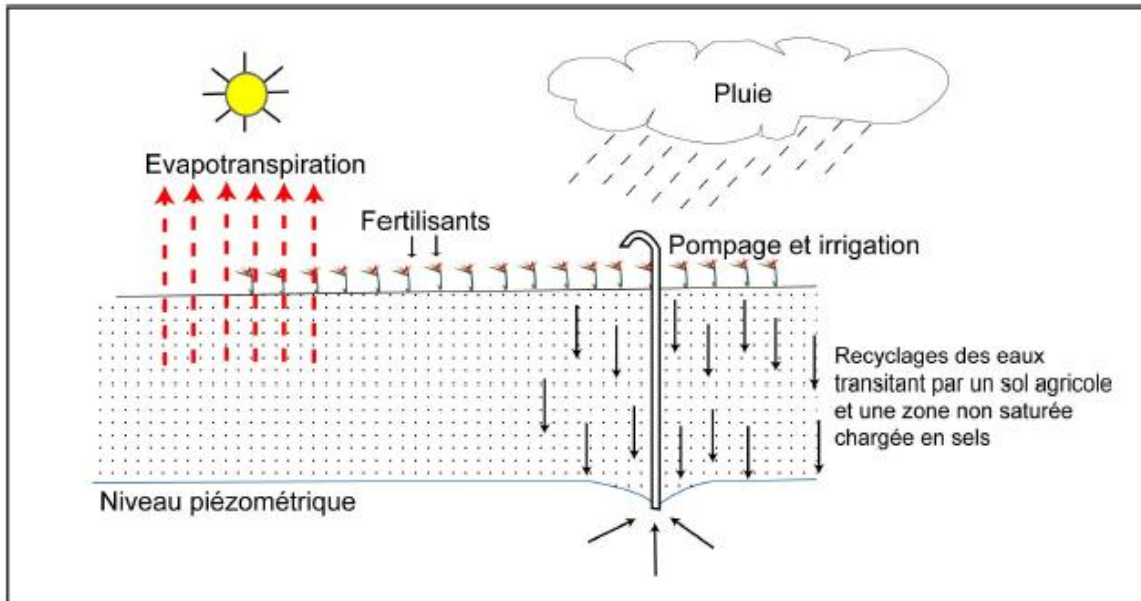
### 2.3. Sources anthropiques des sels

Le facteur anthropique correspond à la surexploitation d'un aquifère. On parle de surexploitation lorsque les prélèvements d'eau excèdent la recharge et conduisent à un abaissement du niveau piézométrique. Durant les 30 à 40 dernières années, le développement socio-économique et agricole des zones littorales a entraîné une forte augmentation des prélèvements d'eau, en particulier dans les régions où des ressources en eau alternatives, comme les eaux de surface, sont insuffisantes (de Montety, 2008).

En zone urbaine, les principales activités impliquées sont l'évacuation des eaux usées industrielles ou domestiques. La salinité des eaux usées provient essentiellement des rejets de détergents, riches en sodium et en bore (Raymond et Butterwick, 1992), de la lessive en poudre et des liquides utilisés dans les lave-vaisselle (riche en chlore). Ces flux salins industriels ou domestiques peuvent affecter la qualité des eaux souterraines, surtout s'ils sont réutilisés sans traitement approprié (difficile pour des éléments comme les chlorures et le bore) pour l'irrigation ou la recharge artificielle des nappes. En zone rurale, l'activité agricole et l'élevage sont les principales sources de salinisation des ressources en eau souterraine. L'usage d'eaux usées ou à forte salinité pour l'irrigation génère un apport d'ions comme les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) ou le sodium ( $\text{Na}^+$ ). L'épandage de fertilisants artificiels et autres engrais d'origine animale entraîne un apport non négligeable en ions potassium ( $\text{K}^+$ ), ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) ou nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) mais aussi de  $\text{Cl}^-$  dans la nappe. D'autres formes d'azote sont apportées comme l'urée ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ), l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), le nitrate d'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) et l'engrais animal (Bolke et Horan, 2000; Bolke, 2002).

L'irrigation avec des eaux riches en sels peut entraîner la fixation de sodium par le complexe adsorbant du sol, donc un processus de salinisation, avec ses conséquences éventuelles pour les propriétés du sol : tendance à la dispersion des argiles, à la dégradation de la structure, à la perte de perméabilité et à l'asphyxie des plantes. L'intensité du processus de salinisation dépend des caractéristiques du sol, de la qualité des eaux utilisées, des conditions de leur emploi et en particulier de l'efficacité du système de drainage (Gouaidia, 2008).

Cependant ces pratiques d'irrigation accroissent le risque de salinisation, au point que plus de 20 % des sols irrigués sont affectés par un problème de salinité en Algérie (Douaoui et Hartani, 2007 ; Bouhlassa et al, 2008; Rouabhia et Djabri, 2010).



**Figure 7.** Sources naturelles et anthropiques de salinité : évaporation et recyclage des eaux d'irrigation (Hsissou, 1999).

#### 2.4. La salinisation des lacs et des zones humides

La salinisation affecte fréquemment les lacs des bassins endoréiques, surtout en zone aride. Deux types de configurations susceptibles d'entraîner une salinisation de ces types de milieu ont été distingués. La première intervient lorsque le volume d'eau perdue par évaporation est supérieur au volume d'eau douce arrivant dans le lac. Cette situation peut être observée notamment en cas de détournement des cours d'eau alimentant le lac, ce qui provoque une diminution des flux entrants et de la recharge. L'autre configuration se manifeste en cas d'apport d'eaux salées. Dans cette situation, l'arrivée de flux salins accentue la salinisation initiée par l'évaporation. Ces flux peuvent avoir une origine naturelle, par des sources à forte salinité ou par les eaux d'irrigation de la plaine agricole (Kolodny et al., 1999; Nishri et al. 1999).

#### Conclusion

Les processus qui augmentent la minéralisation d'une eau ou d'un sol au-delà d'un seuil défini par ses usages sont regroupés sous le terme de salinisation, il désigne l'ensemble des mécanismes physique ou chimiques comme l'évaporation, la dissolution de minéraux, l'interaction avec l'eau de mer. Cette désignation de la qualité de l'eau peut rendre cette ressource impropre à la consommation humaine, à l'usage industriels et affecter l'agriculture excédent la tolérance aux sels des plantes cultivées.

## CHAPITRE II. CARACTERISTIQUES DU PAYSAGE

Le lac Fetzara, initialement une zone humide naturelle, a été envisagée d'assécher depuis l'année 1844 dans le cadre de la lutte contre le paludisme. La première tentative achevée en 1880 creuserait un canal de 16 kilomètres d'Est en Ouest. Entre 1906 et 1934 sont creusés les canaux de l'oued Mellah, de l'oued Ziyed et de l'oued El-Hout, à partir de cette époque, le lac a gardé sa physionomie actuelle.

Les premiers projets de mise en valeur ne visaient qu'à un reboisement en eucalyptus dans les années 1875, 1888-1891 et 1949. Malgré des échecs répétés, une nouvelle tentative est faite en 1954, pour fournir de l'ombrage aux pâturages.

S'inspirant des marais Pontins (France), on a installé en 1940, des parcelles de 100 hectares, attribuées à des anciens élèves d'une école d'agriculture; malgré l'assistance technique et financière de l'État, l'échec fut complet (Trvers, 1958).

Une autre tentative en 1999-2000 par la CGA (générale des concessions agricoles) pour la création de trois périmètres agricoles, n'a pas donné des résultats escomptés (sols inondés durant toute la période hivernale).

Depuis l'année 2003, le lac Fetzara a été inclut dans la liste des zones humides d'importance internationales liste conformément à l'article 2. 1 de la convention RAMSAR.

### 1. Situation géographique

Le Lac Fetzara est situé à 18 Km au Sud-Ouest de Annaba et à 14 Km de la mer. Il est représenté par une large dépression dont les dimensions sont approximativement de 17 km d'Ouest en Est et 13 Km du Nord au Sud. La superficie du lac Fetzara est d'environ 18600 ha, la partie inondable du lac est située au centre de la zone et couvre une superficie estimée à 13000 ha (Djamai et al., 2011). Il est limité au Nord par le massif de l'Edough, au Sud par les monts d'Ain Berda et les cordons dunaires situés à l'Est et à l'Ouest (Habes et al., 2011).

Le lac Fetzara se situe dans la wilaya d'Annaba, Daïra et commune de Berrahal. A la périphérie du lac existent plusieurs agglomérations: au Nord, le chef lieu de la commune de Berrahal, au Sud les territoires des communes d'El Eulma (oued El-Hout) et de Cheurfa et, à l'Est, les petits villages d'El Gantra et de oued Ziyed (GHI, 2009).

### Coordonnées géographiques

- **Latitude:** 36° 43' et 36° 50' N
- **Longitude:** 7°24' et 7°39' E
- **Altitude:** Mini: 10.25 m, Maxi: 40 m Moyenne: 25.35 m
- **Superficie:** 20.680 hectares

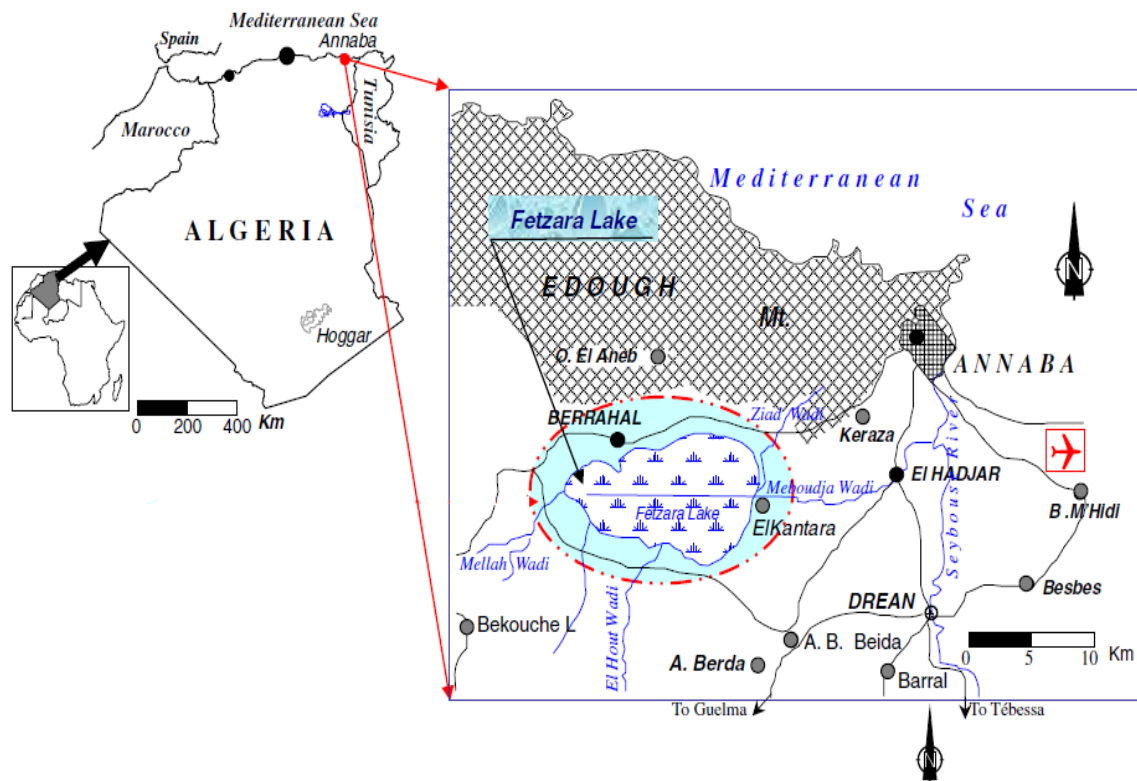


Figure 8. Situation géographique du lac Fetzara (Rouabhia et al., 2010).

## 2. Description du lac

Le réseau d'assainissement est composé de trois niveaux

- Les trois oueds (Ziyed, El-Hout et Mellah) constituent les axes principaux de drainage naturel des excédents d'eau et jouent le rôle d'émissaires naturels de colature des fossés principaux.
- Les fossés principaux collectent les eaux des fossés secondaires.
- Les fossés secondaires qui longent les parcelles et se jettent dans les fossés principaux

L'état général des fossés est alarmant étant donné qu'ils sont complètement envahis par les roseaux et la végétation de toute nature.



**Figure 9.** Les fossés (GHI, 2009)

Le lac est drainé par un canal de 14 Km de long, qui la traverse d'Ouest en Est. Ce canal a été réalisé entre la période de 1943 à 1947.

L'observation sur le terrain montre une dégradation importante de se talus



**Figure 10.** Canal principal (GHI, 2009).

Actuellement, la capacité d'évacuation du pont vanne ne peut dépasser les  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , selon les observations effectuées.



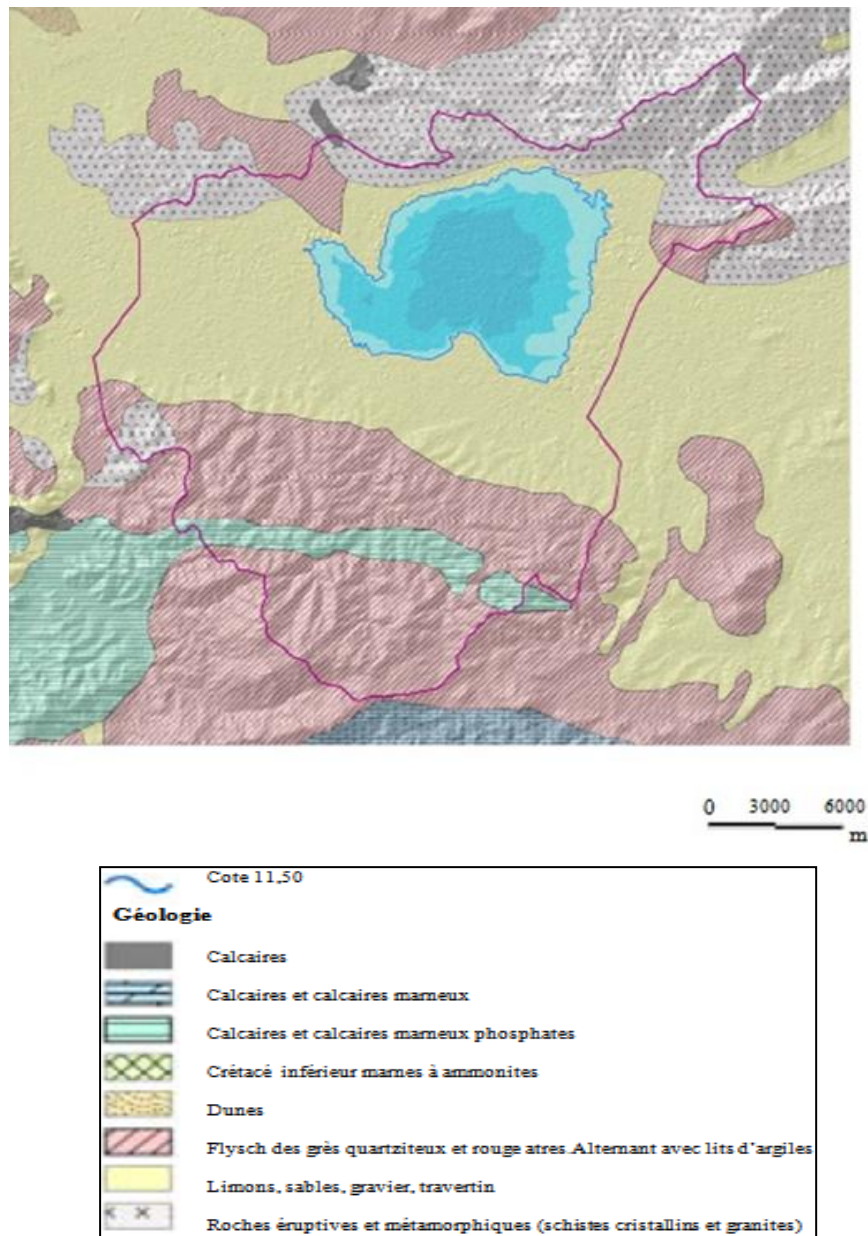
**Figure 11.** Pont-vanne (GHI, 2009).

### 3. Géologie

C'est une vaste dépression de 186 00 ha environ dont le fond est formé par une vase riche en matières organiques.

Les formations géologiques de la zone étudiée comportent (GHI, 2009):

- Des alluvions récentes du quaternaire constituées de limons, sable, gravier et travertin qui occupent la plaine alluviale.
- Des affleurements de flysch de grés de Numidie (quartzeux et rougeâtres), alternant avec des lits d'argile formant les reliefs des massifs du Nord-Ouest et du Sud de la zone, datés de l'Eocène supérieur associés à des affleurements de marne à ammonites pyriteuses du Crétacé inférieur ainsi que du calcaire du Trias.
- Des roches éruptives et métamorphiques (schistes cristallins et granites) du trias, formant les massifs du Nord de la zone.
- Quelques affleurements de calcaire et calcaire marneux phosphatés de l'Eocène moyen et inférieur



**Figure 12.** Géologie du bassin versant du lac Fetzara (GHI, 2009).

#### 4. Pédologie

Les sols de la région du lac Fetzara ont suscité l'intérêt de plusieurs organismes de développement à savoir; la société de conseil italien Ifagraria (1967), l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (A.N.R.H., 1980), l'Agence Japonaise de Coopération Internationale (A.J.C.I., 1985) et le Bureau National d'Etude pour le Développement Rural (B.N.E.D.R., 1997 et 1999), ces derniers ont dressé des cartes pédologiques qui constituent toujours une base d'information de la plupart des études pédologiques dans la région.

Les différents types de sol de la région de notre étude sont:

#### **4.1. Les sols peu évolués: (SPE)**

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

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

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

- Les sols peu évolués non climatiques, d'apport alluvial, ils sont caractérisés par un niveau hydromorphe, d'une texture fine, d'une faible perméabilité et d'une rétention en eau élevée.
- Les sols peu évolués non climatique, d'apport alluvial, non calcaire, ce sont des sols plus fertiles, caractérisés par une bonne perméabilité et d'une texture moyenne.
- Les sols peu évolués non climatiques, d'apport alluvial, peu calcaire, ces derniers sont fertiles et conviennent à une large gamme de cultures. Ils sont caractérisés par une texture et un taux de matière organique moyen. La perméabilité est modérée pour cette classe. Ces sols sont formés par les effets colluviaux et alluviaux. La texture est grossière à moyennement grossière. Certains sols sont calcaires et d'autres ne le sont pas. Dans les terrasses basses, assez forte hydromorphie dans les couches inférieures.
- Les sols peu évolués non climatiques, d'apport colluvial non calcaire. Ces sols colluviaux sont les plus répandus dans la classe. Ils sont caractérisés par les faibles teneurs en humus dans la couche supérieure. Généralement, sableux et de très bonne perméabilité avec une nappe basse.
- Les sols peu évolués non climatiques, d'apport colluvial, avec des colluvions fines non calcaires. Ces sols sont semblables aux sols précédents. Mais, ils sont moyennement grossiers et ont une forte hydromorphie.



#### **4.2. Les vertisols (SV)**

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

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

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

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

#### **4.3. Les sols hydromorphes (SH)**

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

Deux sous classes caractérisent ce type de sols:

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

#### **4.4. Les sols halomorphes (SHA)**

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

On a plusieurs types de sols halomorphes:

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

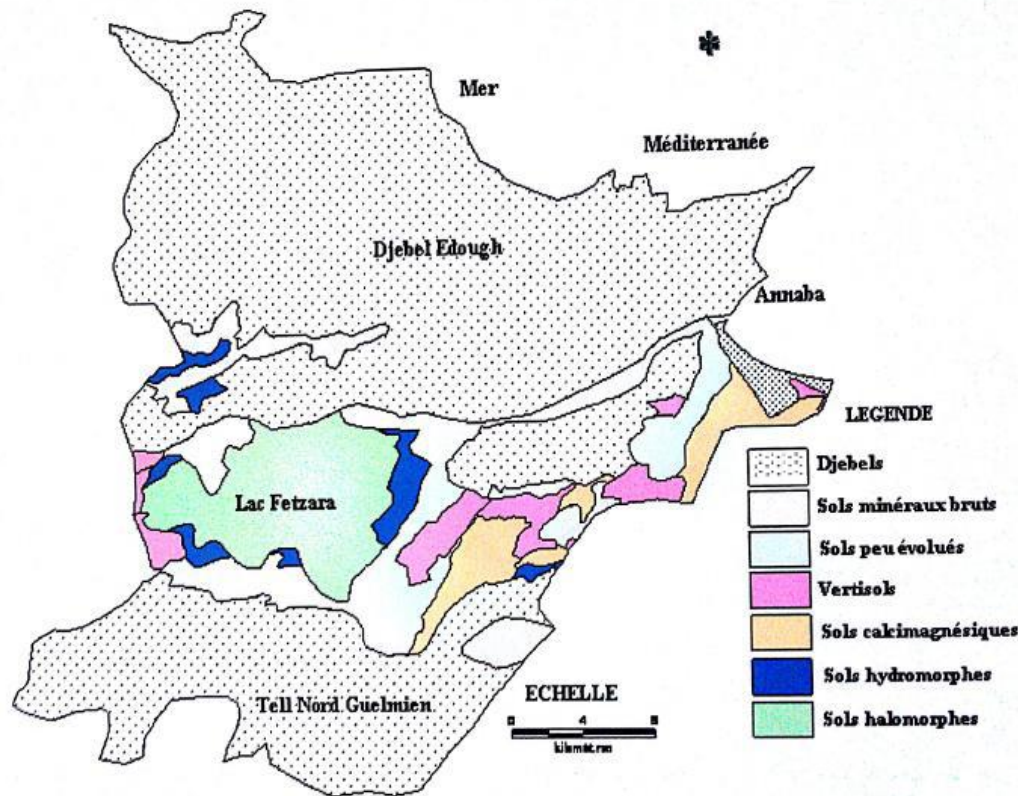


Figure 13. Carte pédologique de la région de Annaba (in Zenati, 2010)

#### 4.5. Utilisation agricole des sols

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

Dans la zone située à l'Est du lac Fetzara, s'étendant jusqu'à la route Annaba- Guelma, les terres cultivées, si elles ne sont pas lissées en jachère, alternent principalement entre la céréaliculture en sec (blé tendre, orge) et la tomate industrielle. On peut rencontrer le tabac et un maraîchage sur des superficies réduites (poivron, choux, choux- fleurs, laitue et parfois oignon).

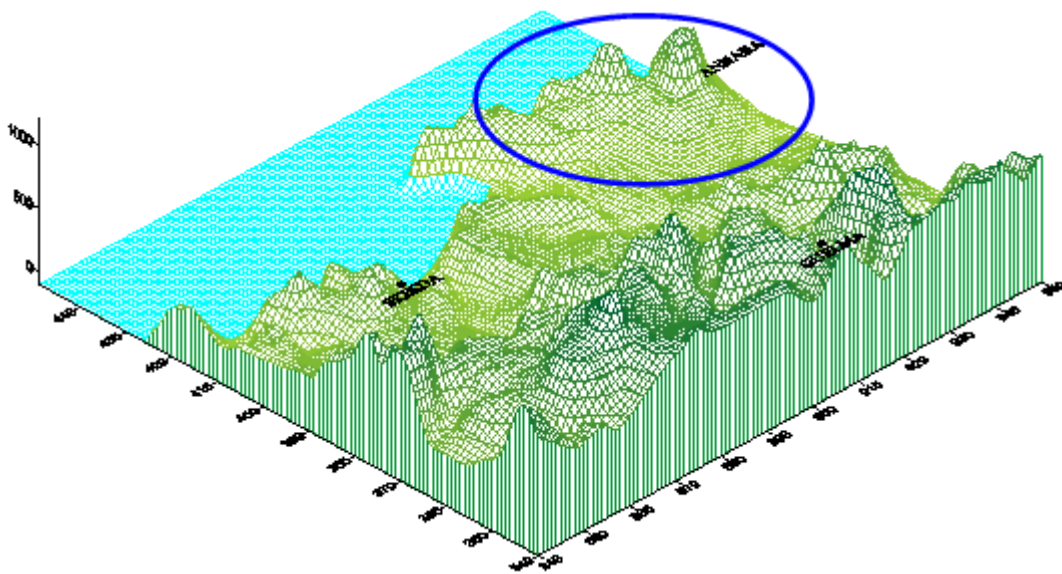
Au Nord du lac Fetzara (zones d'oued Ziyed et Kali Toussa), zones généralement inondées pendant l'hiver, ces terres sont lissées comme pâturage, toutefois dans certaines parcelles on y cultive du maraîchage à cycle court: courgettes, cucurbitacées, tomates, haricots....

Au Sud et à l'Ouest du lac de Fetzara, les terres sont cultivées en céréales ou fourrages en sec, alors qu'autour des quelques points d'eau (puits et retenues) sont cultivées la tomate industrielle et la pastèque.

L'élevage se concentre principalement dans la périphérie du lac Fetzara, où peuvent côtoyer à la fois le mode traditionnel (un à quelques bovidés, des brebis, chèvres, et de la volaille); un élevage intensif plus modernisé, utilisant des structures grandes et consolidées, dans lesquelles, l'élevage reçoit une alimentation d'engraissement (étables pour vaches laitières, bergères batteries pour poules de chair ou de ponte et pour dindes).

## 5. Géomorphologie

L'aire d'étude correspond à la partie occidentale de la plaine d'Annaba qui s'organise en arc de cercle autour du massif de l'Edough.



**Figure 14.** Modèle numérique de terrain de la région d'étude (GHI, 2009)

### 5.1. Les montagnes

Qui constituent en majorité les limites de la plaine étudiée, sauf dans la partie Ouest où on rencontre du sable dunaire ancien. Leur altitude ne dépasse pas les 400 mètres. Elles possèdent des pentes raides entaillées par des talwegs creusés par l'érosion torrentielle.

### 5.2. Les collines

S'étendent au pied des montagnes et constituent une transition entre elles et les premières pentes ou glacis qui se prolongent vers la plaine alluviale de Fetzara.

### 5.3. Les glacis

Ce sont généralement des glacis de collines à pente variable. En l'absence des collines, ces glacis s'appuient directement sur les montagnes. Ils constituent un raccord entre montagnes, collines et les différentes zones alluviales.

Entre ces massifs, la dépression se présente comme une vaste cuvette de remblaiement alluvial très plate et très basse (altitude de 20 à 30 m au Sud et de 10-15 m au Nord).

## 6. Hydrologie et Hydrogéologie

### 6.1. Hydrologie

Les ressources en eau en Algérie proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. Il est à noter que ces ressources sont très variables notamment celles qui proviennent des nappes tributaires des aléas climatiques. L'exploitation de ces ressources est très intense avec les besoins grandissants. Les bassins versants sont regroupés en trois zones (ANRH, 1993):

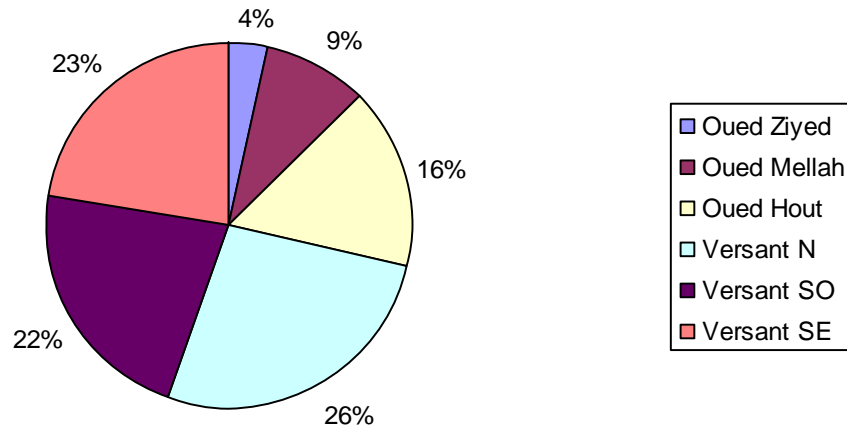
- Les bassins tributaires de la Méditerranée situés au Nord de l'Algérie ont un apport moyen annuel estimé à 11 milliards de m<sup>3</sup>. L'utilisation de l'eau est liée aux activités économiques.
- Les bassins endoréiques occupant les hautes plaines dont les eaux se perdent en grande partie par évaporation dans les chotts. L'écoulement annuel moyen est estimé à 700 hm<sup>3</sup>.
- Les bassins sahariens apportent en moyenne 650 hm<sup>3</sup> par an. L'écart pluviométrique moyen montre un déficit accentué d'Est en Ouest. L'Est algérien est la partie la plus humide avec une moyenne pluviométrique de 530 mm par an. Le Centre occupe la seconde place avec 480 mm. Enfin, l'Ouest est plus sec avec une moyenne annuelle de 260 (Alili, 1993).

D'après AJCI (1985) le Bassin versant du lac Fetzara est de 515 km<sup>2</sup>. Les eaux sont collectées des oueds Ziyed, El-Hout et Mellah, des ruisseaux, des eaux écoulant directement à la surface des pentes de la périphérie du lac, et des pluies.

L'oued Ziyed se situe au Nord-Est du lac, avec un bassin versant de 19 km<sup>2</sup>.

L'oued El-Hout est considéré comme étant le plus grand cours d'eau du Sud-Est, son bassin versant est de 81 km<sup>2</sup>.

L'oued Mellah se situe à l'Ouest du lac Fetzara, son bassin versant est de 47 km<sup>2</sup>. Représentant tous les trois 29% de la superficie totale du bassin versant et faisant partie du réseau hydrographique endoréique.



**Figure 15.** Distribution de la superficie du bassin versant du lac Fetzara

**Tableau 1.** Superficie du bassin versant du lac Fetzara (Données en km<sup>2</sup>, AJCI 1985).

Oueds principaux	Superficie
Oued Ziyêd	19
Oued Mellah	47
Oued El-Hout	81
Ruisseaux et autres petits bassins	Superficie
Versant Nord	138
Versant Sud-Ouest	114
Versant Sud-Est	116
<b>Total</b>	<b>515</b>

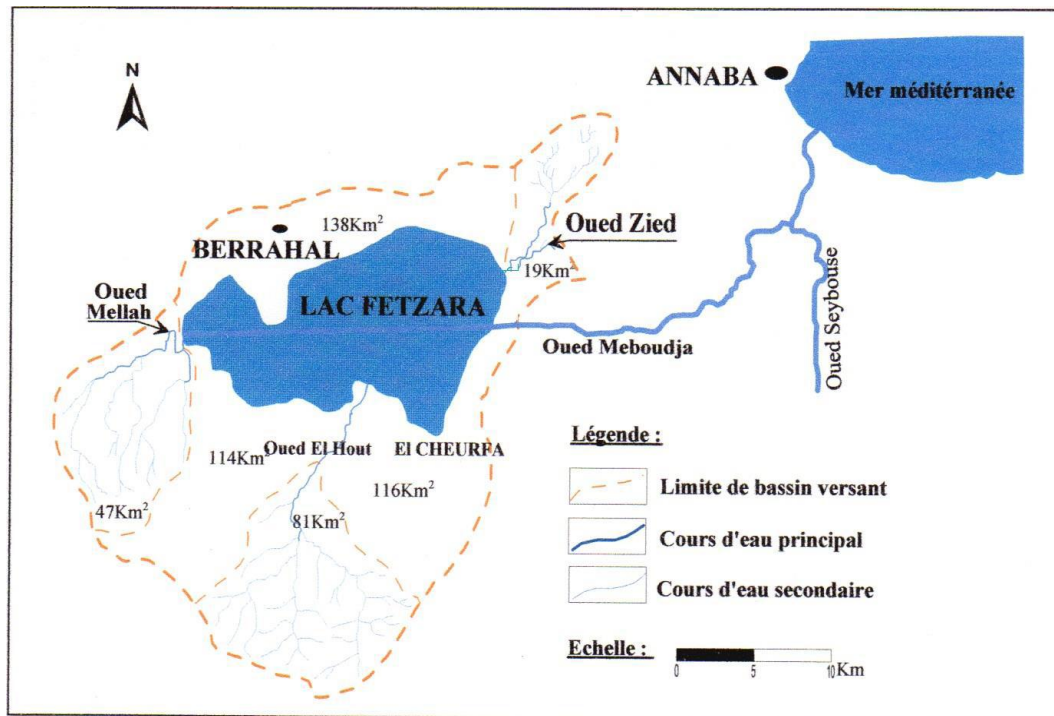


Figure 16. Les principaux sous bassins versant du lac Fetzara (in Zenati, 1999)



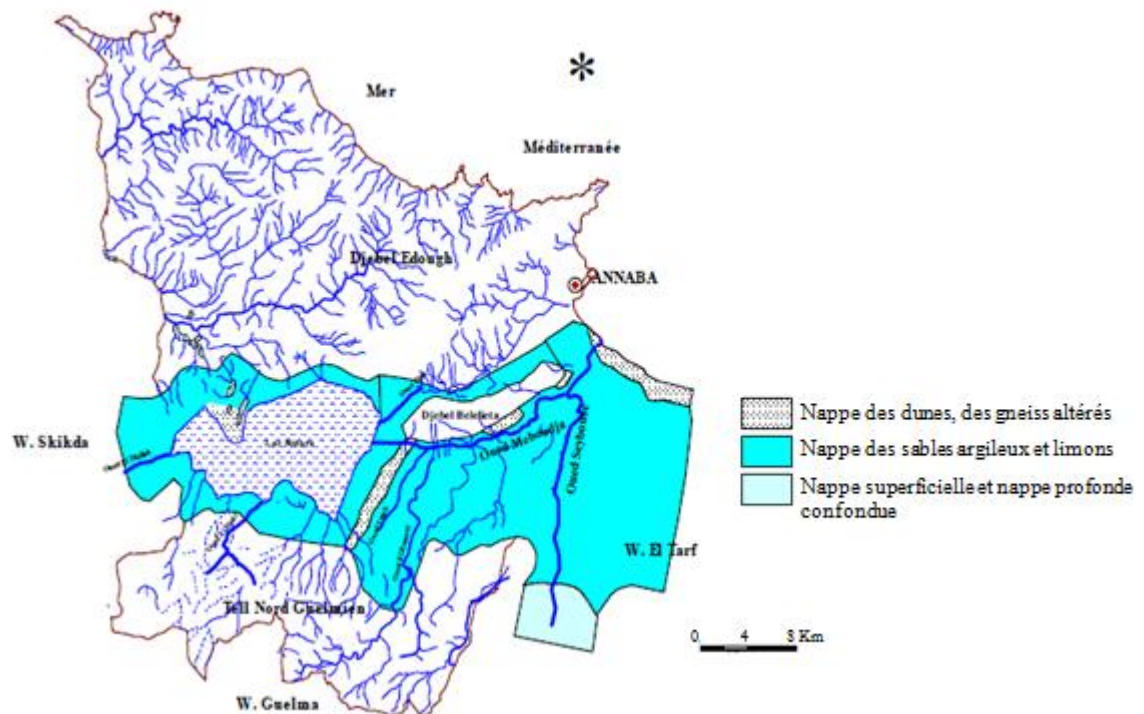
Figure 17. Bassin versant du lac Fetzara (GHI, 2009).

## 6.2. Hydrogéologie

Du point de vue hydrogéologique, le lac Fetzara occupe la région Ouest de la plaine d'Annaba, il est entouré par une nappe superficielle discontinue. La lithologie de cette nappe est constituée par des alluvions (sables, limons et argiles) avec une texture argilo-sableuse à argilo-limoneuse, son épaisseur varie entre 2 et 10 m, donc à potentialité hydrauliques très limitées. Cette nappe est exploitée par un nombre important de puits destinés à l'irrigation, l'industrie et l'élevage (Zahi et al., 2013).

Les études faites (Rouabhia et al., 2007; Zenati, 1999 et 2010) dans les environs du lac montrent deux directions principales du flux souterrain. D'un côté, le lac est alimenté par l'aquifère. D'autre part, il y a aussi une alimentation de l'aquifère à partir des eaux de l'oued Meboudja, dans le secteur Nord-Est du lac.

Les interprétations piézométriques montrent une très forte interaction entre l'oued, le lac et les systèmes aquifères. Les études ont démontré aussi que les extractions d'eau dans les puits ont provoqué des changements dans la direction de circulation de l'eau souterraine. En plus, la recharge provenant des précipitations a descendu aussi pendant les dernières années. Ces facteurs ont provoqué une augmentation de la salinité de l'eau souterraine.



**Figure 18.** Nappes entourant le Lac Fetzara (in Zenati, 1999).



### **6.3. Ressources en eaux**

#### **6.3.1. Ressources en eaux superficielles**

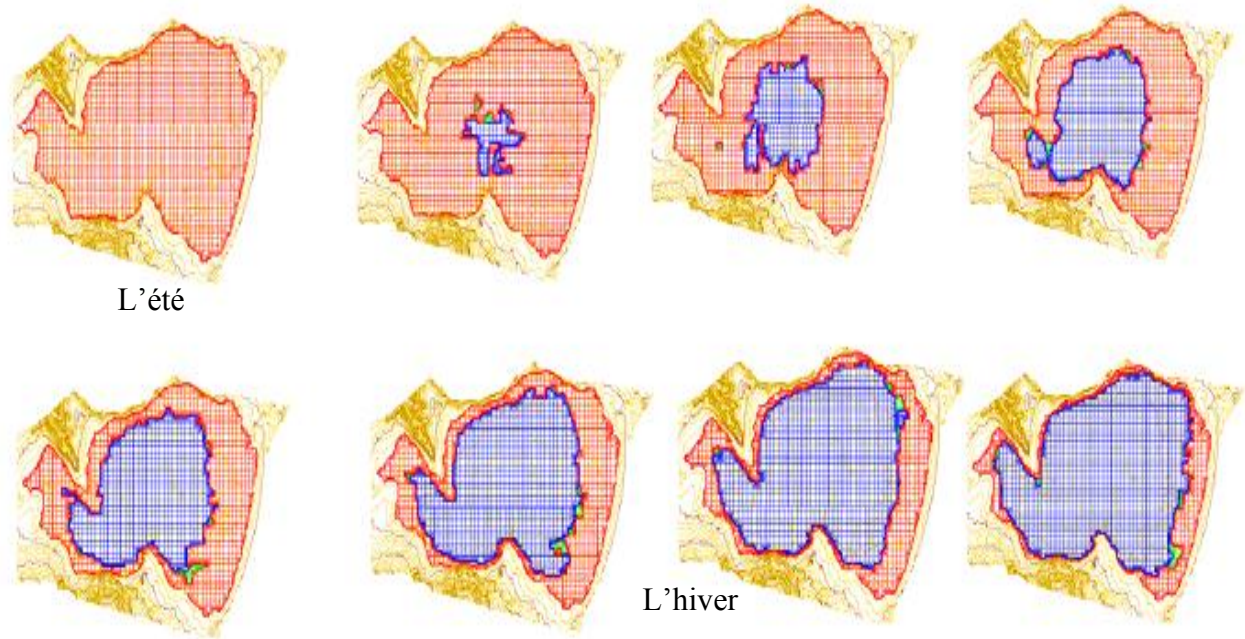
Les eaux du lac proviennent de trois (03) oueds (Ziyed, El-Hout et Mellah), des ruisseaux, des eaux coulant sur la surface des pentes de la périphérie du lac et de pluie tombant directement sur le lac, En ce qui concerne le drainage du lac, il est effectué tout au long de l'année par un canal d'assèchement artificiel vers l'oued Meboudja un affluent du Seybouse.

Le sous bassin oued Seybouse maritime, du bassin du Seybouse, drainant 1066 km<sup>2</sup>; les cours d'eau et oued Mellah vers l'Est de la zone, parcourent des plaines ondulées et leurs eaux sont utilisées en irrigation des cultures.

Les plaines basses de texture fine à drainage mauvais sont facilement inondables pendant la période des pluies. Les diverses terrasses alluviales et les dunes qui bordent le lac Fetzara renferment une nappe phréatique assez peu profonde. La durée d'inondation du lac est fonction de la pluviométrie de l'année.

Durant la saison pluvieuse, l'eau remonte jusqu'à la côte de 12 mètres environ. Cet aspect temporaire, la succession de périodes d'assèchement et de mise en eau rendent le lac particulièrement intéressant, au vu de la minéralisation renouvelée à chaque saison, ce qui prolifère un milieu favorable pour l'alimentation des oiseaux hivernants et notamment les Anatidés de surface et les foulques.

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



**Figure 19.** Courbes de remplissage du lac (GHI, 2009).

### 6.3.2. Ressources en eaux souterraines

Les diverses dépressions de la zone d'étude sont constituées par un remplissage alluvionnaire hétérogène et devraient contenir de grands volumes d'eau, même si l'on ne peut pas parler de nappes uniques.

Les cordons dunaires absorbent de grandes quantités d'eau qui, sont en bonne partie rendues dans les zones de contact avec les formations alluviales des différentes dépressions des zones marécageuses.

La puissance et l'extension de toutes ces ressources ne sont pas connues avec certitude.

## 7. Etude climatique

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

Pour étudier le climat de la région du lac Fetzara, nous avons choisi les données disponibles sur la station météorologique de Annaba (Aéroport-Les Salines), qui peut être

considérée comme étant la station la plus proche de la zone d'étude. La station Aéroport-Les Salines de Annaba se situe à environ 25 km à vol d'oiseau du lac Fetzara, et c'est en même temps, celle qui dispose de données les plus complètes et surtout les plus régulières. Les données climatiques prises en considération pour l'étude du climat de la zone du projet portent sur 29 ans et concernent les moyennes mensuelles de la période 1982-2011.

**Tableau 2.** Données climatiques moyennes mensuelles de la région du lac Fetzara (Annaba-Les Salines : 1982-2011)

Paramètres	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Température °C	10.99	11.27	13.12	15.27	18.30	22.04	25.29	25.83	23.06	20.02	15.61	13.15
Pluviométrie en mm	108.37	75.01	66.43	56.47	38.55	13.26	2.60	9.69	42.40	62.21	88.64	122.66
Humidité en %	79.3	76.5	75	74.2	74.7	73.1	70.2	71.8	72.3	74.8	76.2	77.5
Evaporation en mm	61.9	66.9	88	87.3	103.9	130.4	153.9	154.3	127.9	99.8	79.7	66
Vents m/s	3.6	3.8	4.1	3.8	3.8	3.5	4	4.3	3.9	4.1	4	3.8

### 7.1. Le régime pluviométrique

La région est soumise à des conditions climatiques marquées par de forts contrastes saisonniers et des irrégularités très nettes des précipitations. La répartition des précipitations moyennes mensuelles sur une période de 29 ans a permis d'identifier une saison pluvieuse allant de d'octobre à mai et une saison sèche allant de juin à septembre. Le mois le plus pluvieux correspond au mois de décembre avec une moyenne mensuelle de 122.664 mm. Le mois le plus sec est le mois de juillet avec une moyenne de 2.609 mm.

### 7.2. Le régime thermique

La température est indicatrice du pouvoir évaporant de l'air et est un facteur déterminant dans l'évaluation du bilan hydrique. Les contrastes de température sont importants avec des variations à la fois saisonnières et annuelles. La région d'Annaba connaît un climat thermique de type méditerranéen assez chaud. Juillet et aout sont les mois les plus chauds, avec une moyenne de 25.563°C. Le mois le plus froid est celui de janvier (10.991°C).

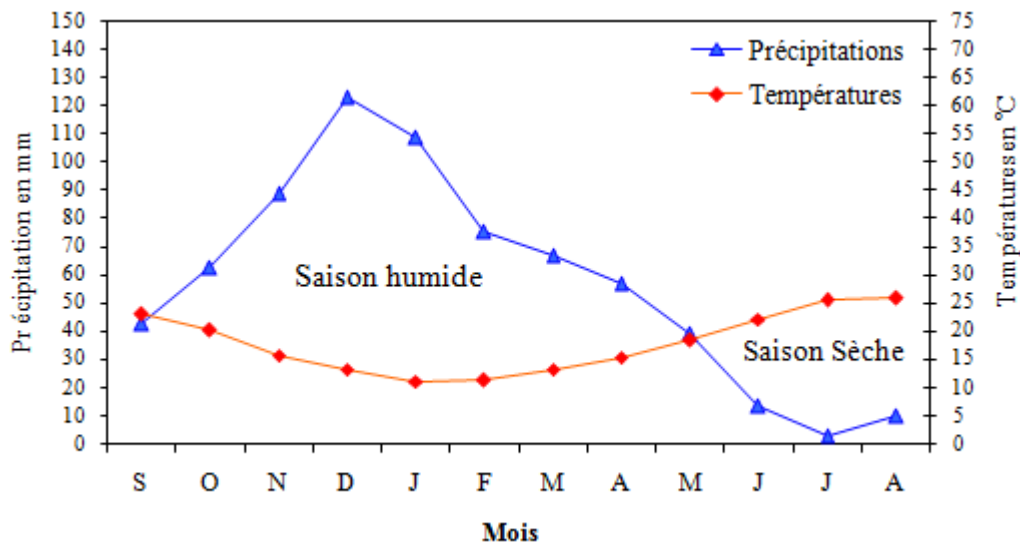


Figure 20. Courbes pluviothermiques: station des Salines.

### 7.3. L'humidité

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

On a pu remarquer que l'humidité maximale à la station des Salines est de l'ordre de 77.5 % au mois de décembre, par contre l'humidité minimale est de 70.2 % au mois de juillet, avec une moyenne annuelle de l'ordre de 74.65 %.

### 7.4. Le vent

Le vent est l'un des éléments les plus déterminants des régimes pluviaux de l'évapotranspiration et par conséquent le climat de la région.

Il y a trois types de vent dans cette région (B.N.E.D.R, 1997):

- **Les vents dominants**

Dans ce cas, pendant la période sèche d'avril à septembre, et pendant les périodes de transitions, les vents du Nord et du Nord-Est sont dominants, et quand en période pluvieuse d'octobre à mars, les vents d'Ouest et de Nord-Ouest sont dominants. Les vents du Nord et du Nord-Est d'été sont généralement doux, et ceux d'Ouest et de Nord-Ouest d'hiver sont généralement forts.

- **Le sirocco**

Il s'agit d'un vent sec et poussiéreux, provenant du Sahara vers le Nord, particulier à la région.

- **Les vents violents**

Localisés avec nuages orageux et tonnerre, qui apparaissent en période de transition des saisons sèches et pluvieuses (avril, mai et septembre).

Nous remarquons que les vents dominant sont de direction Nord et Nord-Ouest, les vitesses moyennes varient entre 3 et 3.8 m/s. Les vitesses les plus élevées sont enregistrées aux mois d'octobre, mois de mars et au mois d'août avec des vitesses oscillant entre 4.1 et 4.3 m/s, par contre le mois de juin reste le mois venteux avec 3.5 m/s. par contre la période allant du mois d'août au mois d'octobre, se caractérise par des vitesses atteignant 3.6 à 3.8 m/s.

### **7.5. L'évaporation**

L'évaporation mensuelle varie au cours de l'année, la maximale est enregistrée en juillet et aout (153.9 mm et 154.3 mm) et la minimale en janvier (61.9 mm). L'évaporation totale moyenne annuelle est très importante, elle est 1220 mm/an. Nous remarquons un déficit hydrique très important (Evaporation > Précipitation) de mars à novembre.

### **7.6. Le bilan hydrique**

Pour estimer le bilan hydrique la méthode de Thornthwaite et Mather (1957) est la plus appliquée. Le bilan de Thornthwaite permet d'estimer pour chaque moi:

L'évapotranspiration potentielle (ETP en mm).

L'évapotranspiration réelle (ETR en mm).

La réserve facilement utilisable (RFU en mm).

Ce terme présente la quantité d'eau disponible dans le niveau superficiel du sol.

L'excédent d'écoulement (Exc en mm) dans le cas ou:

ETP=ETR, la RFU est à son maximum (100 mm).

L'excédent appelé également pluie efficace et le reste des eaux de pluie constituent l'écoulement et l'infiltration. Déficit Agricole (DA en mm), il résulte de la différence entre l'ETP et l'ETR. Il représente la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux cultures pour que la sécheresse ne l'atteigne pas.

Si  $P > ETP$ , alors:  $ETR = ETP$

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

Si  $P < ETP$ : On évapore toute la pluie et on prend à la RFU (jusqu'à la vider) l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETR soit:

- $ETR = P + \min(RFU, ETP - P)$
- $RFU = 0$  ou  $RFU + P - ETP$
- Si  $RFU = 0$ , la quantité ( $DA = ETP - ETR$ ) représente le déficit agricole, c'est-à-dire sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.

### 7.6.1. L'évapotranspiration

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

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

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

On distingue :

L'évapotranspiration potentielle (ETP).

L'évapotranspiration réelle (ETR).

- **L'évapotranspiration potentielle (ETP)**

On appelle évapotranspiration potentielle (ETP), exprimée en hauteur de lame ou tranche d'eau évaporée, la somme des 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, on utilise la formule de Thornthwaite.

- **Formule de Thornthwaite**

Thornthwaite (1957) a établi une correction entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle, il définit d'abord un indice thermique mensuel (i), où :

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

Où

$$I = \sum_1^{12} i \Rightarrow i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.5}$$

$$a = \left(\frac{1.6}{100}\right) I + 0.5$$

Avec:

ETP: évapotranspiration potentielle en mm.

T: Température moyenne mensuelle (1981-2011) en °C.

i: Indice thermique mensuel.

I: Indice thermique annuel.

K: Coefficient d'ajustement mensuel.

- **L'évapotranspiration réelle (ETR)**

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

Pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) par la méthode de Thornthwaite est liée au volume de précipitation. Trois cas peuvent se présenter :

- 1er cas:  $P \geq ETP \Rightarrow ETR = ETP$ .

Il y a reconstitution des réserves du sol jusqu'à saturation, le surplus, représentera l'écoulement superficiel.

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

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

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

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

Nous avons estimé les valeurs de la RFU selon la formule de Hallaire (1958) qui s'écrit de la manière suivante:

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

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

C: Capacité au champ.

f: Capacité au point de flétrissement.

H: profondeur du sol en (mm).

D: densité apparente,  $D = 1$ .

Les valeurs de  $C-f$  donnée par Hallaire (1958) selon la nature du sol sont:

- $C-f = 5\%$  pour un sol sableux.
- $C-f = 10\%$  à  $15\%$  limoneux.
- $C-f = 20\%$  pour un sol argilo-sableux.

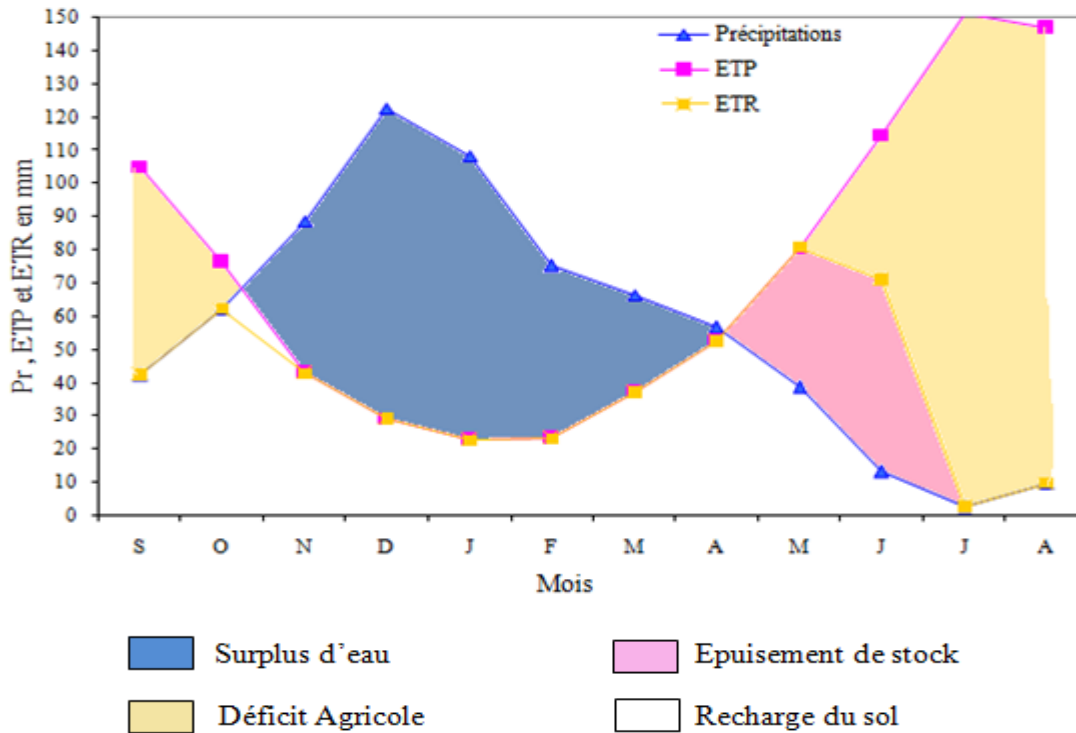
Les valeurs de l'ETP, estimées à partir des mesures climatologiques, sont généralement supérieures à la hauteur de la lame d'eau précipitée sauf pour les mois de novembre à mars. La valeur moyenne annuelle est de l'ordre de 881.4 mm.

La réserve facilement utilisable (RFU) du sol correspond à la quantité d'eau par unité de surface que le sol peut utiliser dans le cas où la lame d'eau précipitée n'est pas suffisante pour satisfaire l'ETP. Cette réserve est supposée nulle au mois de juillet à octobre qui correspond à la période où la réserve en eau du sol est en générale épuisée.

**Tableau 3.** Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite de la station Les Salines (1982/2011)

	T°C	ETP	Pr	BH	RUF	ETR	Def	Exc
<b>S</b>	23	105.1	42.403	-62.7	0,0	42.4	62.7	0.0
<b>O</b>	20	76.4	62.212	-14.1	0,0	62.2	14.1	0.0
<b>N</b>	15.6	42.7	88.645	46.0	46.0	42.7	0.0	0.0
<b>D</b>	13.2	29.3	122.66	93.4	100.0	29.3	0.0	39.4
<b>J</b>	11	22.5	108.38	85.8	100.0	22.5	0.0	85.8
<b>F</b>	11.3	23.1	75.01	51.9	100.0	23.1	0.0	51.9
<b>M</b>	13.1	37.1	66.438	29.4	100.0	37.1	0.0	29.4
<b>A</b>	15.3	52.5	56.477	4.0	100.0	52.5	0.0	4.0
<b>M</b>	18.3	80.8	38.55	-42.2	57.8	80.8	0.0	0.0
<b>J</b>	22	114.6	13.267	-101.4	0.0	71.1	43.6	0.0
<b>J</b>	25.3	150.9	2.609	-148.3	0.0	2.6	148.3	0.0
<b>A</b>	25.8	146.6	9.69	-136.9	0.0	9.7	136.9	0.0
<b>Annuel</b>	<b>17.8</b>	<b>881.4</b>	<b>686.3</b>	<b>-195.1</b>		<b>475.8</b>	<b>405.6</b>	<b>210.5</b>





**Figure 21.** Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite (Station les Salines 1982-2011).

### 7.6.2. L'interprétation du bilan hydrique

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

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

La figure 21 présente le graphisme du bilan d'eau (Thornthwaite) qui illustre les résultats du tableau N° 3 de la station les Salines.

Le bilan d'eau établi par la formule de Thornthwaite montre que l'ETP atteint son maximum au mois de juillet (150.9 mm) et son minimum au mois de janvier (22.5 mm).

La reconstitution de la RFU s'effectue au mois de novembre (46 mm) et atteint son maximum (100 mm) à partir du mois de décembre jusqu'au mois d'avril, à partir duquel on assiste à un épuisement du stock.

L'écoulement commence après le remplissage de la RFU (100 mm) c'est-à-dire au mois de décembre et se termine en avril, avec un maximum au mois de janvier (85.8 mm) et un minimum au mois d'avril (4 mm).

L'excédent égal à (210.5 mm) représentant 30.67 % des précipitations annuelles, alors que l'ETR est de l'ordre de (475.8 mm) représentant 69.32 % des précipitations annuelles. Le déficit agricole DA débute au mois de juin et se poursuit jusqu'au mois d'octobre.

### 7.7. L'indice d'aridité de de Martonne (1926)

Il est également calculé à partir des moyennes des précipitations et des températures. Il est possible de déterminer un indice annuel « A » ou des indices mensuels pour les périodes en comptes « a »:

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

P: total des précipitations annuelles (mm).

T: températures moyennes annuelles (°C)

$$a = \frac{12 \cdot P}{t + 10}$$

P: total des précipitations annuelles (mm).

t: températures moyennes mensuelles (°C).

Les valeurs sont d'autant plus faibles que le climat est aride. Un indice supérieur à 20 indique un climat humide. La tendance à la sécheresse s'affirme entre 10 et 20; en dessous de 10, c'est l'aridité. Pour la région de Annaba, l'indice d'aridité annuel (A) de de Martonne est de 24.687, ce qui correspond à un climat suffisamment humide. Concernant les indices d'aridité mensuels (a), la tendance à la sécheresse s'étale de mai à septembre, avec des indices variant entre 1 et 16. L'aridité concerne surtout les mois de juin, juillet et aout.

**Tableau 4.** Indices d'aridité de de Martonne (1926)  
de la station de Annaba (1981-2011)

	T°C	Pr	a
S	23	42.403	15.419
O	20	62.212	24.884
N	15.6	88.645	41.552
D	13.2	122.66	63.444
J	11	108.38	61.931
F	11.3	75.01	42.259
M	13.1	66.438	34.513
A	15.3	56.477	26.787
M	18.3	38.55	16.346
J	22	13.267	4.975
J	25.3	2.609	0.886
A	25.8	9.69	3.248
Annuel	17.8	686.3	24.687

### Conclusion

La description des formations géologiques à l'affleurement a montré la présence de deux types de formations:

- Les formations métamorphiques présentent essentiellement au niveau du massif de l'Edough et ses environs, constituants ainsi la limite nord du lac,
- Les formations sédimentaires occupant le reste de la zone d'étude.

La région du lac Fetzara est constituée de quatre types de sol, à savoir:

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

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

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

L'analyse des données climatiques d'une série d'observation de 29 ans a permis d'attribuer à la région d'étude un climat méditerranéen avec deux périodes bien distinctes:

- Une période chaude et sèche.

- Une période froide et humide.

La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de (686.3 mm).

L'estimation du bilan d'eau par la méthode de Thornthwaite a montré que, à partir du mois de novembre, l'apport considérable des pluies, la chute de température et la diminution de l'évapotranspiration permettent la recharge du sol mais un déficit agricole enregistré à partir du mois de juin jusqu'au mois de septembre (période correspondant à l'épuisement du stock).

## CHAPITRE III. MATERIEL ET METHODES

Pour cette étude, l'échantillonnage des eaux a été fait de manière à couvrir toute la zone afin d'avoir une bonne idée sur la qualité physico-chimique des eaux.

Lors du prélèvement, les paramètres physiques de l'eau [température ( $T^{\circ}$ ), potentiel d'hydrogène (pH), conductivité électrique (CE), le potentiel redox (Eh)] ont été mesurés in situ. L'analyse chimique des échantillons, réalisée au laboratoire, concerne les ions majeurs ( $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^{+}$ ,  $K^{+}$ ,  $Cl^{-}$ ,  $HCO_3^{-}$ ,  $SO_4^{-}$ ,  $CO_3^{-}$ ) et l'élément mineur ( $Br^{-}$ ).

Plusieurs techniques d'études et méthodes de présentation ont été mises en œuvre pour synthétiser les données physico-chimiques et les interpréter:

- Les diagrammes décrivant la composition chimique des eaux parmi les quels le diagramme de Piper qui permet de déterminer la typologie des faciès chimiques et leurs évolutions et le diagramme de Durov qui permet en même temps de définir les faciès et les processus géochimiques responsables, le logiciel Rockworks15 a été utilisé pour traiter l'ensemble des données.

Les diagrammes binaires associés aux rapports caractéristiques qui permettent d'établir les corrélations et d'estimer la prépondérance d'un processus par rapport à un autre.

- Les indices de saturation qui permettent d'évaluer la saturation de l'eau vis-à-vis des différents minéraux.
- Les analyses factorielles avec en particulier les ACP (Analyse en Composantes Principales), qui permettent d'observer les relations entre les différentes variables et échantillons.

### 1. Echantillonnage et analyse

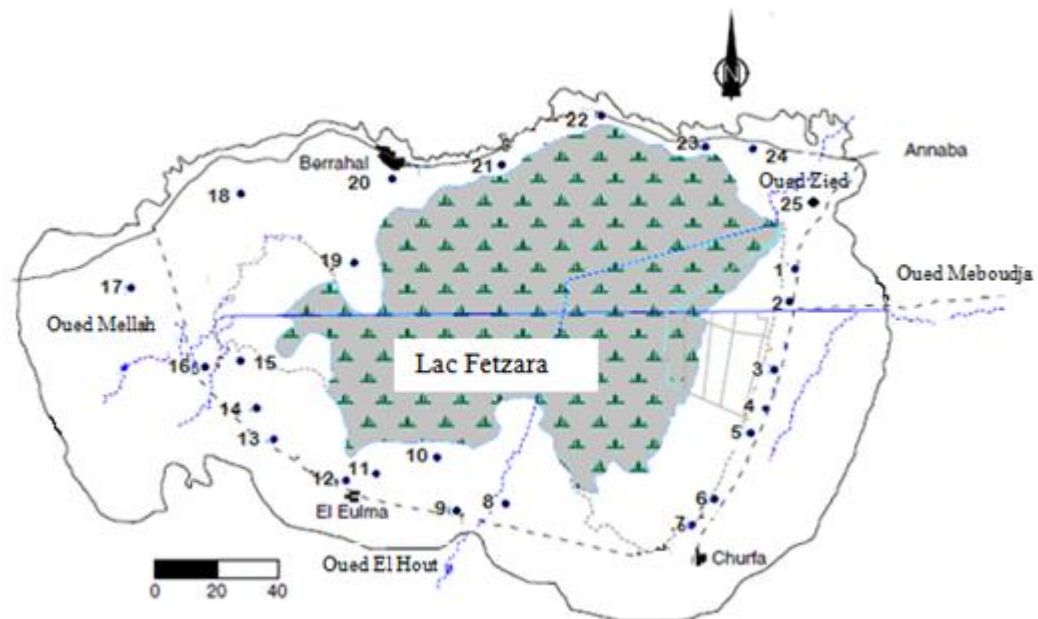
Dans le cadre de ce travail, trois campagnes de mesures et de prélèvements d'échantillons pendant l'année 2011 ont été successivement effectuées en janvier, mai et octobre qui correspondent respectivement, la période hivernale, fin de la saison pluvieuse (période juste après hivernage) et fin de la période sèche (figure 22).

- Première campagne: effectuée en janvier 2011 et a porté sur 25 points d'échantillonnage, période hivernale qui coïncide avec la période de recharge des aquifères et les cours d'eaux.

- Deuxième campagne: effectuée en mai 2011 avec 25 points d'échantillonnages.
- Troisième campagne: réalisée en octobre 2011 avec 19 points d'échantillonnage (5 points sont secs).

Les mesures de la conductivité électrique (CE), de la température (T°C), le potentiel d'hydrogène (pH), et potentiel d'oxydoréduction (Eh) ont été réalisées sur le terrain.

Les éléments majeures ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{--}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) et mineur ( $\text{Br}^-$ ) ont été analysés après filtration au laboratoire selon les techniques standards (Rodier et al., 2009). Le dosage du Chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) a été effectué par titrimétrie (méthode de Mohr). Les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) et carbonates ( $\text{CO}_3^{--}$ ) ont été dosés par titrimétrie par l'acide sulfurique, tandis que le sodium ( $\text{Na}^+$ ) et le potassium ( $\text{K}^+$ ) par spectrophotométrie de flamme, le calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ) et le magnésium ( $\text{Mg}^{++}$ ) par complexométrie, les sulfates ( $\text{SO}_4^{--}$ ) par gravimétrie au  $\text{BaCl}_2$  et les bromures ( $\text{Br}^-$ ) ont dosés par spectrophotométrie.



**Figure 22.** Localisation des points d'eau dans le bassin versant du lac Fetzara (Rouabhia et al., 2010).

## 2. Méthodes d'étude

### 2.1. Traitement statistique

La représentation graphique des éléments chimiques et l'étude des rapports caractéristiques ont montré qu'un grand nombre de paramètres chimiques et physico-chimiques étaient significatifs, pris individuellement. Pour expliquer l'évolution du

chimisme, la plupart du temps une/ou plusieurs liaisons plus ou moins fortes entre ces paramètres. Il est donc apparu intéressant d'essayer de traiter les données statistiquement, en utilisant une méthode d'analyse en multidimensionnelle comme l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

L'ACP est une méthode statistique essentiellement descriptive dont l'objet est de présenter sous une forme graphique, le maximum d'information contenu dans un tableau de données. Chaque échantillon d'eau d'une campagne de prélèvement constitue une unité statistique, les différents paramètres soumis à l'analyse constituent les variables qui caractérisent ces unités statistiques. Chacune des trois campagnes analysées a donc été traitée statistiquement grâce à l'utilisation du logiciel Xlstat Version 2013.

L'utilisation de l'analyse en composantes principales (ACP) pour l'étude globale des eaux permet une différenciation sur leurs particularités chimiques, une détermination de leurs variations d'ensemble (facteurs) suivant les axes principaux et surtout une caractérisation des différents pôles d'acquisition de la minéralisation (Ndembo Longoj, 2009).

L'intérêt de cette technique réside sur le fait qu'elle permet de réduire à quelques plans factoriels la majeure partie de la variance exprimée par les descripteurs. Le premier axe F1 est celui qui exprime le plus fort pourcentage de la variance totale. Le second axe F2, indépendant du premier, est celui qui exprime la plus grande partie de la variance résiduelle et ainsi de suite (Mudry et Blavoux, 1986).

## **2.2. Diagrammes interprétatifs**

L'interprétation des éléments majeurs en termes de faciès chimique s'avère précieuse quand il s'agit de distinguer des groupes d'eau de chimisme et de minéralisation (salinité) différents au sein d'un aquifère. On peut également identifier des relations entre ces familles notamment en cas de mélange entre des eaux douces et salines, l'outil le plus fréquemment utilisé est le diagramme de Piper, basé sur les concentrations équivalentes (en meq/l) et relatives par rapport à la somme des cations voire anions. Il comporte deux diagrammes triangulaires pour les cations et anions ainsi qu'un losange qui combine la somme des cations monovalents ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ), celle des cations bivalents ( $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ ), et les bicarbonates plus carbonates ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--}$ ) et ( $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{--} + \text{NO}_3^+$ ). C'est le losange qui est utilisé pour différencier les faciès hydrochimiques rencontrés.

**Tableau 5.** Faciès hydrochimiques et contextes géologiques (Banton et Bangoy, 1999)

<b>Faciès hydrochimique</b>	<b>Environnement géologique et géochimique</b>
Bicarbonaté-calcique et/ou magnésien	Faciès fréquents dans les eaux douces continentales et dans les environnements calcaires. La présence de formations dolomitiques est à l'origine de la tendance magnésienne.
Bicarbonaté-sodique et/ou potassique	Faciès fréquents dans les environnements riches en formations volcaniques. Un faciès bicarbonaté sodique se trouve aussi dans certains aquifères des bassins sédimentaires et témoigne d'interactions eau-roche (échange $\text{Ca}^{++}$ contre $\text{Na}^+$ sur des argiles).
Sulfatée	Faciès fréquents dans les environnements riches en minéraux évaporitiques (gypse [ $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ]) ou minéraux sulfurés (pyrite [ $\text{FeS}_2$ ]).
Chloruré-sodique	Faciès fréquents dans les milieux riches en évaporites (exemple: halite [ $\text{NaCl}$ ]). Faciès rencontrés également dans les secteurs pétrolifères et certaines zones d'activités volcaniques. L'eau de mer et les eaux salines issues des intrusions marines sont de faciès $\text{Na}^+\text{-Mg}^{++}\text{-Cl}^-$ mais peuvent évoluer dans les aquifères côtiers, vers un faciès alcalino-terreux chloruré par échange cationique.
Chloruré-calcique	Faciès rencontrés dans des milieux riches en minéraux argileux contaminés par une solution saline de type $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ (dissolution d'halite ou intrusion marine). Les interactions eau-roche se manifestent alors par des échanges cationiques entre ions bivalents ( $\text{Ca}^{++}$ et $\text{Mg}^{++}$ relâchés dans la solution) et monovalents ( $\text{Na}^+$ et $\text{K}^+$ adsorbés sur les argiles). Des saumures profondes de type $\text{Ca}^{++}\text{-Na}^+\text{-Cl}^-$ sont présents dans la plupart des boucliers cristallins du monde (Canada, Scandinavie, Russie...) et leur origine a été discutée dans la littérature (Leybourne et Goodfellow, 2007).

### 2.3. Indice de saturation (IS)

L'équilibre des eaux avec la matrice est souvent exprimé soit par l'indice de saturation [ $\text{IS}=\log(\text{PAI}/\text{Ks})$ ], où PAI est le produit d'activité des ions concernés et Ks le produit de solubilité du minérale considéré (Bouhlassa et al, 2008).

Le degré de saturation, de sous-saturation ou l'état d'équilibre d'une solution vis-à-vis d'un minéral n'est apprécié que si l'on peut comparer le produit de solubilité au produit d'activité ionique des ions de référence dans la solution (Droubi, 1976; Droubi et al, 1978).

Un indice de saturation nul signifie que l'eau est en équilibre avec le minéral étudié. L'eau sera sous saturée si  $\text{IS}<0$  (dissolution du minéral) et sursaturée si  $\text{IS}>0$  (précipitation du minéral) (Peter-Borie et al, 2009).



Le calcul de l'indice de saturation IS des minéraux dissous dans l'eau a été mené en utilisant le logiciel « Diagramme ».

## **2.4. Les relations ions-chlore**

L'établissement de diagrammes binaires consiste à représenter sur un graphique l'évolution d'un élément ou d'un rapport ionique en fonction d'un autre élément souvent supposé conservatif.

Ces genres de diagrammes permettent de visualiser l'évolution des teneurs en cations et anions majeurs en fonction des teneurs en chlore considéré comme élément conservatif. Les axes du graphique représentent les teneurs élémentaires souvent exprimées en mg/l). Cette approche permet d'illustrer plusieurs phénomènes géochimiques. Les cations et les anions majeurs reflètent alors les interactions des eaux salines avec leur encaissant (échanges ioniques, dissolution, précipitation). Les valeurs (points) en dehors d'une relation linéaire simple (dilution, évaporation sans précipitation de minéraux, mélange binaire...) peuvent attester de divers processus telles que la réduction bactérienne des sulfates et la précipitation de calcite ou calcite magnésienne (Vallet-Coulomb et al, 2009).

### **2.4.1. La relation sodium-chlore**

Ce type de diagramme représente l'évolution du sodium ( $\text{Na}^+$ ) en fonction du chlore ( $\text{Cl}^-$ ). Une relation linéaire peut mettre en évidence un mélange simple entre deux eaux de concentrations en  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  très différentes comme par exemple le mélange d'une eau douce et d'une eau de mer. Les points du graphique s'alignent alors sur une droite de mélange simple entre les deux pôles identifiés (pôle nappe et pôle mer). L'analyse du diagramme (teneurs molaires) permet de distinguer plusieurs configurations et d'émettre diverses hypothèses concernant l'origine de la salinité.

Dans le cas d'une dissolution d'halite ( $\text{NaCl}$ ), les points du graphique s'alignent sur une droite de pente égale à l'unité = 1.

Dans une eau de mer ou une nappe fortement contaminée par une intrusion marine, les points s'alignent sur une droite de pente égale à 0.86.

Dans le cas d'un mélange simple entre deux eaux, les points s'alignent sur la droite de mélange entre les deux pôles.

Un appauvrissement en sodium se traduit par des valeurs en-dessous de la droite de mélange et peut attester des interactions eau-roche de type échanges cationiques ( $\text{Na}^+$  contre  $\text{Ca}^{++}$ ).

#### 2.4.2. La relation brome-chlore

Cette représentation est très utilisée pour discriminer l'origine de la salinité, notamment pour déceler une contamination marine (l'eau de mer étant caractérisée par un rapport molaire  $\text{Br}^-/\text{Cl}^- = 1.5 \times 10^{-3}$ ).

La distinction des différents mécanismes de la salinisation permet de reconstituer l'origine des eaux souterraines, leurs cheminements et d'imaginer leurs futures évolutions. Parmi les critères géochimiques qui peuvent aider à identifier l'intrusion de l'eau de mer par opposition à d'autres sources de salinité en zones côtières, on utilise notamment le rapport ionique  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$ .

Les bromures et chlorures ont un comportement similaire et conservatif lors de la dilution d'eaux salines avec des eaux douces. Le rapport  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$  du pôle salin est donc conservé sur une large gamme de concentration avant de tendre vers celui des eaux douces diluant. Des interactions eau-roche n'affectent pas le rapport des deux éléments contrairement à la plupart des autres ions. Les rapports  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$  et les diagrammes binaires  $\text{Br}^-$  en fonction du  $\text{Cl}^-$  ou  $\text{Br}^-/\text{Cl}^- = f(\text{Cl}^-)$  ont été largement utilisées (Davis et al, 1998; Hsissou et al, 1999; Freeman, 2007).

Le diagramme  $\text{Br}^-$  en fonction de  $\text{Cl}^-$  indique qu'il existe trois groupes d'eaux des ions halogènes ( $\text{Br}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ) dans les eaux:

- **Rapport  $(\text{Br}^-/\text{Cl}^-) = (\text{Br}^-/\text{Cl}^-)_{\text{mer}}$**

Deux hypothèses pourront être avancées:

- Lessivage des aérosols et embruns marins apportés par les vents et les pluies.
- Intrusion marine.

- **Rapport  $(\text{Br}^-/\text{Cl}^-) > (\text{Br}^-/\text{Cl}^-)_{\text{mer}}$**

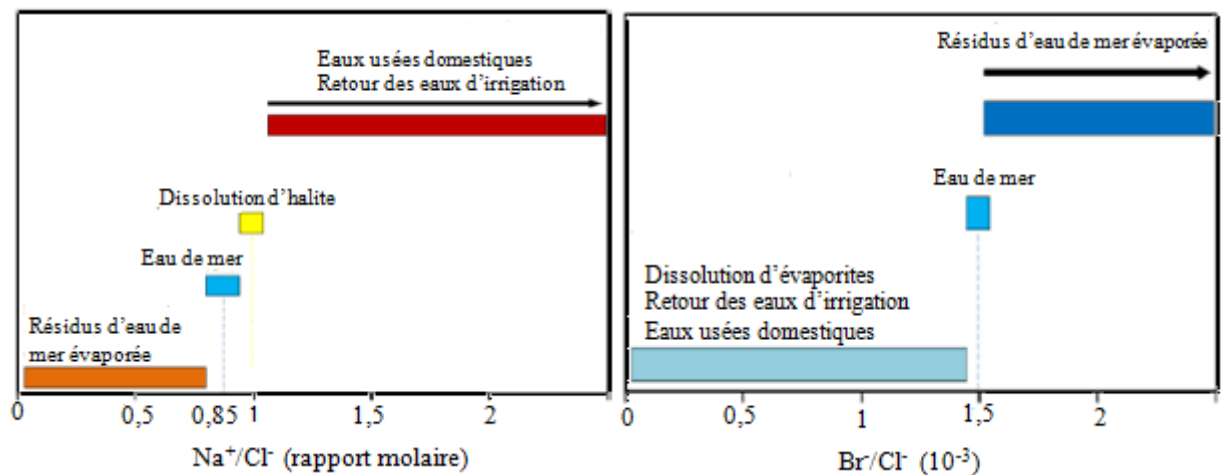
Cette augmentation du rapport  $(\text{Br}^-/\text{Cl}^-)$  pourra être expliquée par un enrichissement en  $\text{Br}^-$  dû à une décomposition de la matière organique du sol.

- **Rapport  $(Br^-/Cl^-) < (Br^-/Cl^-)_{mer}$**

Un faible rapport  $(Br^-/Cl^-)$  par rapport à celui de l'eau de mer suggère une présence de dissolution de sel chloruré, la halite (NaCl) par exemple, qui est le seul sel chloruré à posséder un rapport  $(Br^-/Cl^-)$  plus faible que celui de l'eau de mer.

**Tableau 6.** Caractéristiques géochimiques des sources de salinité (Vengosh, 2003).

	$Br^-/Cl^-$ rapport molaire ( $10^{-3}$ )	$Na^+/Cl^-$ rapport molaire
Eau de mer	1.5	0.86
Dissolution d'évaporites	<1.5	1(halite)
Eaux de retour d'irrigation	<1.5	>1



**Figure 23.** Rapports molaires  $Na^+/Cl^-$ ,  $Br^-/Cl^-$  des principales sources de salinité (Vengosh, 2003).

### Conclusion

Trois campagnes de prélèvement d'échantillons ont été successivement effectuées en janvier, mai et octobre 2011 qui correspondent respectivement la période pluvieuse, à la fin des saisons pluvieuses (périodes juste après hivernage) et sèches.

La première campagne (janvier 2011) a été réalisée sur un réseau de 25 points qui prend en compte les eaux de surface et les eaux souterraines (puits en état d'exploitation). Alors que la deuxième campagne reprend la totalité des points de la première campagne. Pour la troisième campagne on a prélevé de l'eau des mêmes points précédents mais on a trouvé que cinq parmi eux étaient secs.

## CHAPITRE IV. HISTOIRE DES ETUDES REALISEES

L'objectif de ce travail est de présenter tous les travaux réalisés sur le lac Fetzara et à la périphérie de celui-ci pour connaître l'évolution temporelle de la salinité des eaux et du sol et les facteurs qui influent l'évolution de la salinité. Pour cela, les données de plusieurs études sont utilisées. Il s'agit d'abord d'anciennes études entre 1950 et 1985, elles appartiennent à Durand (1950), Ifagraria (1967), étude AJCI (1985); elles ont été complétées par la suite par les travaux:

- Etude BNDER 1997.
- Djamai, 1993 & 2000.
- Etude Gabinetete Hispano D'Ingeniera (GHI) en 2009.

### 1. Etude Durand (1950)

L'Etude a été réalisée en tenant compte des zones homogènes de la végétation et l'échantillonnage a été réalisé pendant la saison sèche (aout 1949). Les points de prélèvement des échantillons ont été fixés sur des alignements orientés de manière à traverser les zones de végétation en des endroits où elles étaient aussi larges que possible ; ceci a donné lieu à 39 profils. La carte de la salinité des sols du lac Fetzara a été établie à l'origine à partir de leurs teneurs en chlorures (Cl<sup>-</sup>) pour être par la suite reconverties en salinité globale représentée par la CE en ms/cm à 25 à partir de la teneur en NaCl.

La valeur de la conductivité électrique montre que la salinité était plus élevée aux alentours du lac qu'au centre. La zone de Cheurfa, située au Sud-Est du lac était la plus élevée avec des valeurs dépassant parfois 45 mS/cm à 25°C, cette valeur n'a jamais été atteinte par suite. D'autre taches de salinité, plus ou moins importantes, ont été signalées particulièrement au Nord-Est et au Nord-Ouest. Cependant, selon la carte de la distribution des sels solubles sur les sols du lac Fetzara, il s'avère que d'une manière générale, la salinité pouvait être considérée comme importante sur l'ensemble des sols, puisqu'en dehors du centre, la CE dépasse les 5 mS/cm à 25°C sur plus de 42% des terres dont plus de 14% avec des valeurs supérieures à 14 mS/cm. D'autre part, nous constatons que l'unité de salinité 0-5 mS/cm étant très large, car la plupart des laboratoires du monde considèrent qu'un sol est déjà salé à partir de 2 mS/cm. Tout ceci laisse supposer que la superficie des sols affectés par le phénomène de salinisation serait plus importante. Lors de cette étude, un seul élément soluble a été déterminé, il s'agit de l'ion chlorure (Cl<sup>-</sup>). La concentration en chlorure était importante avec des valeurs se situant le plus souvent entre

120 et 180 meq/l et pouvant parfois dépasser les 450 meq/l près de Cheurfa au Sud-Est du lac.

## **2. Etude d'Ifagraria (1964)**

Dans le cadre de l'accord de coopération ratifié en 1964 entre la République Algérienne Démocratique et Populaire (Ministère de l'Hydraulique), et la République Italienne (Société IFAGRARIA), une étude générale de mise en valeur agricole des plaines côtières d'Annaba a été menée.

Dans cette étude, les prélèvements ont été effectués à partir du mois d'août 1964 et se prolongés jusqu'au terme de la saison sèche. 50 points de sondages ont été réalisés sur les horizons 0-50 cm et 50-150 cm avec une densité moyenne d'un profil pour 480 ha. Le nombre de sondages a été réduit soit pour son uniformité, soit parce qu'il a été tenu compte de 29 profils de l'étude de Durand (1950). L'évaluation de la salinité a été déterminée sur extrait terre-eau.

Dans cette étude effectuée près 15 ans après celle de Durand (1950), il a été remarqué que la salinité globale était plus importante dans les zones périphériques du lac où elle atteignait la valeur maximale de 21 mS/cm au Nord de Cheurfa (Sud-Est du lac), à l'Ouest et à l'Est du lac près du canal principal, suivant le gradient d'écoulement des eaux. Le centre était moins salé avec une CE se situent entre 4 et 12 mS/cm. La superficie des sols salés ayant une CE supérieure à 4 mS/cm représente plus de 50%. L'unité 7-12 mS/cm est la plus importante avec 38%, par contre celle qui est >12 mS/cm représente à peu près 10%. Le faciès chimique dominant des sols est du type chloruré-sodique.

## **3. Etude AJCI (1985)**

L'étude de faisabilité du projet d'aménagement agricole de la région périphérique du lac Fetzara mené par l'Agence Japonaise de Coopération Internationale (AJCI) a été réalisée suite à une requête exprimée par le Gouvernement Algérien pour une assistance technique. Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un plan à long terme relatif à l'augmentation de la production agricole et du développement de l'économie rurale.

L'échantillonnage a été effectué en deux missions:

Première mission: février à mars 1984, ce qui correspond à une saison humide; sur une superficie de près de 10000 ha.

- Deuxième mission: octobre 1984, ce qui correspond à une saison sèche; elle a porté sur le centre du lac et les plaines du Sud-Est et de l'Ouest, soit une superficie de 8500 ha.

Le total, 64 profils ont été réalisés, les horizons 0-50 cm et 50-150 cm ont été échantillonnées. Dans cette étude, il a été tenu compte également des données recueillies lors des prospections effectuées sur le terrain par Ifagraria (1967) et ANRH (1980).

L'étude AJCI (1985) montre que les zones représentant les valeurs de salinité les plus élevées étaient particulièrement localisées près de Cheurfa dans la partie Sud-Est du lac et au Sud de Berrahal, c'est-à-dire sur le pourtour du lac. Les unités de salinité 4-8 et 8-16 mS/cm couvraient plus de 55% des sols du lac. Dans l'ensemble, la superficie affectée par une salinité supérieure à 8 mS/cm était relativement limitée au centre du lac. Il est possible qu'une grande partie des sels solubles ait été drainé vers le canal pour être évacuée en dehors du lac. Le faciès chimique dominant est comme dans la précédente étude, du type chloruré-sodique.

Au cours des études pédologiques et de l'exploitation du terrain, ont été prélevés plusieurs échantillons d'eau. La salinité augmente dans l'ordre suivant: eaux de surface, eaux des oueds, eaux souterraines.

En ce qui concerne la valeur de la conductivité électrique des oueds, la plus haute est les eaux des alentours de Cheurfa (Sud-Est du lac), par suite l'oued El-Hout.

#### **4. Etude Djamai (1993)**

Cette étude a été effectuée pendant la période allant de novembre à décembre 1988. Un nombre de 28 points de sondages ont été réalisés sur les deux premiers horizons (0-25 cm et 25-50 cm). La conductivité électrique a été déterminée sur extrait de pâte saturée (Djamai, 1993).

Les résultats obtenus lors de cette étude indiquent que la salinité était toujours élevée, particulièrement au Nord, à l'Est et au Sud-Est du lac Fetzara. Au centre, il existe une plage légèrement moins affectée, ceci est certainement dû au lessivage des sols par les eaux de drainage du bassin versant de l'oued El-Hout. L'Ouest qui constitue la partie amont du lac, semble être la zone la moins atteinte par les sels solubles, à cause du gradient écoulement des eaux. Au niveau des valeurs de la salinité, la conductivité électrique moyenne calculée était estimée à 7.55 mS/cm à 25 mS/cm à 25°C avec des teneurs maximales dépassant parfois 23 mScm, surtout au Sud de Berrahal et à l'Est du lac. La classe la plus importante était représentée par unité 8-16 ms/cm. Le faciès

chimique dominant est de type chloruré-sodique. Les chlorures avec une teneur moyenne de 83.75 meq/l, étaient particulièrement importants dans la partie Sud-Est du lac avec un maximum à 25 meq/l. Le sodium ( $\text{Na}^+$ ) représente plus de 50% du total des cations et enregistre une valeur maximale de 136.11 meq/l au Sud-Est.

### **5. Etude BNEDER (1997)**

En 1997 Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural (BNEDR), a entrepris l'étude d'aménagement agricole de la région périphérique du lac Fetzara sur une superficie de 18 600 ha.

Il s'agit d'une étude sectorielle qui seulement prend une considération la partie pédologie. Cette étude constitue une actualisation et un complément à celle déjà établie par la AJCI en 1985. Les classes de sols identifiés sont au nombre de quatre:

- Sols peu évolués
- Vertisols
- Sols Hydromorphes
- Sols halomorphes

### **6. Etude Djamai (2000)**

L'étude a été réalisée en se basant sur les cartes de salinité établies par AJCI (1985) et Djamai (1993). En effet, la superposition des deux cartes a permis de localiser au niveau de l'intersection des différentes unités de salinité les points d'échantillonnage. Pour cette étude, 40 points de sondages ont été déterminés et comme dans l'étude précédente (Djamai, 1993), la CE a été évaluée sur extrait de pate saturé au niveau des deux premiers horizons (0-25 cm et 25-50). L'échantillonnage a été effectué durant la période allant d'octobre à novembre 1999.

Cette étude montre que les valeurs les plus élevées de la CE ne dépassaient guère 8 mS/cm à 25°C. La partie centrale et les zones limitrophes du lac étaient relativement plus salées que le reste. Les parties Est et Sud-Est restent les plus salées, ceci est certainement lié au gradient d'écoulement des eaux. La superficie des terres ayant un CE inférieure à 4 ms/cm représente près de 66%, alors que l'unité la plus élevée, c'est-à-dire 4-8 mS/cm, représente moins de 34% .Le facies chimique dominant est toujours comme dans les précédentes études chloruré-sodique. Les teneurs en chlorures variant entre 120 et 180 meq/l, et sont toujours très fortes, particulièrement dans la partie Est du lac et au Nord de

Cheurfa. Les concentrations en sodium évoluent dans le même sens que ceux des chlorures avec des valeurs variant entre 40 et 80 meq/l.

Les mesures sur le terrain sont plus ou moins rapprochées d'où deux ou trois répétitions permettent d'obtenir un ordre de grandeur.

## **7. Etude GHI (2009)**

Gabinette Hispano de Ingeniería (GHI) a élaboré plusieurs études et travaux :

- Pédologie des périmètres agricoles autour du lac.
- Hydrologie

Les objectifs généraux:

- La protection contre les inondations des localités situées à l'aval du lac.
- La protection du lac contre la pollution.
- L'assainissement et le drainage de toutes les eaux excédentaires vers la mer.

### **7.1. Etude pédologique**

Le problème de la salinité des sols du lac Fetzara a été considéré depuis bien des années. L'étude d'aménagement hydro-agricole de la plaine d'Annaba Ouest a été attribuée au Bureau d'Etudes: Gabinette Hispano Ingeniería (GHI) – Espagne par l'Office National de l'Irrigation et de Drainage (O.N.I.D).

La superficie prévue pour cette étude est d'environ 11.500 ha. Elle caractérise les meilleurs sols susceptibles d'être irrigués et situés la périphérie du lac Fetzara.

De ce fait, et dans le cadre de cette étude, l'effort a été fait pour observer la salinité sur un grand nombre d'échantillons du sol et l'eau souterraine. Cette salinité est en baisse par rapport aux études précédentes, ceci est certainement du aux effets de drainage. Cependant, des sols de plus de 24 mS/cm existent toujours aux alentours de Chorfa (Sud-Est du lac), et à l'amont de l'oued El-Hout. La conductivité électrique dans les horizons supérieurs dépasse généralement les 8 mS/cm. De plus, la salinité augmente avec la profondeur.

Les eaux souterraines présentent une salinité qui varie de 1.25 mS/cm pour la nappe située au Nord du canal principal et supérieure à 8 mS/cm pour la partie Sud du canal et peut atteindre 15.27 mS/cm (Sud du canal principal).

La principale contrainte des sols de la périphérie du lac Fetzara à la production végétale est la salinité.



La prospection pédologique effectuée sur ces sols et les résultats analytiques du laboratoire montre que:

Une grande partie des terres limitrophes au lac est mal drainée et la moitié subit des conditions hydromorphes/halomorphes. Il y a relativement peu de surface qui convient aux cultures sans travail important préliminaire de drainage.

Les terres situées à la périphérie du lac ne présentent aucune aptitude, elles sont classées comme pâturage ou terrain inculte. Ce dernier est dû à la haute teneur en sel et au degré d'inondation (période d'inondation s'étale d'octobre jusqu'en mai).

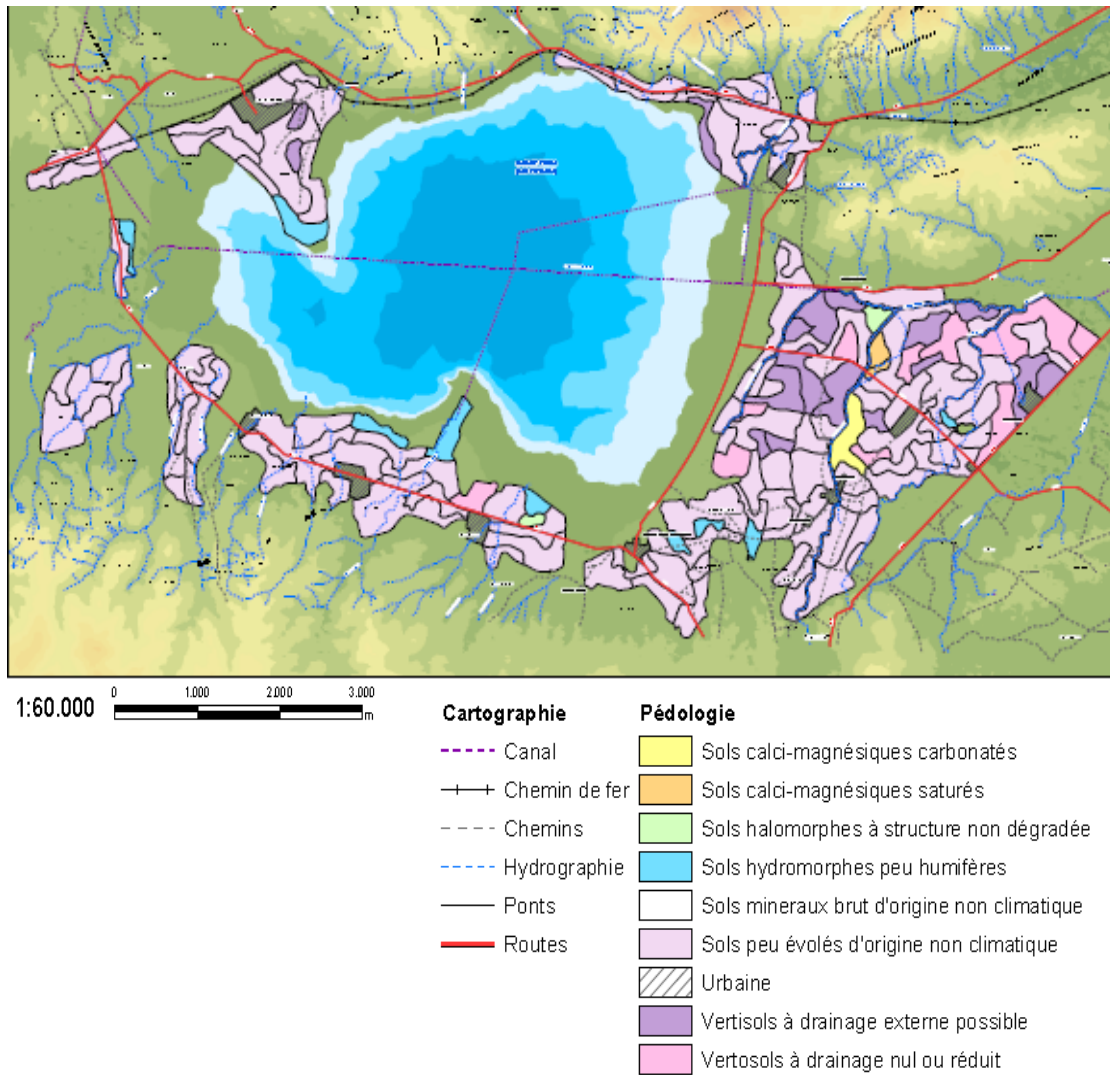
L'amélioration des sols salés passe avant tout par un drainage immédiat pour dessaliniser le sol et des labours profonds. Le drainage permet de maintenir une aération dans le sol et éviter l'alcalinisation par suite de la réduction de sulfates en sulfures.

Ces sols sont actuellement occupés par les prairies et sur certaines parcelles, on retrouve les cultures céréalières et maraîchères.

L'étude pédologique de la zone et l'établissement de la carte des sols (figure 24) a permis de distinguer un ensemble de sols qui occupe une superficie assez importante, localisé à la périphérie du lac. Il comporte des sols médiocres (forte salinité, présence de texture très fine en profondeur, drainage difficile).

**Tableau 7.** Classes des sols (GHI, 2009)

classes	S/classes	Superficie (ha)	%
Sols minéraux bruts	N/climatique	178	1.59
Sols peu Évolués	N/climatique	8612	76.72
Vertisols	Drainage externe nul ou réduit	886	7.89
	Drainage externe possible	742	6.61
Calcimagnésiques	Carbonatés	119	1.06
	Saturés	56	0.50
Halomorphes	Structure non dégradée	22	0.19
Hydromorphes	Peu humifères	610	5.44
Total	N/climatique	11 225	100



**Figure 24.** Carte pédologique d'après GHI 2009.

## 7.2. Etude hydrologique

Dans le but de calculer la fraction de la précipitation qui se transforme en écoulement de surface et en infiltration, un bilan d'eau à l'échelle mensuel a été établi pour le bassin versant du lac (341 km<sup>2</sup>), ainsi que pour la partie de la cuvette de celui-ci.

Le bilan réalisé pour le lac Fetzara suggère une entrée de 113 hm<sup>3</sup>/an, y compris les écoulements de surface et les eaux souterraines ainsi que des précipitations directes sur le lac. L'existence d'une importante recharge des eaux souterraines de l'infiltration dans le bassin versant, ainsi que dans la cuvette du lac lui-même, justifie la présence quasi permanente de l'eau pendant une année, surtout si on tient compte de l'importance des volumes évaporés et des sorties à travers du canal.

**Tableau 8.** Sommaire de bilan du lac Fetzara.

<b>Entrées Hm<sup>3</sup></b>	
Basin versant	
Écoulement	33.5
Infiltration	31.3
Cuvette	
Écoulement	13.6
Infiltration	12.71
Précipitation directe lac	22.23
<b>Total entrés</b>	<b>113.35</b>
<b>Sorties Hm<sup>3</sup></b>	
Évaporation direct	32.35
Canal	81
<b>Total sorties</b>	<b>113.35</b>

**Conclusion**

Les différentes études présentées montrent une diminution dans le temps de la concentration des sels solubles dans l'horizon de surface de la zone d'étude. La salinité était plus élevée aux alentours qu'au centre du lac, particulièrement vers Cheurfa (Sud-Est du lac) suivant le gradient d'écoulement des eaux.

## CHAPITRE V. ETUDE STATISTIQUE MULTIVARIEE DES EAUX DU LAC FETZARA

Les échantillons prélevés ont fait l'objet de mesures physico-chimiques diverses. Dans le cas de nombreux paramètres, il ne convient pas d'étudier la variabilité paramètre par paramètre. Le traitement statistique le plus approprié est l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette méthode permet d'étudier les sources indépendantes de la variabilité, tous paramètres confondus.

C'est une méthode factorielle, c'est-à-dire qu'elle permet de déterminer des axes factoriels indépendants dans l'hyperespace des « n » paramètres mesurés. Ces axes sont orthogonaux dans cet hyperespace, ce qui induit une indépendance entre ceux-ci.

L'ACP peut être calculée à partir de la matrice des covariances ou bien à partir de celle des corrélations. Dans le premier cas, la méthode favorise les paramètres dont les mesures donnent des valeurs élevées, au détriment des autres paramètres. Comme dans les analyses des eaux, il existe des mesures de nature diverse tels que le pH mesuré en unité pH, c'est-à-dire logarithmique, ou bien les éléments majeurs (mg/l) ou les concentrations, il est préférable d'effectuer les calculs à partir de la matrice des corrélations qui éliminent ces inconvénients (Ouardi, 2006).

L'utilisation de l'ACP pour l'étude de la chimie des eaux, permet de différencier les groupes ayant des caractéristiques chimiques similaires, leurs variations (facteur) suivant les axes principaux mais surtout les modes d'acquisition de la minéralisation. Nous avons effectué une ACP sur des variables centrées réduites à l'aide du logiciel Xlstat sur un ensemble de 13 paramètres physico-chimiques obtenus à partir de 25 points d'eau pour la première et la deuxième campagne, 19 points lors de la troisième campagne et sur 13 paramètres.

Les variables prises en compte sont: CE, T, pH, Eh, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>), mais également Br<sup>-</sup>.

### 1. Statistiques descriptives

L'étude statistique de la répartition spatiale des éléments chimiques présente les valeurs minimales, moyennes et maximales, ainsi que le coefficient de variation (tableaux, 9, 10, 11). L'homogénéité d'une série se traduit par les valeurs proches de la moyenne. La

dispersion autour de la moyenne est évaluée à l'aide du coefficient de variation (en %) qui est le rapport de l'écart type à la moyenne. Une série homogène présente des valeurs du coefficient de variation inférieur à 50% (Chabour, 2006).

Il est possible d'établir un classement des différents paramètres en fonction de leur coefficient de variation qui le suivant:

**Première campagne (janvier 2011):**

- Faible coefficient de variation: pH, T°C, Eh.
- Moyen coefficient de variation: CE, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Br<sup>-</sup>.
- Fort coefficient de variation: K<sup>+</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

**Deuxième campagne (mai 2011):**

- Faible coefficient de variation: pH, T°C, Eh, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>.
- Moyen coefficient de variation: CE, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, Br<sup>-</sup>.
- Fort coefficient de variation: K<sup>+</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

**Troisième campagne (octobre 2011):**

- Faible coefficient de variation: pH, T°C, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.
- Moyen coefficient de variation: CE, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>++</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, Br<sup>-</sup>.
- Fort coefficient de variation: Cl<sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Eh.

Pour la première campagne, les cations présentent un ordre d'abondance de type Na<sup>++</sup> > Ca<sup>++</sup> > Mg<sup>++</sup> > K<sup>+</sup>.

Les teneurs en sodium s'inscrivent entre 95 mg/l et 431 mg/l, la teneur moyenne est de 213.528 mg/l. On observe une très grande variabilité pour le calcium, la valeur moyenne de 76,344 mg/l. Huit analyses ont une valeur supérieure à la moyenne. Les concentrations en magnésium sont très variables et comprises entre 0.97 mg/l et 106.487 mg/l, la valeur moyenne est de 43.939 mg/l.

Les teneurs moyennes en potassium est de 17.325 mg/l, c'est en fait l'ion le moins abondant. Il montre une grande variabilité avec une valeur minimale de 2.005 mg/l et un maximum de 106.277 mg/l. Son coefficient de variation corrobore très bien cette observation. Les chlorures et les bicarbonates constituent l'essentiel de la minéralisation

des eaux, on remarque que les concentrations en sulfates et en carbonates sont relativement faibles vis-à-vis des bicarbonates et des chlorures.

Pour la deuxième campagne, le calcium avec une moyenne de 67.59 mg/l présente une forte fréquence des valeurs comprises entre 24.636 mg/l et 180.36 mg/l. Les teneurs en magnésium présentent une moyenne de 58.966 mg/l et une forte fréquence des valeurs comprises entre 12.636 mg/l et 145.8 mg/l. Les chlorures et le sodium suivent une évolution du Nord vers le Sud avec une forte fréquence des valeurs des chlorures comprises entre 106.5 et 887.5 mg/l et des valeurs comprises entre 106.5 mg/l et 401.005 mg/l pour  $\text{Na}^+$ . Les sulfates suivent pratiquement la même évolution, les fortes fréquences s'observent en Est et au Sud du lac, avec de fortes fréquences comprises entre 150.92 mg/l et 382.69 mg/l. En revanche les bicarbonates présentent une répartition spatiale assez hétérogène.

Pour la troisième campagne, les chlorures présentent une concentration moyenne de 339.842 mg/l et l'ion sodium est le cation le plus présent avec 224.778 mg/l en moyenne. Les coefficients de variation de ces deux ions montrent des valeurs importantes (56,15% pour le sodium et 98.52 % pour les chlorures).

Le sodium est généralement associé à l'ion chlorure, très soluble dans l'eau et il est affecté par le processus d'échange de base. Les argiles peuvent retenir des quantités importantes en sels (Schoeller, 1962), les eaux en contact avec les dépôts argileux peuvent se charger en ces éléments et grâce à leur solubilité élevée, ces ions peuvent atteindre des concentrations considérables.

Les concentrations en chlorures et en sodium présentent une forte similitude avec la conductivité électrique des eaux. Ceci indique que la CE des eaux analysées est déterminée principalement par les sels (NaCl) et que le faciès des eaux étudiées est en partie de type chloruré sodique.

Les sulfates présentent une grande dispersion des valeurs (coefficient de variation 64.28%). Les sulfates pourraient provenir de la dissolution d'anhydrite ou de gypse ou encore de l'oxydation de la pyrite présente dans les formations argileuses.

Les ions bicarbonates et calcium sont présents avec une concentration moyenne de 626.695 mg/l pour les bicarbonates et de 82.143 mg/l pour le calcium. Les coefficients de variation sont importants (respectivement 54.76% pour le calcium et 32.52% pour les

bicarbonates). Les bicarbonates sont des composés anioniques contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles selon leurs sources et le pH de l'eau. L'origine de cet élément est essentiellement la mise en solution du gaz carbonique qui par formation d'un acide faible attaque les roches carbonatées.

Les concentrations en magnésium sont comprises entre 29.16 mg/l et 206.55 mg/l, la moyenne est de l'ordre de 94.054 mg/l.

Les concentrations en potassium présentent une variation de 4.028 mg/l à 53.140 mg/l, avec une moyenne de 19.047 mg/l. Le potassium se trouve à de faibles concentrations par rapport aux autres éléments dans les eaux car il est adsorbé par la matrice argileuse du sol est absorbé par les plantes.

De manière générale, la composition chimique des eaux est très variable. Le coefficient de variation de la plupart des paramètres est importante, exception faite du pH et T°C. Ce résultat est relativement fréquent en milieu salé, où la salure dans la majeure partie des paramètres physico-chimiques présente une grande variabilité spatiale (Ouardi, 2006).

**Tableau 9.** Statistique descriptive pour la chimie des eaux  
(campagne janvier 2011).

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Coefficient de v %	Ecart-type
CE	0.500	3.500	1.646	45.572	0.750
pH	6.650	7.500	7.033	3.440	0.242
Eh	5.000	252.000	182.680	31.574	57.680
T°C	13.000	20.100	16.616	12.102	2.011
Cl <sup>-</sup>	71.000	710.000	332.280	<b>57.689</b>	191.689
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	85.400	707.600	367.952	52.883	194.585
Mg <sup>++</sup>	0.972	106.487	43.839	<b>68.505</b>	30.033
Ca <sup>++</sup>	12.024	176.352	76.344	61.583	47.015
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	15.416	270.991	120.188	50.026	60.126
Na <sup>+</sup>	95.000	431.000	213.528	41.941	89.557
K <sup>+</sup>	2.005	106.277	17.325	<b>136.992</b>	23.734
CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	0.000	60,010	16.323	<b>137.364</b>	22.422
Br <sup>-</sup>	0.009	0,135	0.063	45.209	0.028

**Tableau 10.** Statistique descriptive pour la chimie des eaux  
(campagne mai 2011)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Coefficient de v %	Ecart-type
CE	1.240	6.390	2.559	45.19	1.156
pH	6.400	7.470	6.868	4.33	0.298
Eh	60.000	178.000	129.440	22.63	29.303
T°C	17.100	25.700	20.600	8.58	1.768
Cl <sup>-</sup>	106.500	887.500	319.500	<b>64.86</b>	207.252
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	61.000	732.000	362.584	40.61	147.267
Mg <sup>++</sup>	12.636	145.800	58.966	54.02	31.859
Ca <sup>++</sup>	24.850	180.360	67.591	54.80	37.046
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	150.920	382.690	255.986	27.16	69.550
Na <sup>+</sup>	106.007	401.005	226.055	34.82	78.725
K <sup>+</sup>	1.989	73.008	15.439	<b>128.40</b>	19.825
CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	0.000	108.000	33.600	<b>78.51</b>	26.382
Br <sup>-</sup>	0.047	0.183	0.085	39.29	0.033

**Tableau 11.** Statistique descriptive pour la chimie des eaux  
(campagne octobre 2011)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Coefficient de v %	Ecart-type
CE	0.760	5.170	1.967	<b>64.57</b>	1.270
pH	7.220	8.590	7.763	4.14	0.322
Eh	15.000	253.000	51.684	<b>102.25</b>	52.849
T°C	19.300	24.100	21.926	5.62	1.233
Cl <sup>-</sup>	71.000	1491.000	399.842	<b>98.24</b>	392.796
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	195.200	890.600	626.695	32.52	203.829
Mg <sup>++</sup>	29.160	206.550	94.054	<b>58.28</b>	54.810
Ca <sup>++</sup>	32.866	193.186	82.143	<b>54.76</b>	44.982
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	11.564	221.284	81.211	<b>64.28</b>	52.204
Na <sup>+</sup>	83.996	562.994	224.778	<b>56.15</b>	126.209
K <sup>+</sup>	4.028	53.140	19.047	<b>79.53</b>	15.147
CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	0.000	108.000	47.053	<b>63.94</b>	30.084
Br <sup>-</sup>	0.020	0.224	0.072	<b>62.91</b>	0.045



## 2. Matrice de corrélation

Les corrélations linéaires entre certains éléments chimiques pertinents permettent de rechercher l'origine de la minéralisation en évaluant les degrés de dépendance entre les différents paramètres concernés. L'évaluation se fait à l'aide des coefficients de corrélation déterminés par des calculs statistiques. La corrélation entre deux paramètres sera d'autant plus significative que le coefficient de corrélation R sera proche de la valeur 1. Ainsi les corrélations ont été établies entre tous les éléments majeurs pris deux à deux; ce qui nous a permis d'obtenir des diagrammes binaires de corrélation pour les interprétations.

Les tableaux 12, 13, 14 donnent la matrice de corrélation. Le pH, la T°C, le Eh et le K<sup>+</sup> paraissent sans liaison directe entre eux et avec l'ensemble des éléments. Il en est de même pour CO<sub>3</sub><sup>-</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> qui restent isolés. Leur degré de corrélation avec les autres ions n'étant pas significatif. L'ion Cl<sup>-</sup> présente les meilleures corrélations avec CE et Na<sup>+</sup>.

La corrélation positive des chlorures et la conductivité électrique de l'eau est excellente, d'où une grande influence des chlorures sur la salinité des eaux, le coefficient de corrélation entre la conductivité électrique et les ions chlorures est égale à 0.879 pour la première campagne, 0,981 pour la deuxième campagne et 0.913 pour la troisième campagne. Le coefficient de corrélation, dans le cas du sodium est fortement significatif pour les trois campagnes.

Les corrélations entre la conductivité électrique qui reflète la salinité totale de l'eau et les variables chimiques, autres que les chlorures et sodium, sont présentées dans les tableaux 12, 13, 14. Le magnésium, les sulfates et le calcium présentent une participation importante dans la minéralisation totale des eaux pour la première et deuxième campagne. Pour la troisième campagne le magnésium et le calcium présente des corrélations significatives avec la conductivité électrique.

Ces observations nous conduisent à proposer un bilan par régression multiples de la conductivité électrique au regard des différents anions et cations. Si l'on devait estimer la conductivité électrique à partir d'un seul élément ca devrait être les chlorures, à partir de deux éléments ils s'agiraient du Chlorures et le sodium; à partir de trois éléments ce seraient les chlorures, le sodium et le calcium et à partir de quatre éléments, ce sera les chlorures, le sodium, le calcium, le magnésium, etc.....

Une forte corrélation existe entre  $\text{Cl}^-$ - $\text{Ca}^{++}$  pour les trois campagnes et entre  $\text{SO}_4^{--}$ - $\text{Na}^+$  pour la deuxième campagne, entre  $\text{Cl}^-$ - $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ - $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ - $\text{Na}^+$  pour la troisième campagne. Les relations entre ces cations indiquent l'existence des réactions d'échange ioniques entre solution et le complexe adsorbant.

Les chlorures montrent une excellente corrélation avec le sodium. On remarque que les teneurs en chlorures et sodium varient de façon similaire avec augmentation de la conductivité électrique. Ces fortes corrélations montrent que les variations des charges ioniques dissoutes sont entièrement ou en partie liées à des variations des teneurs de ces ions.

**Tableau 12.** Matrice de corrélation des différents paramètres (campagne janvier 2011).

Variables	CE	pH	Eh	T°C	$\text{Cl}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Mg}^{++}$	$\text{Ca}^{++}$	$\text{SO}_4^{--}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{CO}_3^{--}$	$\text{Br}^-$
CE	<b>1</b>												
pH	-0.066	<b>1</b>											
Eh	0.113	0.221	<b>1</b>										
T°C	-0.064	0.166	-0.325	<b>1</b>									
$\text{Cl}^-$	<b>0.879</b>	0.240	0.089	0.019	<b>1</b>								
$\text{HCO}_3^-$	0.465	<b>-0.469</b>	0.131	-0.174	0.156	<b>1</b>							
$\text{Mg}^{++}$	<b>0.651</b>	-0.437	0.089	-0.425	0.408	0.455	<b>1</b>						
$\text{Ca}^{++}$	<b>0.686</b>	0.069	0.286	-0.110	<b>0.668</b>	0.395	0.239	<b>1</b>					
$\text{SO}_4^{--}$	<b>0.713</b>	-0.072	0.167	-0.042	<b>0.579</b>	0.262	0.503	0.263	<b>1</b>				
$\text{Na}^+$	<b>0.919</b>	0.170	0.059	-0.034	<b>0.939</b>	0.217	0.463	<b>0.650</b>	<b>0.665</b>	<b>1</b>			
$\text{K}^+$	-0.302	0.104	0.015	0.091	-0.328	-0.136	-0.303	-0.322	-0.113	-0.287	<b>1</b>		
$\text{CO}_3^{--}$	-0.177	<b>-0.217</b>	-0.056	0.057	-0.364	0.352	0.165	-0.123	-0.147	-0.234	0.342	<b>1</b>	
$\text{Br}^-$	-0.278	0.073	-0.431	0.210	-0.192	-0.070	-0.168	-0.225	-0.378	-0.317	-0.176	-0.213	<b>1</b>

**Tableau 13.** Matrice de corrélation des différents paramètres (campagne mai 2011)

Variables	CE	pH	Eh	T°C	$\text{Cl}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Mg}^{++}$	$\text{Ca}^{++}$	$\text{SO}_4^{--}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{CO}_3^{--}$	$\text{Br}^-$
CE	<b>1</b>												
pH	-0.051	<b>1</b>											
Eh	-0.002	-0.010	<b>1</b>										
T°C	0.020	0.516	0.015	<b>1</b>									
$\text{Cl}^-$	<b>0.913</b>	0.265	0.041	0.217	<b>1</b>								
$\text{HCO}_3^-$	-0.087	-0.619	-0.010	-0.465	-0.427	<b>1</b>							
$\text{Mg}^{++}$	<b>0.698</b>	-0.278	0.132	-0.240	0.446	0.455	<b>1</b>						
$\text{Ca}^{++}$	<b>0.766</b>	-0.117	0.037	-0.024	<b>0.701</b>	-0.089	0.445	<b>1</b>					
$\text{SO}_4^{--}$	<b>0.684</b>	-0.240	-0.203	-0.189	0.497	0.335	0.574	0.495	<b>1</b>				
$\text{Na}^+$	<b>0.813</b>	0.170	-0.187	0.030	<b>0.842</b>	-0.199	0.379	0.519	<b>0.702</b>	<b>1</b>			
$\text{K}^+$	-0.387	0.057	0.249	0.138	-0.402	0.182	-0.202	-0.343	-0.172	-0.417	<b>1</b>		
$\text{CO}_3^{--}$	0.129	-0.432	0.021	-0.652	-0.117	0.389	0.492	0.211	0.188	-0.025	-0.125	<b>1</b>	
$\text{Br}^-$	0.407	0.024	-0.133	-0.014	0.412	-0.211	0.044	0.227	0.191	0.499	-0.213	0.162	<b>1</b>

**Tableau 14.** Matrice de corrélation des différents paramètres (campagne octobre 2011).

Variabes	CE	pH	Eh	T°C	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Mg <sup>++</sup>	Ca <sup>++</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>
CE	<b>1</b>												
pH	0.473	<b>1</b>											
Eh	-0.287	-0.183	<b>1</b>										
T	-0.015	-0.099	-0.286	<b>1</b>									
Cl <sup>-</sup>	<b>0.981</b>	0.571	-0.295	0.021	<b>1</b>								
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.053	-0.074	0.043	0.027	-0.090	<b>1</b>							
Mg <sup>++</sup>	<b>0.840</b>	0.447	-0.216	-0.048	<b>0.836</b>	0.337	<b>1</b>						
Ca <sup>++</sup>	<b>0.865</b>	0.302	-0.222	0.069	<b>0.791</b>	0.117	0.660	<b>1</b>					
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.247	-0.222	0.435	-0.441	0.135	-0.161	0.190	0.197	<b>1</b>				
Na <sup>+</sup>	<b>0.940</b>	0.437	-0.274	0.075	<b>0.934</b>	0.177	<b>0.875</b>	<b>0.791</b>	0.123	<b>1</b>			
K <sup>+</sup>	-0.069	0.437	-0.013	0.145	0.021	-0.177	-0.076	-0.075	-0.406	-0.194	<b>1</b>		
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.206	-0.088	-0.232	0.114	0.232	0.272	0.322	0.188	-0.374	0.369	-0.146	<b>1</b>	
Br <sup>-</sup>	-0.077	0.050	-0.193	0.363	-0.069	-0.054	-0.226	0.021	-0.155	-0.061	-0.077	0.090	<b>1</b>

### 3. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Le grand intérêt de l'ACP réside dans le fait qu'elle prend en compte toutes les variables entrées simultanément et que l'interprétation des résultats se limite le plus souvent à l'interprétation des premières composantes. Des cercles de corrélations permettent de schématiser les liens existant entre les différentes variables étudiées. De même, des projections des individus sur les plans formés par les premières composantes principales permettent de visualiser la répartition des différents individus (points d'eau échantillonnés), ce qui donne une idée sur leur ressemblance vis-à-vis des variables mesurées.

Pendant la première campagne, les trois principaux axes expliquant 65.39% de la variance totale. L'axe I exprime 36.18% de la variance totale, l'axe II exprime 16.77% et l'axe III exprime 12.43% de la variance totale. La matrice de corrélation montre que l'axe F1 est corrélé négativement au K<sup>+</sup>. Il est corrélé positivement aux éléments CE, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup> et Na<sup>+</sup> avec des valeurs dépassant les 85% pour les chlorures, le sodium et la conductivité électrique. Sa corrélation avec HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> est dans les limites de l'acceptable. En revanche, il n'est pas corrélé à CO<sub>3</sub><sup>-</sup>. L'axe F2 est corrélé positivement au pH (75%) négativement avec les carbonates et les bicarbonates. L'axe F3 est corrélé seulement avec les éléments Eh et K<sup>+</sup>.

Le facteur F1 regroupe tous les éléments chimiques dans le pôle positif à l'exception de pH, K<sup>+</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>, T°C, Br<sup>-</sup>. Le facteur F1 caractérise donc la minéralisation (influencée principalement par les évaporites) dans sa partie positive et les eaux moins minéralisées dans le pôle négatif.

Dans le plan des individus (Figure 26) l'axe F1 distingue les eaux faiblement à moyennement chargées et les eaux fortement minéralisées.

Le facteur F2, qui oppose le pH et  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{--}$  caractérise les eaux carbonatées, expliquant leur caractère acide ou basique. Dans le plan des individus, l'axe F2 sépare les eaux acides des eaux basiques. Le facteur F3 est uniquement corrélé au Eh, explique les processus d'oxydoréduction.

Dans le plan des individus, le facteur F3 exprime donc un phénomène d'oxydoréduction

Pour la deuxième campagne, le facteur F1 avec une variance exprimée de 35.57%, est le plus important de tous, ensuite viennent les facteurs F2 et F3, avec respectivement 23.48% et 10.17% de la variance exprimée et sont représentatifs de la variance de l'ensemble des données. Les plans factoriels F1-F2 et F2-F3 représentent respectivement des variances égales 59.05% et 45.74%. Le facteur F1 présente le pôle de la salinité avec une relation de la conductivité avec les éléments chimiques (origine évaporitique de la salinité).

Dans le plan des individus (Figure 28), l'axe F1 distingue toujours les eaux moyennement minéralisées aux eaux fortement minéralisées

Le facteur F2, pôle des carbonates par une relation inverse entre l'évolution des carbonates et les bicarbonates avec le pH. Dans le plan des individus (Figure 28), l'axe F2 discrimine toujours les eaux acides des eaux basiques.

Le facteur F3, indique le pôle d'oxydoréduction par une relation avec le Eh.

Pour la troisième campagne, les trois axes factoriels F1, F2 et F3 représentent à eux seuls, 67.40% de la variance totale (respectivement 37.97%, 16.88 et 12.96%).

Le facteur F1 est caractérisé par  $\text{CE}$ (0.947),  $\text{pH}$ (0.484),  $\text{Cl}^-$ (0.945),  $\text{Mg}^{++}$ (0.881),  $\text{Ca}^{++}$ (0.763). Les variables définissant F1 sont caractéristiques de la minéralisation majeure des eaux. Dans le pôle positif l'association  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{--}$  forme un pôle extrême traduisant une minéralisation d'origine évaporitique.

L'axe F2 caractérisé par les concentrations en  $\text{SO}_4^{--}$  (0.756) et en moindre mesure par Eh (0.356). Cet axe pourrait donc représenter des phénomènes d'oxydoréduction de sulfure

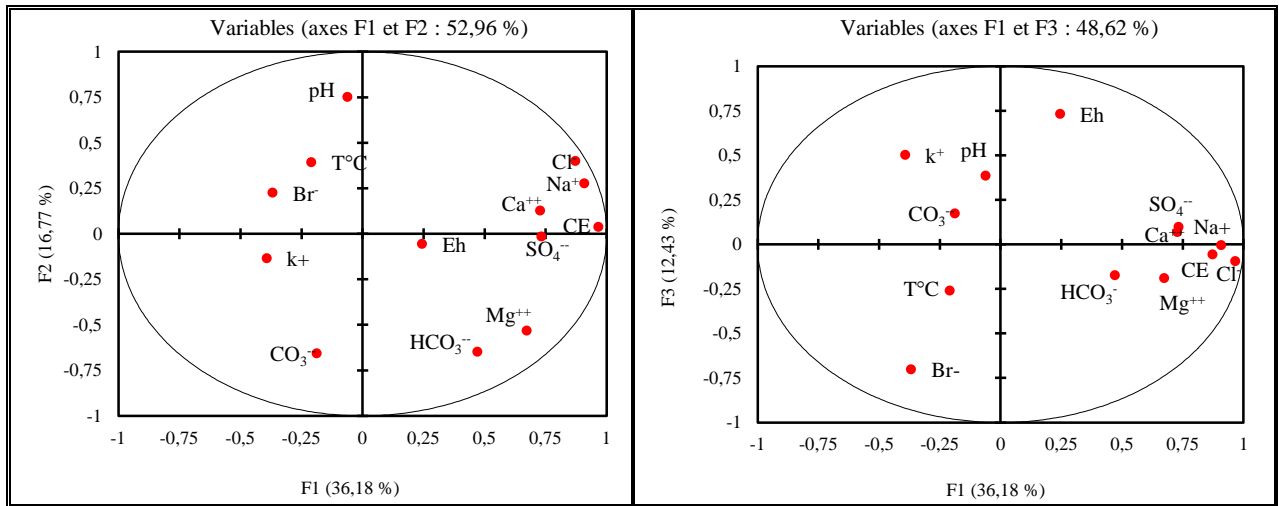


Figure 25. Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (campagne janvier 2011).

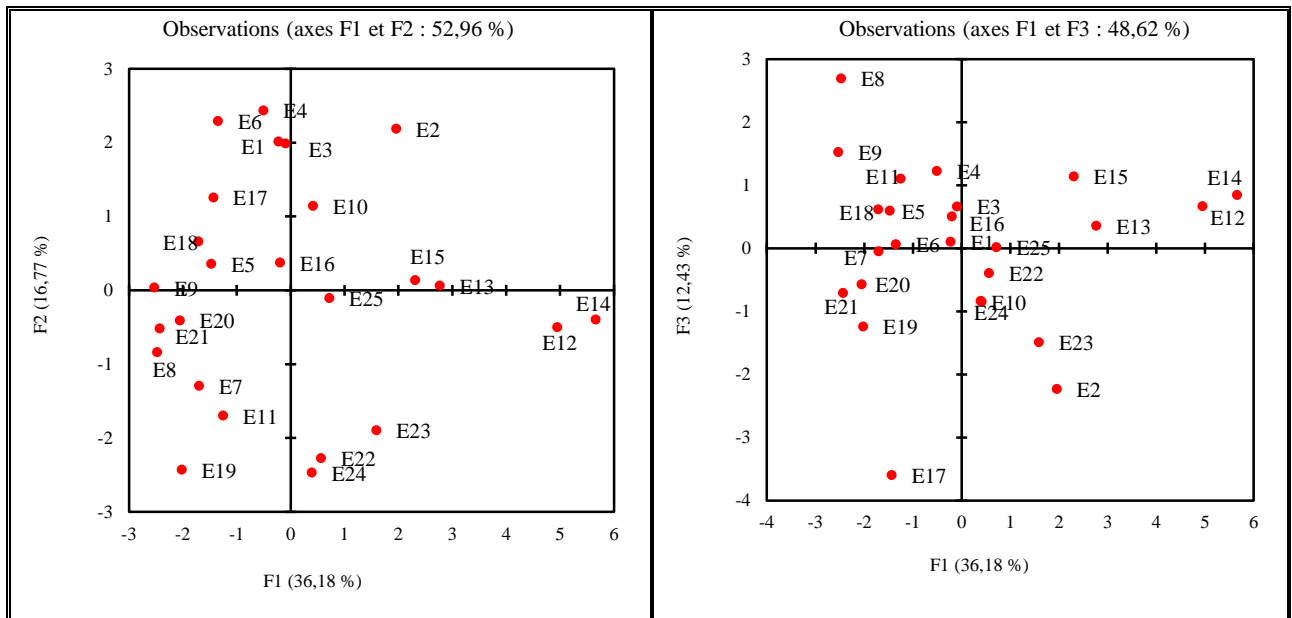


Figure 26. Répartition des échantillons sur le plan factoriel (campagne janvier 2011).  
(E=Echantillon)

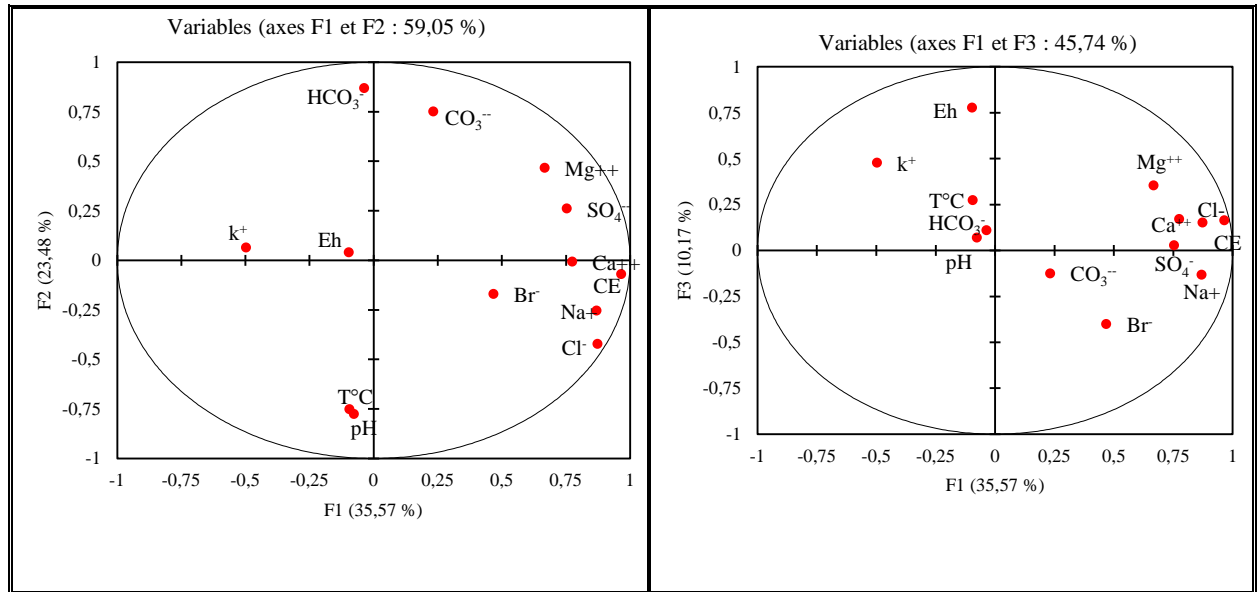


Figure 27. Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (campagne mai 2011).

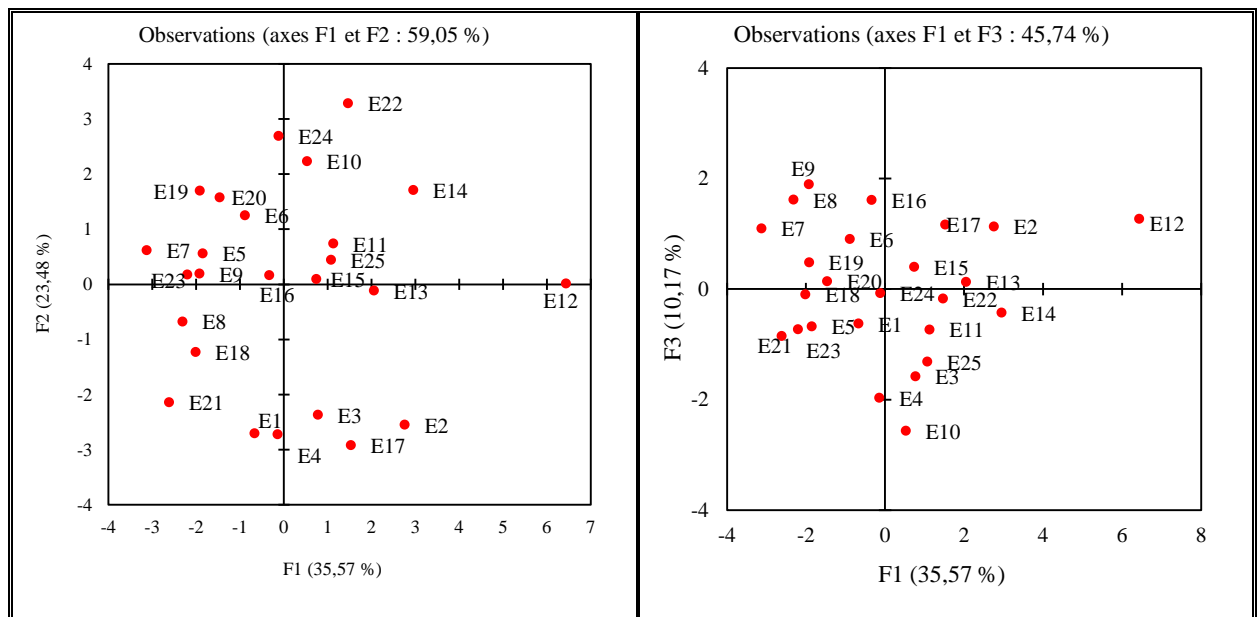


Figure 28. Répartition des échantillons sur le plan factoriel (campagne mai 2011).

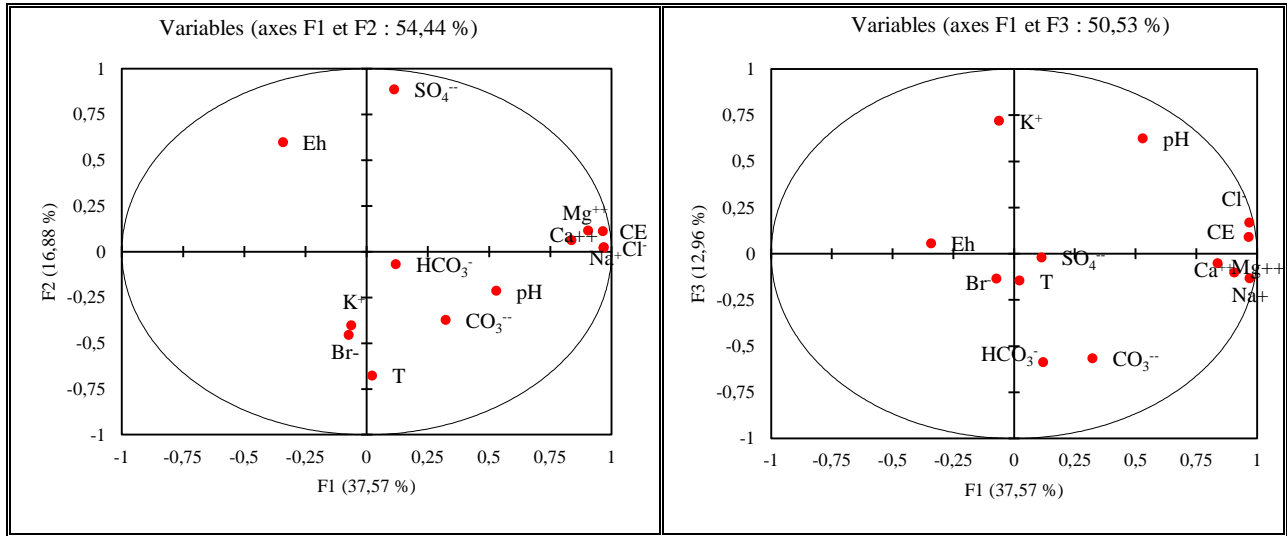


Figure 29. Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (campagne octobre 2011).

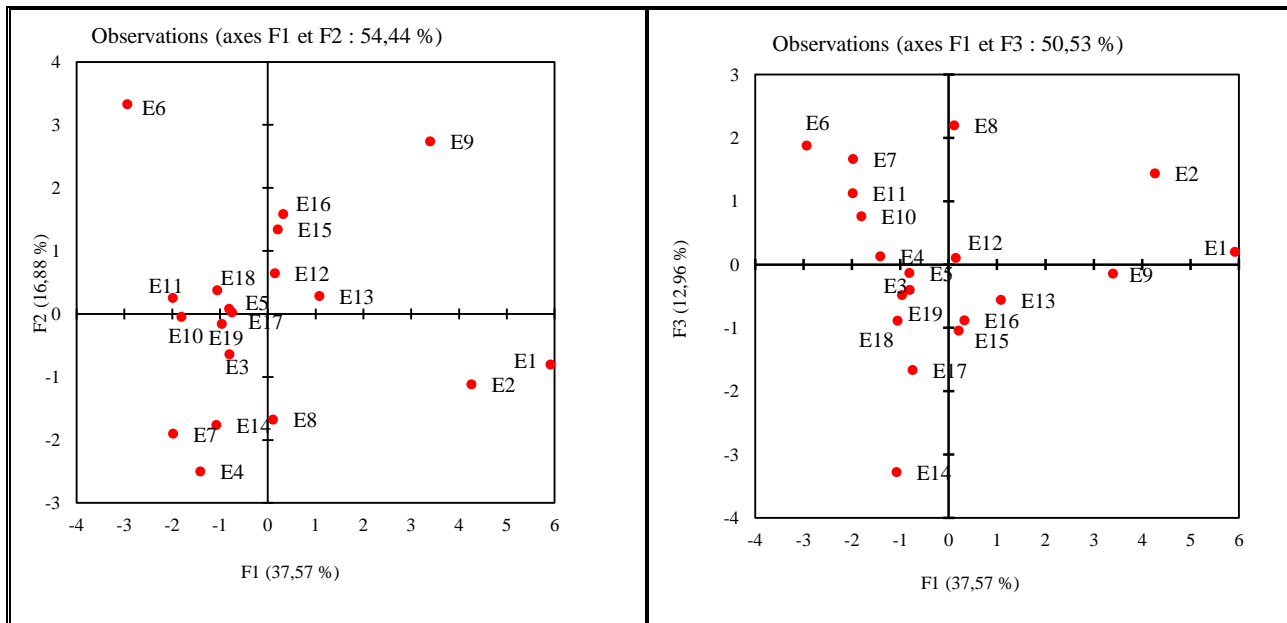


Figure 30. Répartition des échantillons sur le plan factoriel (campagne octobre 2011).

**Tableau 15.** Corrélation entre les variables et les facteurs  
(campagne janvier 2011)

	F1	F2	F3
CE	<b>0.968</b>	0.037	-0.096
pH	-0.061	<b>0.750</b>	0.383
Eh	0.246	-0.057	<b>0.730</b>
T°C	-0.208	0.491	-0.260
Cl <sup>-</sup>	<b>0.873</b>	0.399	-0.057
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.472	<b>-0.650</b>	-0.174
Mg <sup>++</sup>	<b>0.675</b>	-0.534	-0.192
Ca <sup>++</sup>	<b>0.729</b>	0.126	0.068
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	<b>0.734</b>	-0.016	0.096
Na <sup>+</sup>	<b>0.910</b>	0.275	-0.007
K <sup>+</sup>	-0.391	-0.136	<b>0.500</b>
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.186	<b>-0.658</b>	0.172
Br <sup>-</sup>	-0.367	0.224	-0.703

**Tableau 16.** Corrélation entre les variables et les facteurs  
(campagne mai 2011)

	F1	F2	F3
CE	<b>0.967</b>	-0.071	0.163
pH	-0.075	<b>-0.776</b>	0.069
Eh	-0.095	0.039	<b>0.777</b>
T°C	-0.093	<b>-0.752</b>	0.273
Cl <sup>-</sup>	<b>0.875</b>	-0.423	0.150
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.035	<b>0.868</b>	0.109
Mg <sup>++</sup>	<b>0.669</b>	<b>0.466</b>	0.353
Ca <sup>++</sup>	<b>0.776</b>	-0.008	0.171
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	<b>0.755</b>	0.260	0.028
Na <sup>+</sup>	<b>0.870</b>	-0.255	-0.132
K <sup>+</sup>	-0.496	0.063	<b>0.477</b>
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.234	<b>0.750</b>	-0.126
Br <sup>-</sup>	0.470	-0.171	-0.402

**Tableau 17.** Corrélation entre les variables et les facteurs  
(campagne octobre 2011)

	F1	F2	F3
CE	<b>0.947</b>	0.075	0.043
pH	<b>0.484</b>	-0.209	0.249
Eh	-0.283	<b>0.356</b>	0.042
T°C	0.015	-0.382	-0.073
Cl <sup>-</sup>	<b>0.945</b>	-0.011	0.079
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.100	-0.052	-0.204
Mg <sup>++</sup>	<b>0.881</b>	0.063	-0.054
Ca <sup>++</sup>	<b>0.763</b>	0.040	-0.025
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.123	<b>0.756</b>	0.029
Na <sup>+</sup>	<b>0.946</b>	0.003	-0.075
K <sup>+</sup>	-0.057	-0.315	0.258
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.274	-0.234	-0.210
Br <sup>-</sup>	-0.065	-0.217	-0.049



## **Conclusion**

Ce travail qui a consisté à rechercher l'origine de la minéralisation des eaux à partir de la combinaison de deux méthodes (étude géochimique et l'étude statistique multivariées) et a permis d'apporter des réponses à notre problématique.

L'analyse statistique multivariée des données hydrochimiques, a permis d'identifier trois principaux mécanismes qui sont responsables de l'évolution de la minéralisation des eaux de la zone. Le processus de salinisation est de loin le processus principal. Le mécanisme à la base de la minéralisation en éléments majeurs des eaux est le phénomène de dissolution/précipitation des formations évaporitiques et carbonatées concentrées par évaporation. Les processus de second ordre seraient le phénomène d'échange ionique et les processus d'oxydoréduction, indique que des processus de sulfato-réduction ont lieu. L'enrichissement en bicarbonates est lié à l'augmentation du pH suite au dégazage du CO<sub>2</sub>.

## CHAPITRE VI. APPROCHE GEOCHIMIQUE DES EAUX

Ce chapitre aborde la géochimie des eaux superficielles et souterraines du lac Fetzara, afin d'identifier à partir de l'étude des éléments majeurs et les bromures, les faciès chimiques des eaux ainsi que les principaux processus intervenant dans la minéralisation et de déterminer leurs origines.

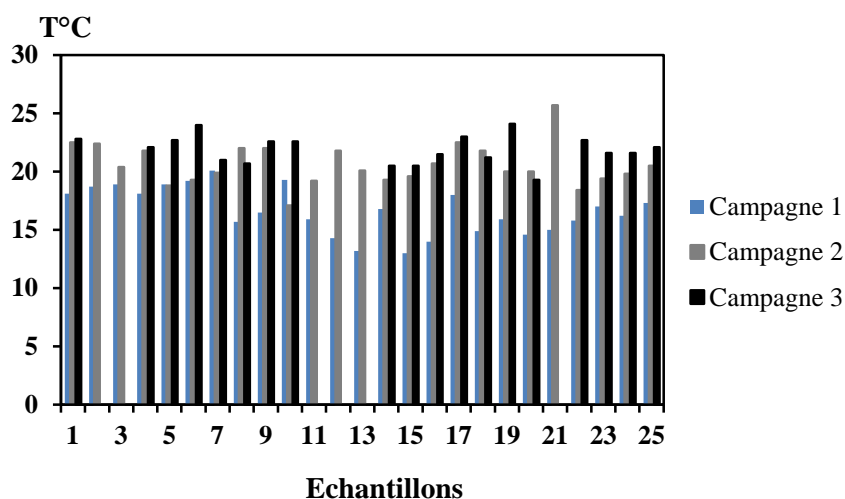
### 1. Les paramètres physico-chimiques

Ces paramètres sont au nombre de quatre et sont mesurés sur le terrain, il s'agit de la température ( $T$  °C), du potentiel d'hydrogène (pH), de la conductivité électrique (CE) et du potentiel d'oxydo-réduction (Eh).

#### 1.1. La température ( $T$ °C)

La température moyenne des eaux du lac Fetzara est de 16.61°C (janvier 2011) et 20.60°C (mai 2011) correspondant respectivement à une période fraîche et humide et fin de saison des pluies. En octobre 2011, considérée comme saison chaude et début des pluies, la température des eaux prélevées varie entre 17.1°C et 25.7°C avec une moyenne de 20.60 °C.

Les températures moyennes mesurées reflètent l'influence du climat sur la zone au moment de des prélèvements des échantillons, mais également l'influence de la saison indiquant un équilibre thermique entre l'eau et l'atmosphère.

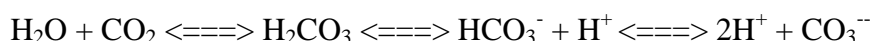


**Figure 31.** Variations de la température des eaux durant les trois campagnes

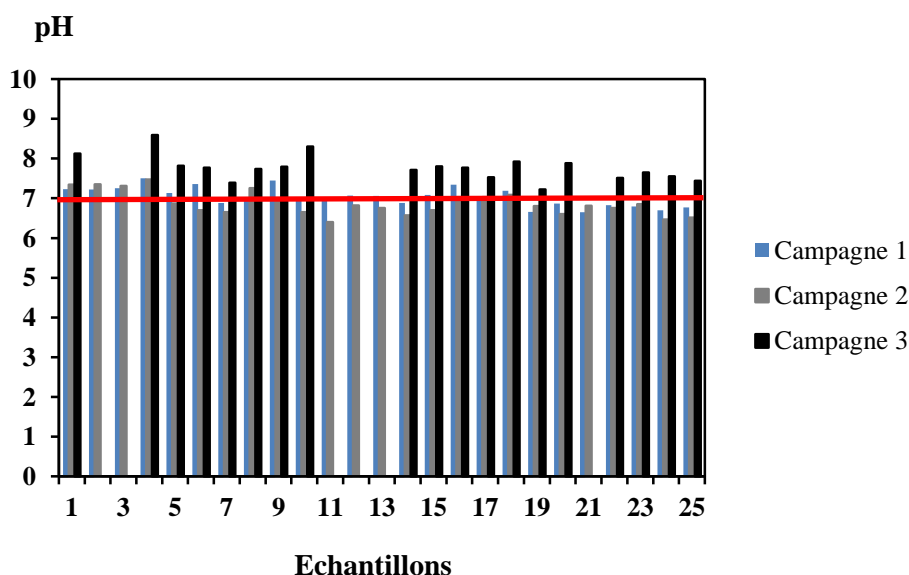
## 1.2. Le potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH de l'eau mesure la concentration des protons  $H^+$  contenus dans l'eau. Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acide carbonique ; il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates (Azzaoui, 1999; El Bliidi et al., 2003). Le système carbonate ( $CO_2$ ,  $H_2CO_3/HCO_3^-/CO_3^{2-}$ ) doit théoriquement jouer un rôle dominant dans la fixation du pH de l'eau (Groleau et al. 2008).

Les valeurs élevées du pH peuvent résulter d'une consommation du  $CO_2$  ou un dégazage qui entraînent une augmentation relative de l'ion  $CO_3^{2-}$ . En effet, la réaction d'hydratation du  $CO_2$  libère de l'acide carbonique qui attaque les roches. L'altération des minéraux conduit à une consommation de  $CO_2$  et induit par conséquent une augmentation du pH (Ahmed Salem, 2012).



La variation des valeurs du pH sont très faibles pour les trois mesures de janvier, mai et octobre 2011. Elles sont comprises entre 6.65 et 7.5 en janvier et 6.4 et 7.47 en mai. Les valeurs observées en octobre 2011 sont légèrement basiques et varient entre 7.22 et 8.59, Ceci est dû à la présence des carbonates. L'acidité de l'eau est liée à la dissociation de l'acide carbonique issu du  $CO_2$  atmosphérique solubilisé dans l'eau et le renouvellement de ce gaz présent dans l'eau.

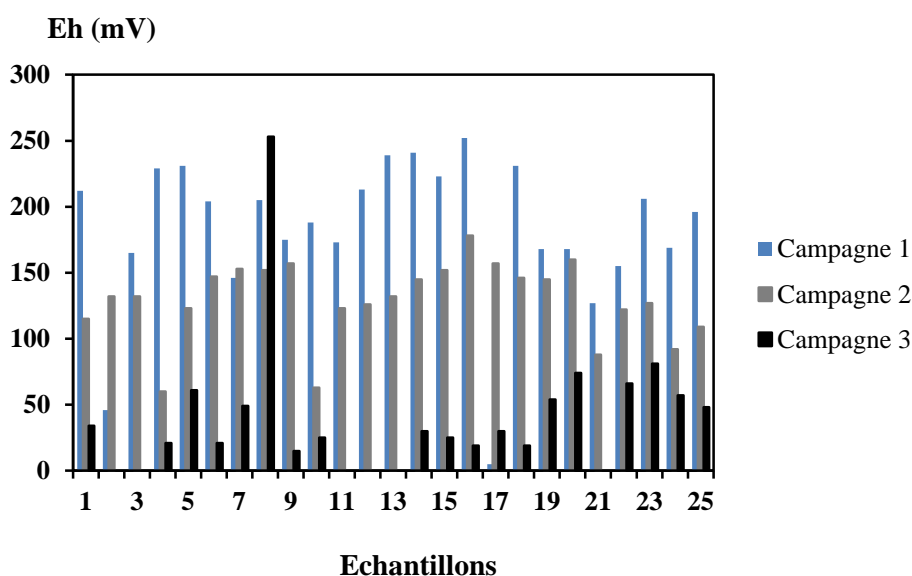


**Figure 32.** Variations du pH des eaux durant les trois campagnes.

### 1.3. Le potentiel d'oxydo-réduction (Eh)

Dans une eau bien oxygénée, les conditions d'oxydation dominent. Quand les concentrations d'oxygène déminent, le milieu devient plus réducteur ce qui se traduit par une réduction du potentiel redox.

Les valeurs faibles du potentiel d'oxydo-réduction correspondent aux périodes de basses eaux et atteignent 15 mV en octobre 2011. Les valeurs élevées s'observent en période des hautes eaux, les plus fortes valeurs atteignent 252 mV. Ceci est dû aux apports des précipitations qui régénèrent l'eau.



**Figure 33.** Variations de Eh des eaux durant les trois campagnes.

### 1.4. La conductivité électrique (CE)

La mesure de la conductivité électrique donne un aperçu sur la minéralisation. Elle accroît avec l'augmentation de la teneur de l'eau en sels dissous.

L'évolution de la conductivité électrique dans les eaux du lac Fetzara est bien visible à l'échelle des saisons où les fortes valeurs s'observent en période d'été, elles atteignent 6.7 mS/cm en mai 2011 et 5.17 mS/cm en octobre 2011 alors que les valeurs les plus faibles se manifestent en janvier 2011, elles sont de l'ordre de 3.5 mS/cm au niveau du point E14.

Par ailleurs, l'évolution de la minéralisation des eaux superficielles et souterraines dans l'espace, montre une très grande variation dans le secteur Est où l'on remarque une valeur de la conductivité électrique de l'ordre de 2.53 mS/cm au niveau du point E2 en

janvier 2011, elle augmente à 3.77 mS/cm au même point en mai, et augmente à 5.17 mS/cm au niveau du point E2.

Au Nord l'évolution de la minéralisation est décroissante, elle varie entre 0.5 et 2.12 mS/cm en janvier et entre 1.24 et 3.07 mS/cm, puis diminue jusqu'à 0.18 mS/cm en octobre 2011.

Au Sud de la zone d'étude, la conductivité électrique étant initialement de 3,5 mS/cm au niveau du point E22 en janvier 2011, puis s'élève à 6.39 mS/cm au point E20 durant la campagne de mai 2011, et atteint 4.23 mS/cm en octobre 2011.

Ainsi, on conclure que les fortes minéralisations se manifestent surtout dans le secteur Est et Sud-Est du lac.

La conductivité électrique est minimale en saison des pluies et maximale en période sèche, ce qui pourrait être expliqué par un phénomène de dilution des eaux par l'augmentation de son volume en saison de pluie.

La minéralisation, concentration des solides totaux dissous (Total Dissolved Solids), synonyme de minéralisation, salinité ou charge totale dissoute (Banton et Bangoy, 1999). Elle est plus importante à l'Est et au Sud du lac. Les figures 34, 35, 36 illustrent les variations des sels dissous (TDS, ou concentration totale de sels dissous) des trois campagnes.

Dans les zones de minéralisation élevée, les concentrations de sodium, de chlorures et des bicarbonates sont aussi importantes.

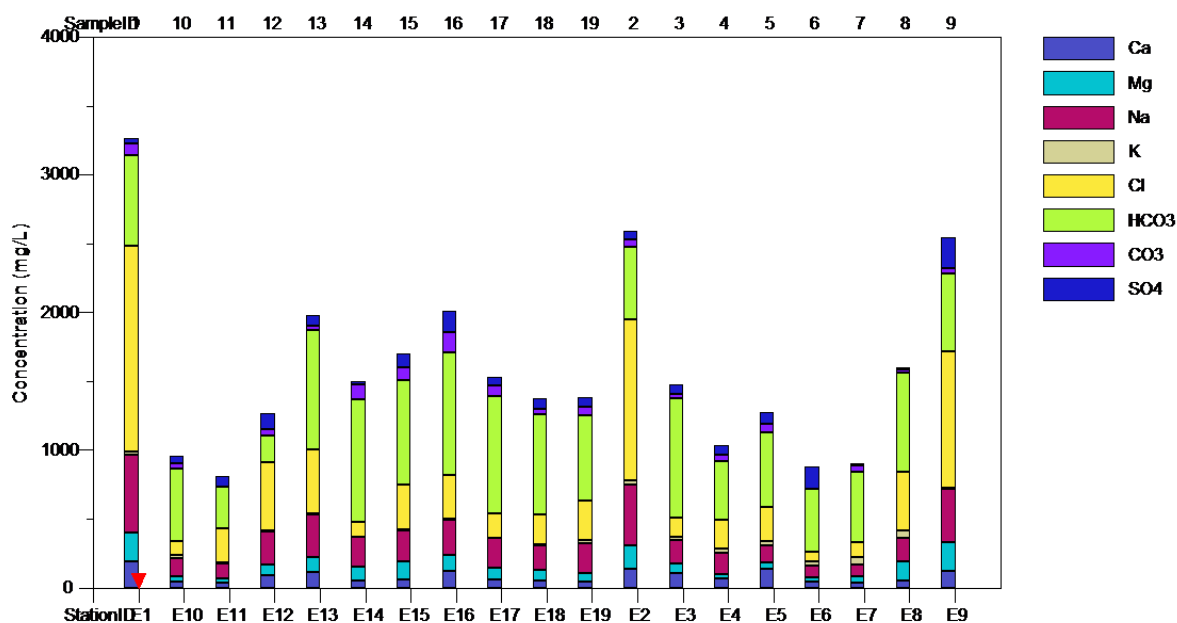


Figure 34. Minéralisation totale des eaux prélevées en janvier 2011

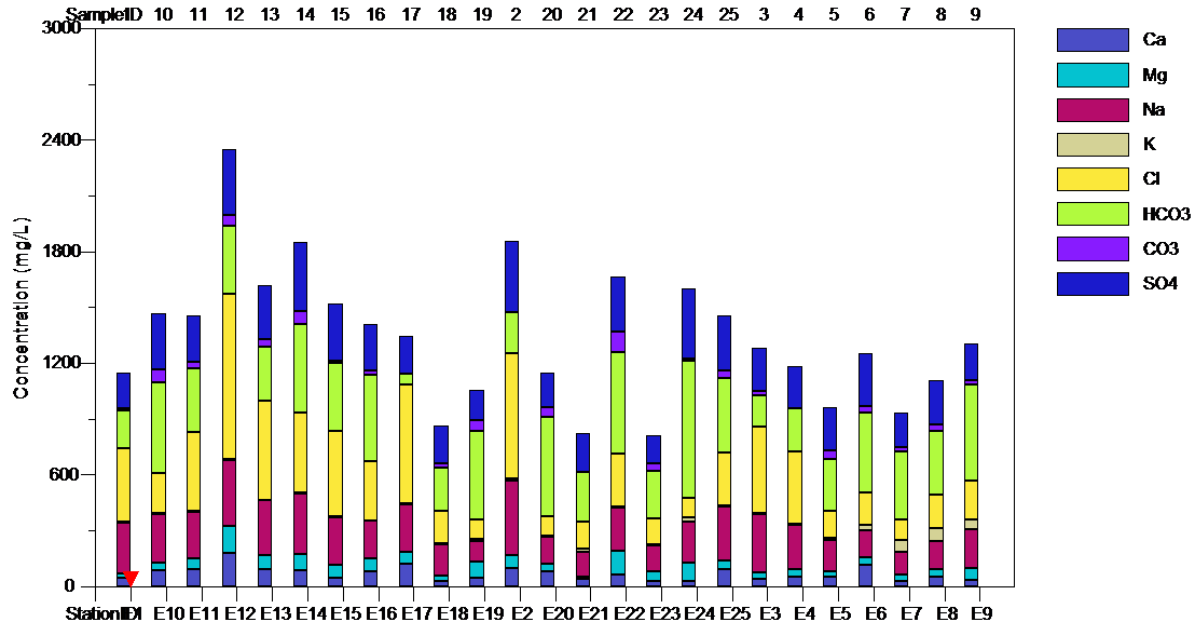


Figure 35. Minéralisation totale des eaux prélevées en mai 2011

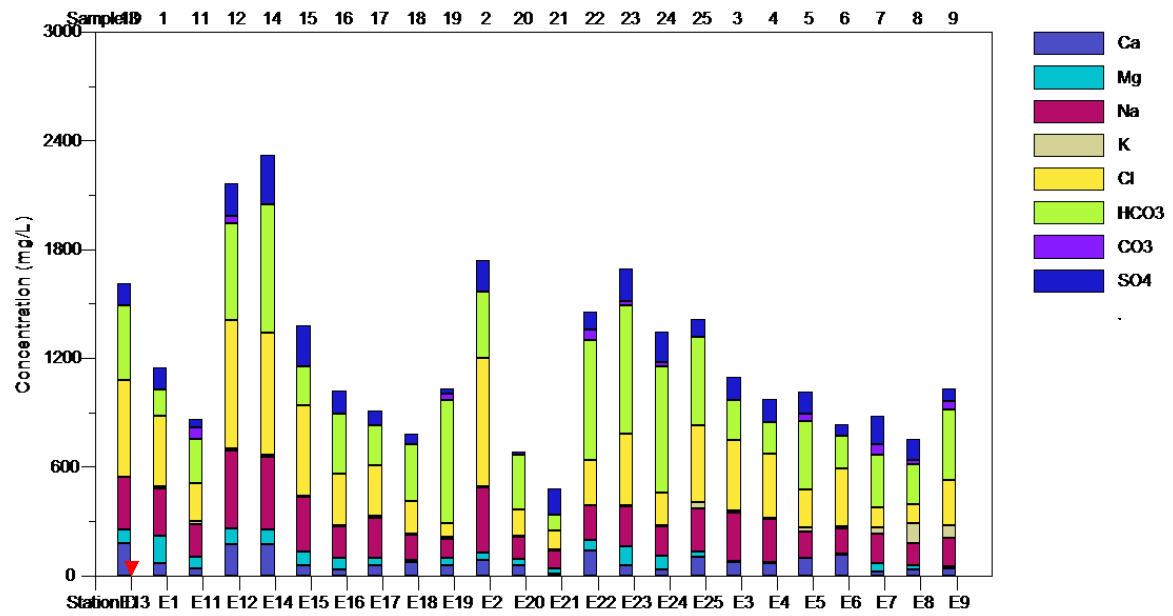


Figure 36. Minéralisation totale des eaux prélevées en octobre 2011.

## 2. Diagrammes interprétatifs

### 2.1. Diagramme de Piper

Afin de mieux comprendre le chimisme des eaux souterraines et superficielles du bassin versant du lac Fetzara, nous avons fait appel à différentes représentations graphiques.

Le diagramme de Piper (1944) est une composante graphique qui permet de visualiser, quantitativement et qualitativement, la composition chimique des eaux. Le procédé consiste à porter les concentrations sur deux triangles (anions et cations) puis à projeter les points représentatifs des échantillons dans un diagramme sous forme de losange qui donne les compositions totales en éléments majeurs et les faciès chimiques des eaux.

Des diagrammes de Piper ont été réalisés pour chacune des trois campagnes afin de déterminer le faciès géochimiques des eaux. En comparant les trois diagrammes de Piper, on s'aperçoit que le faciès géochimique des eaux est bien conservé entre les trois campagnes de prélèvements. La représentation des concentrations en éléments majeurs sur le diagramme de Piper, montre que les eaux échantillonnées sont généralement du type chloruré-sodique à bicarbonaté-sodique.

Le faciès chloruré-sodique, fréquent dans les milieux riches en évaporites (exemple: halite [NaCl]) et le faciès bicarbonaté-sodique se trouvent dans certains aquifères des bassins sédimentaires et témoignent d'interaction eau-roche (échange  $\text{Ca}^{++}$  contre  $\text{Na}^+$  sur des argiles) (Bourhane, 2010).

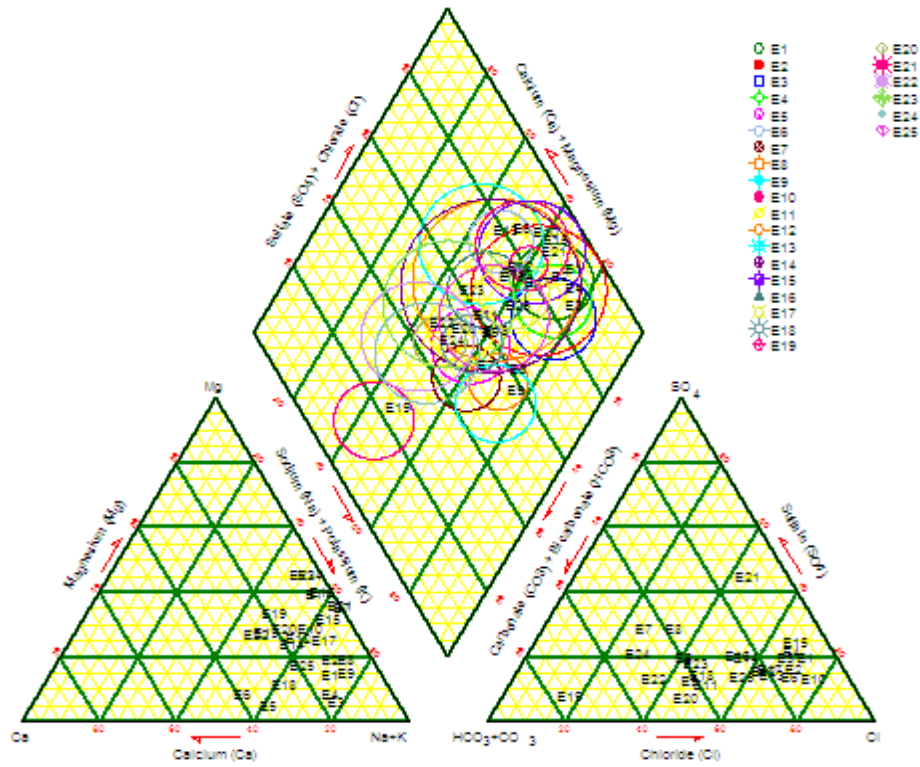


Figure 37. Diagramme de Piper des eaux prélevées en janvier 2011.

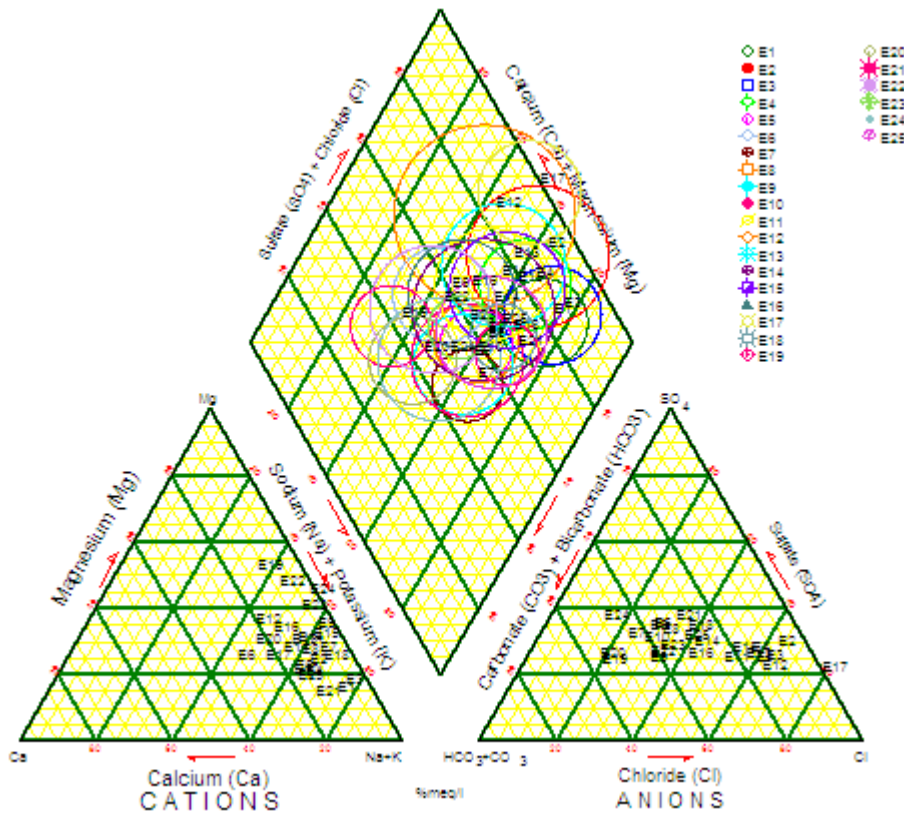
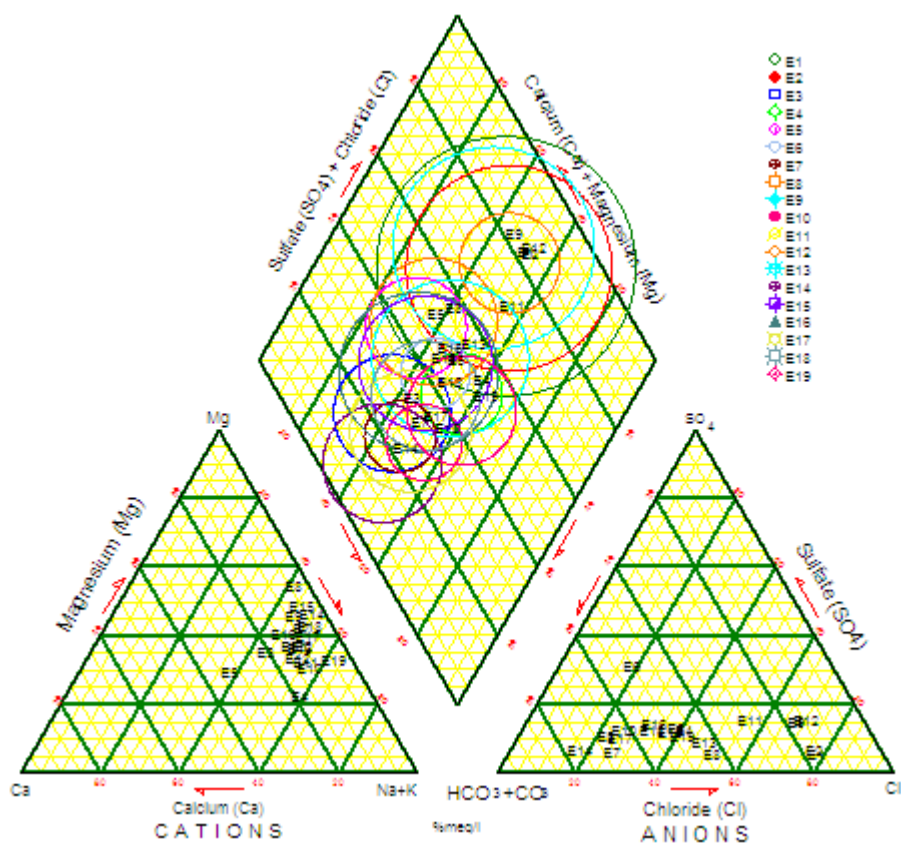


Figure 38. Diagramme de Piper des eaux prélevées en mai 2011.





**Figure 39.** Diagramme de Piper des eaux prélevées en octobre 2011.

## 2.2. Diagramme de Durov

Le diagramme de Durov (1948), construit sur la base des teneurs relatives (en meq/l) des ions majeurs en solution permet de visualiser la distribution des compositions des échantillons. Ce graphique permet de distinguer facilement les échantillons de  $(\text{Na}^+ - \text{Ca}^{++}) - \text{HCO}_3^-$  de ceux de type  $(\text{Na}^+ - \text{Ca}^{++}) - \text{Cl}^-$ , respectivement nommés le type bicarbonaté et chloruré (Gasscoyne et Kamineni, 1994; Toth, 1999).

Le pourcentage des cations majeurs ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^{++}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Mg}^{++}$ ) et des anions majeurs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{--}$ ) sont tracés respectivement sur deux triangles distincts, puis projetés sur une grille carrée unique à la base de chaque triangle et la minéralisation de chaque échantillon.

Des diagrammes de Durov ont été réalisés pour chacune des trois campagnes afin de déterminer le faciès géochimique des eaux. En comparant les trois diagrammes de Durov, on s'aperçoit que le faciès géochimique des eaux est bien conservé entre les trois campagnes. Les eaux du bassin versant du lac Fetzara ont deux faciès chimiques: chloruré-sodique ( $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ ) et bicarbonaté-sodique ( $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ ).

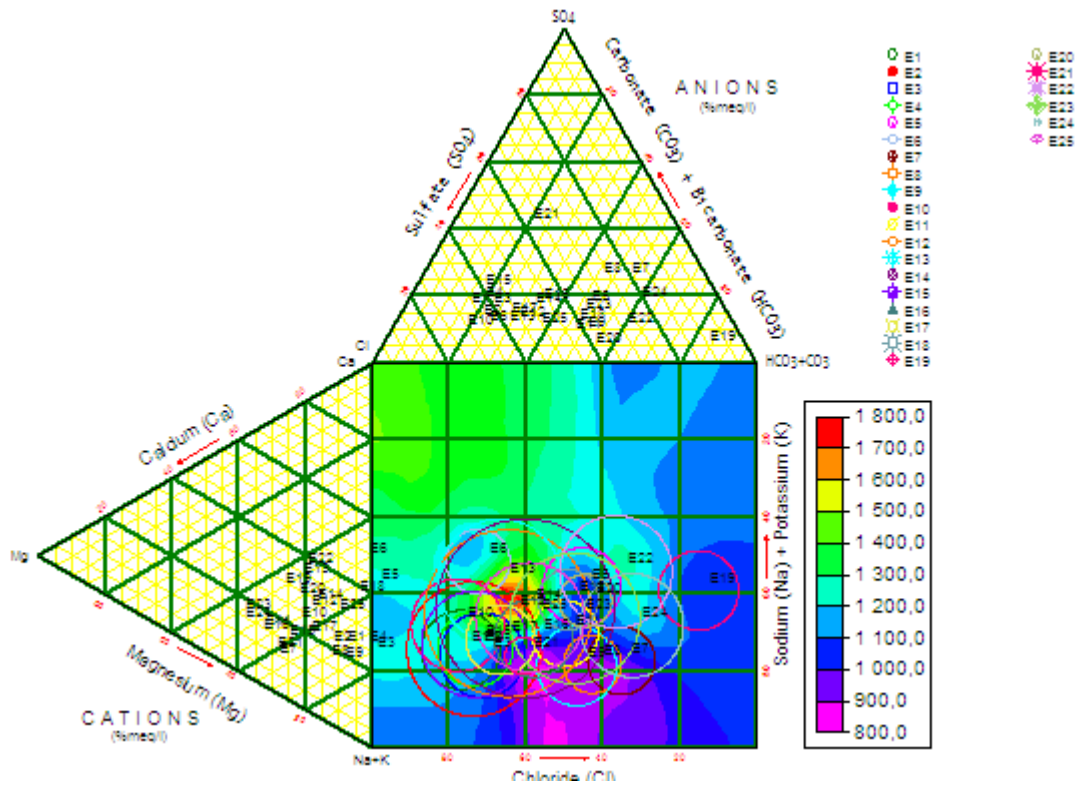


Figure 40. Diagramme de Durov des eaux prélevées en janvier 2011.

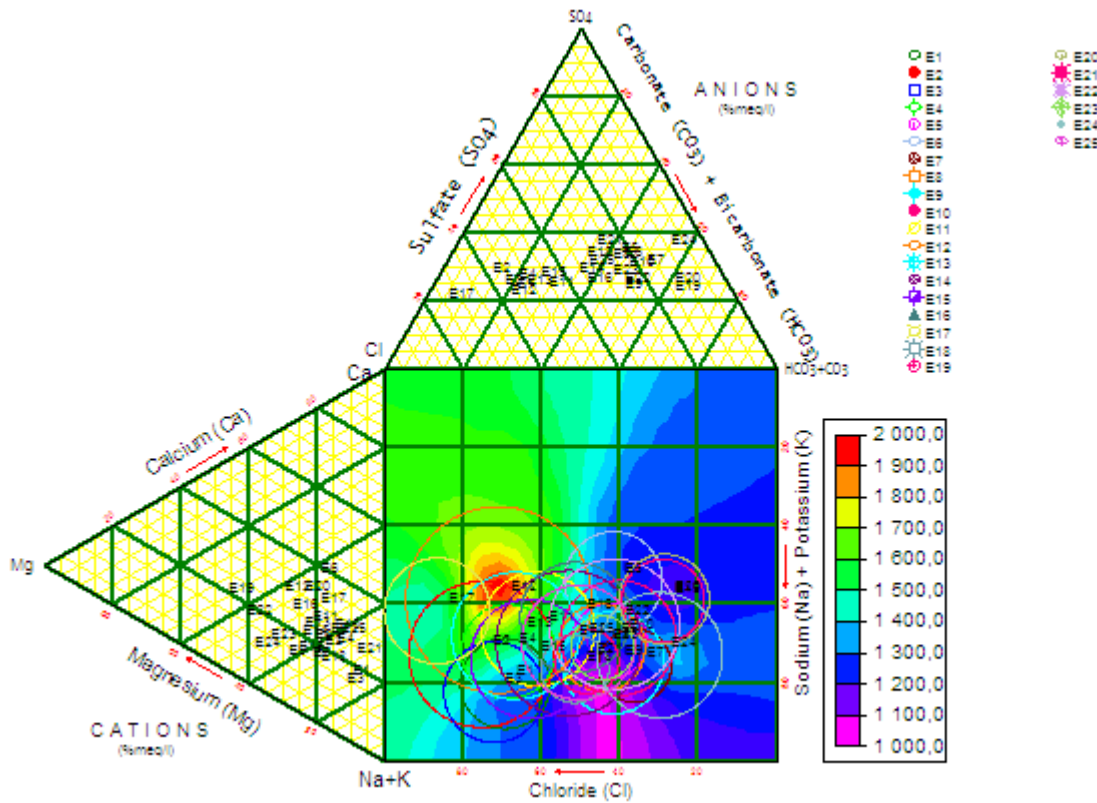


Figure 41. Diagramme de Durov des eaux prélevées en mai 2011.

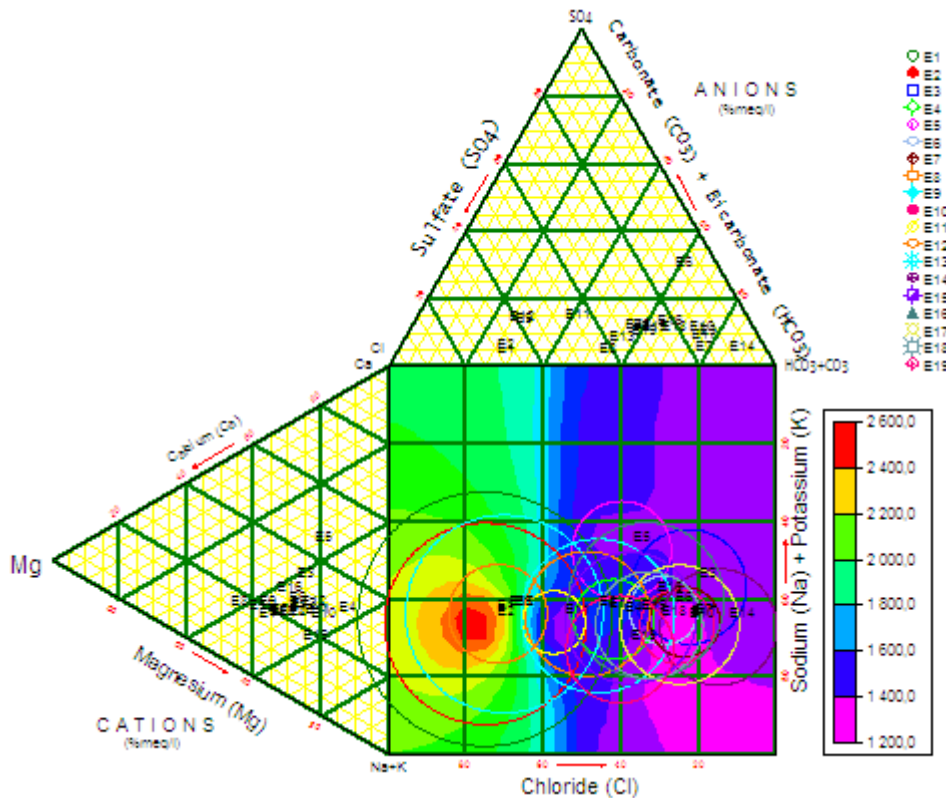


Figure 42. Diagramme de Durov des eaux prélevées en octobre 2011.

### 3. Indice de saturation (IS)

Dans le but d'expliquer les mécanismes d'acquisition de la minéralisation, nous avons utilisé le logiciel « Diagramme » pour déterminer les indices de saturation de quelques minéraux spécifiques. Les trois campagnes de l'année 2011 ont fait l'objet de cette application.

Les indices de saturation sont utilisés pour évaluer le degré d'équilibre entre l'eau et le minéral afin de mettre en évidence les différents stades de l'évolution géochimique des eaux qui se traduisent par une variation de ces indices.

La connaissance des saturations des eaux vis-à-vis de certains minéraux permet de dire sous quelles formes chimiques certains éléments sont transportés dans les solutions.

L'utilisation de ces indices (précipitation/dissolution) est utile pour déterminer l'environnement géologique dans lequel percolent des eaux. Les IS sont définies par (Chapelle, 1993):

$$IS = \log\left(\frac{PAI}{KI}\right)$$

Avec:

PAI: Produit d'Activité Ionique.

KI: Produit de solubilité de l'espèce minérale considérée.

Le degré de saturation, de sous-saturation ou l'état d'équilibre d'une solution vis-à-vis d'un minéral n'est apprécié que si l'on peut comparer le produit de solubilité au produit d'activité ionique des ions de référence dans la solution (Droubi, 1976; Droubi et al., 1978).

La valeur  $IS = 0$  indique un état d'équilibre entre l'eau et le minéral (saturation). Une valeur négative signifie une sous-saturation et positive la sursaturation. Quand une solution est sous-saturée à l'égard d'un minéral, cela signifie que le minéral a tendance à la dissolution (Ait Brahim, 2012).

Durant la première campagne (janvier 2011) et la deuxième campagne (mai 2011) tous les échantillons présentent une sous-saturation vis-à-vis de la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), aragonite ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomite  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , gypse ( $\text{CaCO}_3, 2\text{H}_2\text{O}$ ), et une légère sous-saturation vis-à-vis de l'halite ( $\text{NaCl}$ ) et par conséquent, une éventuelle dissolution de ces minéraux peut contribuer à l'acquisition de la charge saline des eaux. La dissolution de l'halite est confirmée à travers la relation proportionnelle entre les ions chlorures et sodium.

Les résultats ainsi obtenus pendant la troisième campagne (octobre 2011) indiquent, une sous-saturation par rapport au gypse à l'halite et à l'anhydrite et une sursaturation par rapport à la dolomite, à l'aragonite et à la calcite et par conséquent une éventuelle précipitation de ces minéraux.

La dissolution de l'halite a pour conséquence l'augmentation de la concentration des ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  et la dissolution du gypse a pour conséquence une élévation des concentrations des ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{SO}_4^{--}$ .

Il ressort de cette analyse que la plupart des eaux dans la zone d'étude, sont sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques (halite, gypse et anhydrite) en toutes saisons et sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés (calcite, aragonite et dolomite) en saison sèche et sous-saturées après la saison pluvieuse.

Cette saturation est accentuée par la concentration et le processus d'évaporation durant la saison sèche. Il faut également signaler que durant cette période, l'eau est soumise à une

forte insolation et les solutions se concentrent par évaporation. Lorsque les produits de solubilités des ions carbonatés et alcalino-terreux sont atteints; ces ions précipitent les premiers. Ces phénomènes seraient pour la plupart responsables de la diminution des concentrations en ions alcalino-terreux observées durant la saison sèche.

Ainsi, après la saison pluvieuse, les indices de saturation deviennent négatifs; ils sont très probablement dus aux mélanges entre les eaux de recharge (pluie, eaux d'engorgement et d'infiltration) sous-saturées et les eaux du lac à l'équilibre ou légèrement sursaturées.

Les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation, même avec des ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  à fortes concentrations dans l'eau. La constante d'équilibre des minéraux évaporitiques [ $\text{NaCl}$  (1.58);  $\text{CaSO}_4$  (-4.85)], d'où une tendance à la dissolution de ces minéraux. Ce qui permet aux éléments évaporitiques de se présenter dans l'eau à des concentrations élevées. Par contre pour les minéraux carbonatés, la constante d'équilibre est plus faible [dolomite (-17.09), calcite (-8.48)], ce qui produit une précipitation rapide des éléments chimiques.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seuls les minéraux carbonatés tendent à précipiter, surtout sous la forme de dolomite, de calcite et aragonite. Alors que les minéraux évaporitiques, en l'occurrence, l'halite, le gypse et l'anhydrite, tendent à la dissolution.

En définitive, les processus de concentration par évaporation, de dissolution/précipitation des minérales calcites et évaporitiques et de dilution après la saison pluvieuse, sont responsables des variations saisonnières de la chimie des eaux.

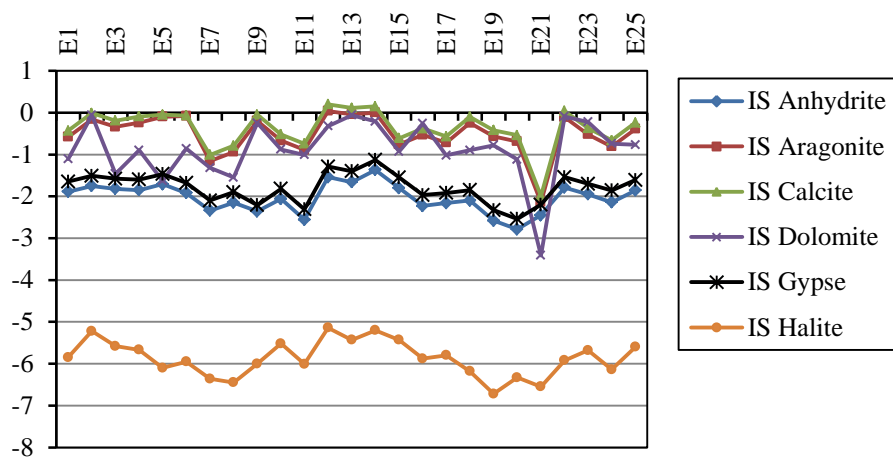


Figure 43. Indice de saturation (IS) (campagne janvier 2011).

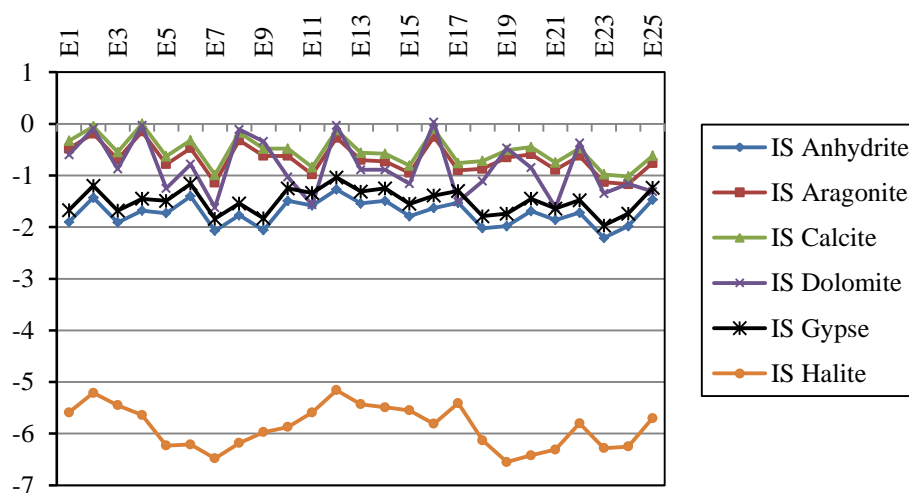


Figure 44. Indice de saturation (IS) (campagne mai 2011)

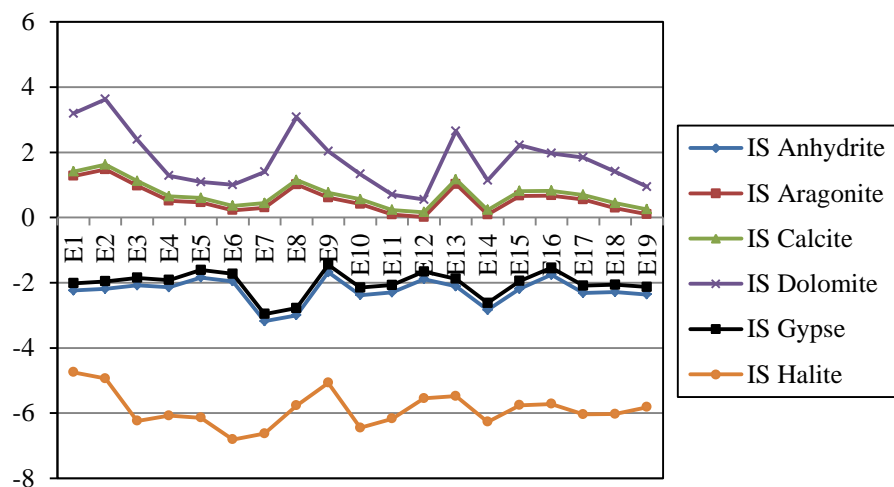


Figure 45. Indice de saturation (IS) (campagne octobre 2011).

## 4. Relations ions-chlorures

### 4.1. Relation $\text{Na}^+$ - $\text{Cl}^-$

Ces deux éléments chimiques dans les eaux naturelles sont souvent liés à la dissolution de l'halite ( $\text{NaCl}$ ) (Maouni, 2007). L'évolution de  $\text{Na}^+$  est étudiée en fonction des teneurs en chlorure, car ce dernier est considéré comme un traceur stable et conservatif des évaporites, très soluble, entrant rarement dans les précipitations salines, n'intervenant pas dans les phénomènes d'oxydo-réduction et peu influencé par l'intervention des bactéries (Debièche, 2002).

Le sodium et les chlorures présentent un coefficient de corrélation élevé et l'alignement des points suivant la droite de corrélation montre que le  $\text{Na}^+$  est majoritairement lié aux  $\text{Cl}^-$ . Ceci implique la même origine des deux éléments chimiques qui est la dissolution de l'halite. Cette relation se confirme par l'existence du faciès chloruré-sodique.

En analysant la relation entre  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ , il apparaît que certains points d'eau se trouvent sur la droite 1 indiquant un simple processus de dissolution de l'halite sans réaction d'échanges ioniques. Par contre, les points d'eau qui se situent au-dessous de la droite de la dissolution de l'halite indiquent un appauvrissement en sodium, ces eaux sont contrôlées surtout par des réactions d'échange cationique. Etant donné que la teneur en sodium devrait équilibrer la teneur en chlorures, le déficit en  $\text{Na}^+$  est expliqué par le phénomène d'échange ionique traduit par une adsorption de  $\text{Na}^+$  et une libération de  $\text{Ca}^{++}$ .

On observe un excès des teneurs en sodium par rapport à la pente 1, cela s'explique par l'existence d'une autre origine pour les ions sodiques qui a fait accroître la concentration du sodium par rapport à celle des chlorures. Cet apport supplémentaire pourrait provenir de l'altération des silicates sodiques. Mais, vu que cet excès en  $\text{Na}^+$  est accompagné par un déficit en  $\text{Ca}^{++}$  par rapport à  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{--}$ , l'augmentation des teneurs en  $\text{Na}^+$  peut s'expliquer par un échange de base lié aux minéraux argileux qui fixent un ion  $\text{Ca}^{++}$  après libération de deux ions  $\text{Na}^+$ .

L'alignement des points suivant la droite de corrélation montre que le  $\text{Na}^+$  est majoritairement lié aux  $\text{Cl}^-$ . Ceci implique la même origine des deux éléments chimiques. Quelques points présentent un excès de sodium, d'autres un excès des chlorures.

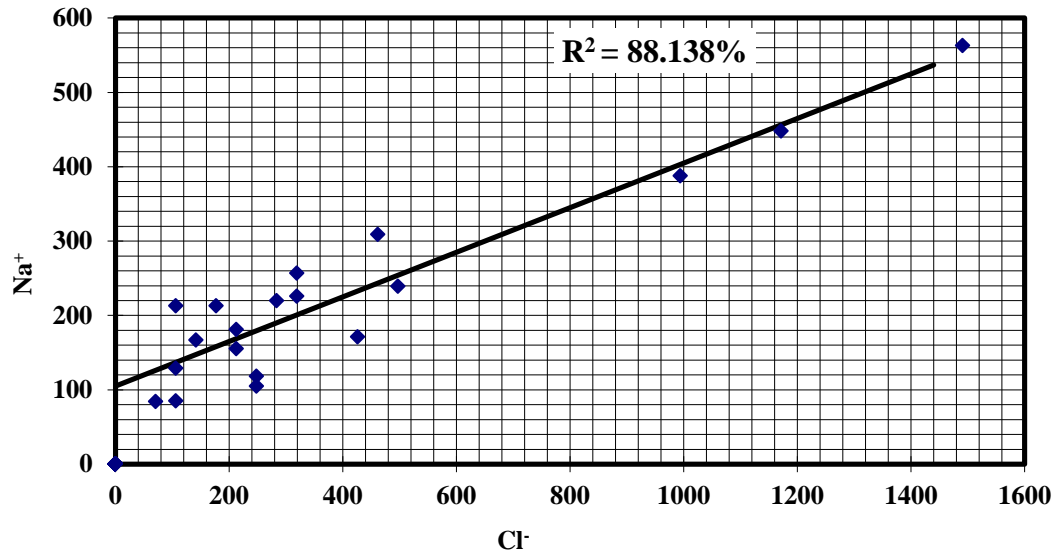


Figure 46. Relation sodium-chlorures (campagne janvier 2011).

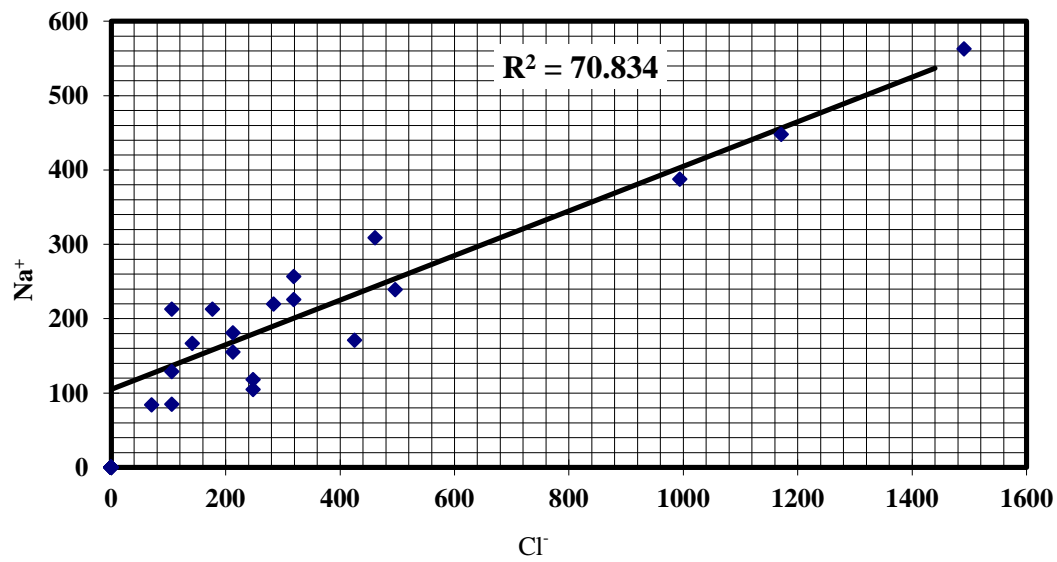


Figure 47. Relation sodium-chlorures (campagne mai 2011).



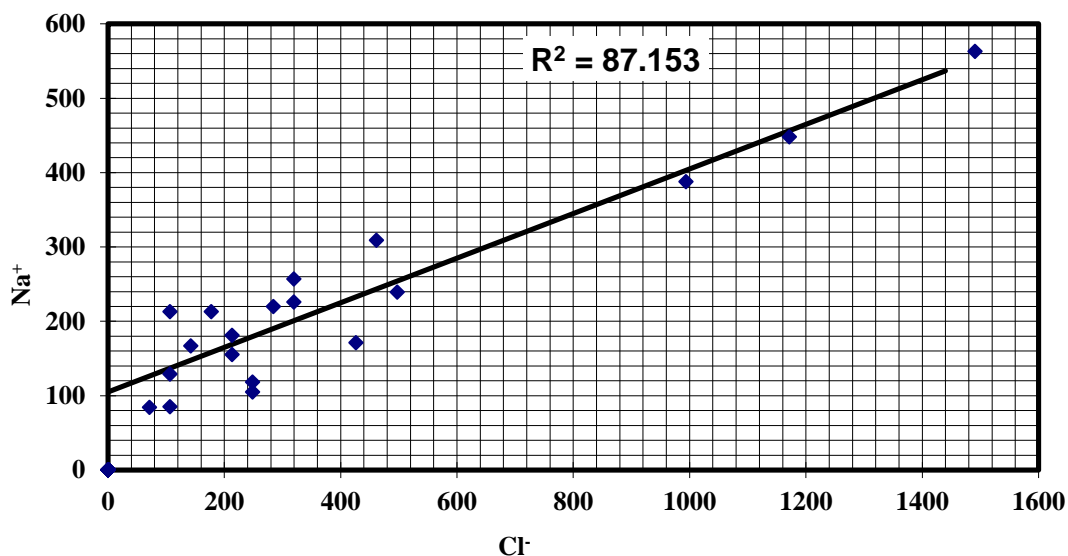


Figure 48. Relation sodium-chlorures (campagne octobre 2011).

Tableau 18. Rapport  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  des eaux du lac Fetzara (résultats en meq/l).

E= Echantillon	$\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ (janvier 2011)	$\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ (mai 2011)	$\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ (octobre 2011)
E1	1.043	1.071	0.978
E2	0.972	0.918	Point sec
E3	1.063	1.057	Point sec
E4	1.017	0.957	0.982
E5	1.051	1.772	1.176
E6	0.962	1.235	0.928
E7	2.319	1.768	0.975
E8	1.892	1.313	1.183
E9	0.950	1.482	0.998
E10	0.964	1.870	0.901
E11	1.283	0.913	Point sec
E12	0.937	0.914	Point sec
E13	0.899	0.898	Point sec
E14	0.918	1.181	0.990
E15	0.929	0.956	1.211
E16	0.967	0.976	0.923
E17	1.190	0.918	0.981
E18	1.209	1.435	0.970
E19	2.239	1.536	2.000
E20	1.337	2.058	0.907
E21	1.377	1.489	Point sec
E22	1.205	1.272	0.904
E23	0.970	1.544	1.200
E24	1.417	3.203	0.950
E25	0.917	1.071	0.975

#### 4.2. Relation Br<sup>-</sup>-Cl<sup>-</sup>

Le brome et le chlore sont des traceurs conservatifs dans les environnements aqueux naturels : ils ne participent pas aux réactions d'oxydo-réduction et ils ne forment pas de précipités insolubles (Fetter, 1993).

L'hydrogéochimie des bromures a été utilisée sur les eaux salées et les saumures qui s'enrichissent en brome pendant la précipitation de l'halite (Poutoukis 1991; Collins, 1975). L'appauvrissement ou l'enrichissement en bromures est alors utilisé comme indicateur d'une contribution des évaporites pauvres en brome (Rittenhouse, 1967; Rittenhouse et al., 1969).

Quand les deux ions proviennent exclusivement de l'intrusion de l'eau de mer, le rapport des concentrations molaires Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> reste similaire à celui de l'eau de mer: 1.5 à 1.7‰ (Morell et al., 1986).

Certains travaux (Richter et Kreiter, 1993; Edmunds, 1996; Andreasen et Fleck, 1997; Fisher et Mullican, 1997) montrent que l'eau de pluie présente un rapport Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> similaire ou même élevé par rapport à celui de l'eau de mer, cette dernière et l'eau de pluie côtière ont un rapport semblable autour 0.0015 dans des pays méditerranéens (Jones et al., 1999; Vengosh et al., 1999).

Pour des eaux à salinité élevée, un rapport Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> faible (inférieur à celui de l'eau de mer) met en évidence une source de salinité riche en chlorures et pauvre en bromures (évaporites, fertilisants agricoles, eaux usées, etc...).

Une contribution de dissolution évaporite mène à un rapport molaire Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> bas (Cartwright et al., 2006; Ghabayen et al., 2006), tandis que les sources d'anthropogénique donnent un rapport molaire autour de 0.0005 pour des suintements d'eaux usées ou autour de 0.02 pour des flux de retour d'agriculture (Andreasen et Fleck, 1997; Vengosh et al., 1999; Ghabayen et al., 2006).

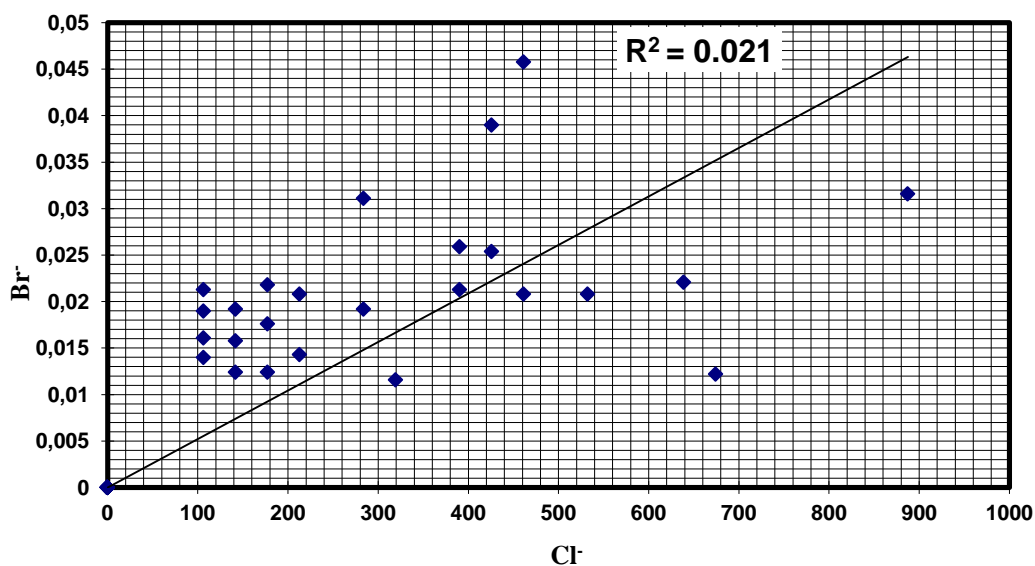
Les eaux analysées présentent des teneurs en bromures très faibles par rapport à l'eau de mer. Les concentrations en Br<sup>-</sup> varient entre 0.012 et 0.097 mg/l pour la première campagne et entre 0.015 et 0.088 mg/l pour la deuxième campagne et comprises entre 0.012 et 0.094 mg/l pour la troisième campagne.

La représentation de la relation entre chlorures et bromures pour les échantillons d'eau prélevée dans les différents secteurs de la région d'étude (variation des bromures en fonction des chlorures) montrent une dispersion des points, indiquant que les deux éléments chimiques ont des origines différentes.

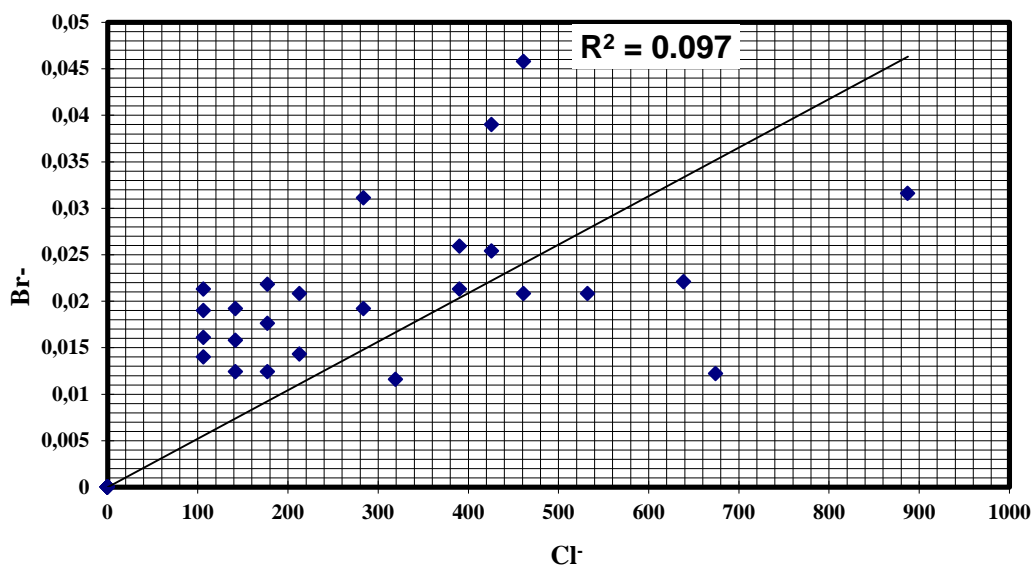
L'ensemble des eaux qui ont été analysées présentent un rapport  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$  variable et de distribution aléatoire. Aucune relation n'est mise en évidence entre les valeurs des bromures et des chlorures.

Les rapports molaires  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$  dans les eaux du lac Fetzara sont tous inférieurs à celui de l'eau de mer, indiquant un excès des chlorures, ce qui met en évidence une source des chlorures autre que la mer (forte évaporation, dissolutions des évaporites).

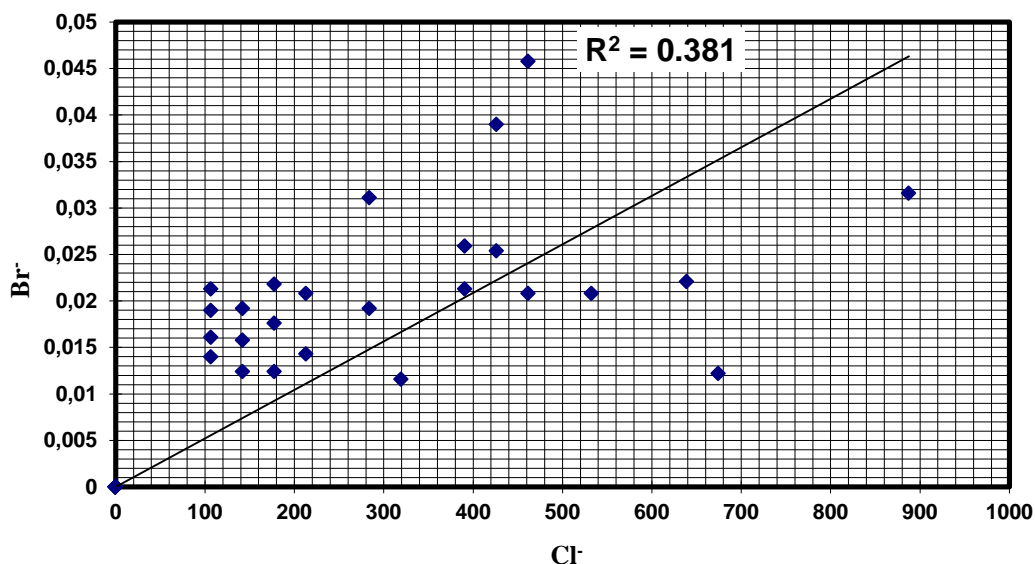
Un faible rapport  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$  inférieur par rapport à celui de l'eau de mer suggère une présence de dissolution des sels chlorurés, l'halite par exemple, qui est le seul sel chloruré à posséder un rapport  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$  plus faible que celui de l'eau de mer.



**Figure 49.** Relation chlorures-Bromures (campagne janvier 2011).



**Figure 50.** Relation chlorures-bromures (campagne mai 2011).



**Figure 51.** Relation chlorures-bromures (campagne octobre 2011).

## 6. Aptitude des eaux à l'irrigation

L'évaluation de la qualité des eaux utilisées pour l'irrigation à l'échelle proposée par Durand, (1950) et FAO (1971) pour les sols irrigués en Algérie, montre que la plupart des eaux sont très salées. Pour que cette eau soit utilisable, il faut que le taux de  $\text{Na}^+$  soit inférieur à 60%. Cette valeur représente le seuil maximum admissible pour l'usage agricole (Benziane et al., 2012).

Les eaux souterraines du bassin versant du lac Fetzara représentent l'une des principales ressources pour l'irrigation des terres agricoles à la périphérie du lac.

Dans la zone située à l'Est du lac Fetzara, les terres cultivées alternent principalement entre la céréaliculture en sec et la tomate industrielle. Au Nord du lac Fetzara, zone généralement inondée pendant l'hiver, les terres sont laissées comme pâturage, toutefois dans certaines parcelles on y cultive du maraîchage à cycle court.

Au Sud et à l'Ouest du lac, les terres sont cultivées en céréales ou fourrages; alors qu'autour des quelques points d'eau (puits et retenues), ce sont la tomate industrielle et la pastèque qui sont cultivées; il est difficile de prévoir une culture en saison sèche et d'améliorer la productivité en l'absence d'irrigation.

L'eau destinée à l'irrigation doit présenter des caractéristiques physico-chimiques tolérables par les plantes.

Une grande quantité d'ions sodium dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration (Chen et Banin, 1975; Ayers et Westcot, 1976; Frenkel et al., 1978; Hardy et al., 1983; Miller et Donahue, 1995; Hanson et al., 1999; Falstad, 2000; Bauder et Brock, 2001). Ceci est dû au fait que le sodium présent dans le sol en forme échangeable remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les argiles de sol et provoque la dispersion des particules dans le sol, c'est-à-dire si le calcium et le magnésium sont les cations prédominants adsorbés sur le complexe d'échange du sol, ce dernier tend à être facilement cultivé et avec une structure perméable et granulaire. Cette dispersion a comme conséquence l'altération des agrégats des sols. Le sol devient alors dur et compact (lorsqu'il est sec) réduisant les vitesses d'infiltration de l'eau et d'air, affectant ainsi sa structure. Ce problème est également relié avec plusieurs facteurs tels que le taux de salinité et le type de sol. Par exemple, les sols sableux ne subiront pas de dommage si facilement en comparaison aux sols lourds quand ils sont irrigués avec une eau à SAR élevé. L'index utilisé est le rapport de sodium adsorbé (SAR) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et magnésium.

Dans le but d'étudier la qualité des eaux pour l'irrigation, nous avons fait recours à la méthode de Richards (1954). Il met en évidence différentes classes d'eaux définies sur la base du taux de sodium adsorbé (S.A.R) et sur la concentration en sels solubles de l'eau représentée par la conductivité électrique (en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ou  $\text{mS}/\text{cm}$  à  $25^\circ\text{C}$ ). Le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR qui est défini par la relation:

$$\text{Sodium Adsorption Ratio, SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}} \quad (\text{Résultats en meq/l})$$

La méthode la plus utilisée pour qualifier les eaux d'irrigation est une représentation graphique de la conductivité électrique en fonction du SAR.

Après avoir reporté tous les points d'eau des différentes campagnes sur le diagramme de Richards (figures: 52, 53, 54), selon la conductivité électrique et la valeur du SAR, on a pu dégager la présence des six classes d'eaux qui sont les suivantes:

- **C2S1:** Elle caractérise une eau bonne pour l'irrigation et pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour les plantes moyennement tolérantes aux sels. Cette classe représente les eaux de faible minéralisation que l'on rencontre au Nord du lac. Cette classe n'existe que dans la première campagne (année 2011) et avec un faible pourcentage.
- **C3S1, C3S2:** En général, eaux convenant à l'irrigation de cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. La majorité des puits appartenant à la classe C3S1 se situent au Sud du lac.
- **C4S1, C4S2:** Représentent des eaux médiocres fortement minéralisées, susceptibles de convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés. Les eaux des deux premières campagnes présentent, en générale, les mêmes classes.
- **C4S3:** Eau de qualité mauvaise, ne convient généralement pas à l'irrigation, mais peut être utilisée sous certaines conditions pour des sols très perméables avec un bon lessivage et aux plantes très tolérantes aux sels (choux, betterave...).

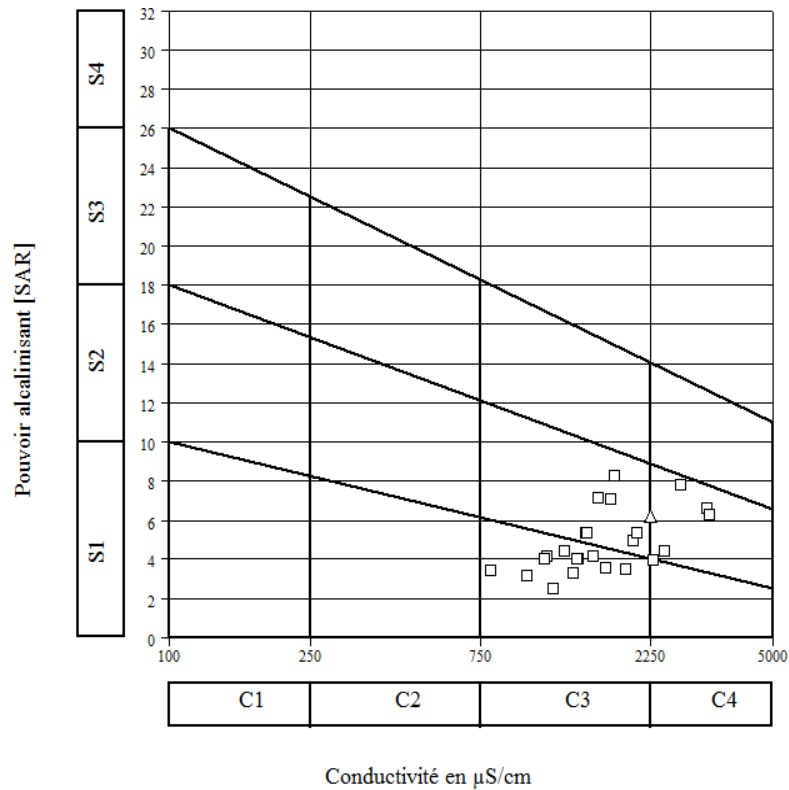
L'utilisation de ces eaux pour l'irrigation sur de longues périodes peut avoir des conséquences négatives non seulement sur les sols et leur productivité, mais aussi sur la qualité de l'eau de la nappe suite au recyclage des sels accumulés dans les sols sous l'effet de forte évaporation par les eaux d'irrigation et par les eaux pluviales s'infiltrant pendant les grands évènements pluvieux.

On remarque pour la première campagne que l'ensemble des points d'eau se situe dans les trois dernières classes dont le risque de salinisation est moyen à fort.

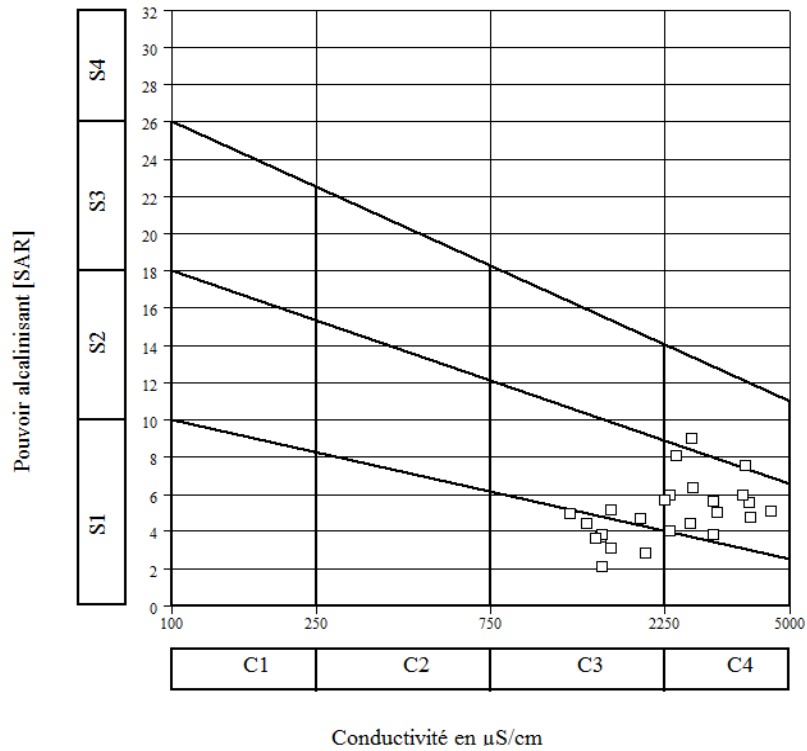
La variation des classes par rapport à la première campagne traduit l'effet de l'évaporation des eaux (augmentation des concentrations).

**Tableau 19.** Evolution des classes d'irrigation selon Richards (1954).

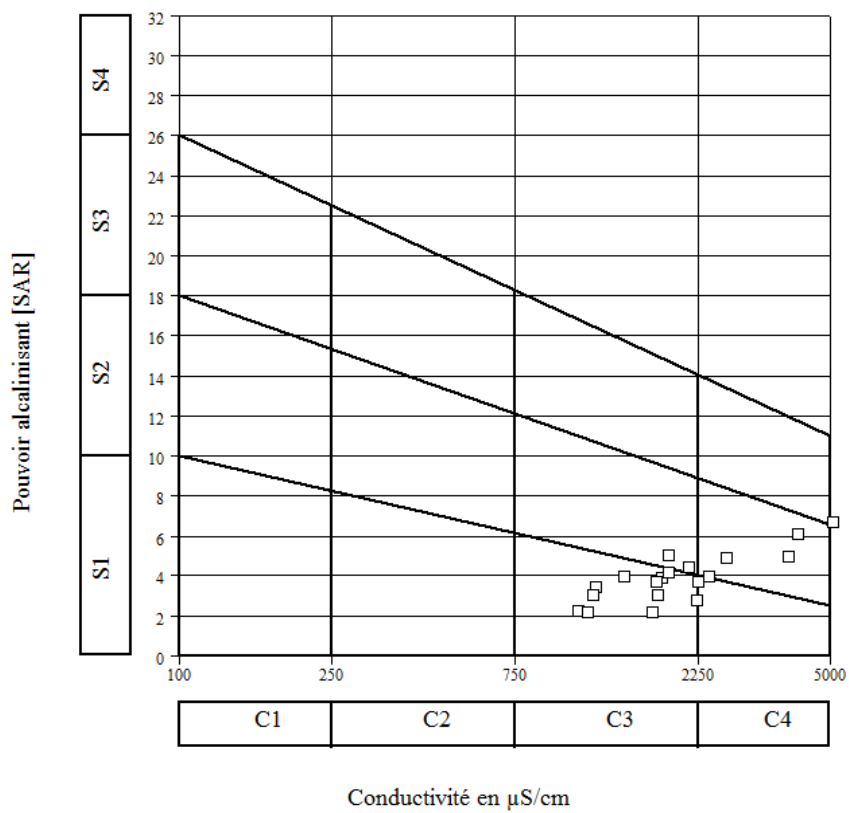
	Janvier 2011	Mai 2011	Octobre 2011	Etat d'utilisation
C2S1	16%	0%	0%	Convenable aux plantes qui ont une tolérance aux sels, cependant son utilisation peut générer des problèmes pour les argiles.
C3S1	80%	24%	68.42%	La salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainés.
C3S2	0%	12%	10.53	
C4S1	4%	0%		Eau fortement minéralisée, utilisée uniquement pour des plantes très résistantes aux sels dont le sol présente une bonne perméabilité.
C4S2	0%	48%	21.05%	
C4S3	0%	8%		Inutilisable.



**Figure 52.** Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme de Richards (1954) (campagne janvier 2011).



**Figure 53.** Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme de Richards (1954) (campagne mai 2011).



**Figure 54.** Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme de Richards (1954) (campagne octobre 2011).



## **Conclusion**

Les caractéristiques hydrochimiques basées sur les ions majeurs ont montré que les variations chimiques des eaux sont influencées par la combinaison de plusieurs processus géochimiques en occurrence:

Les processus de dissolution/précipitation des minéraux carbonatés et évaporitiques.

Les réactions d'échanges de bases.

Les phénomènes de concentration par évaporation et de dilution par mélange avec les eaux de pluie.

## CHAPITRE VII. SYNTHÈSE ET DISCUSSION

Dans les chapitres précédents, les données disponibles ont été décrites et analysées de manière élémentaire. Ce dernier chapitre propose de reprendre ces différents éléments de manière plus intégrée et distanciée, afin de synthétiser ce que les diverses approches géochimiques nous permettent de comprendre sur l'état actuel et l'origine de la salinité des eaux du lac Fetzara.

Le lac s'assèche régulièrement en saison estivale, seules les eaux de l'oued El-Hout continuant à alimenter le site. Le fond du lac est actuellement transformé en pâturage de maigre qualité, sans grand rendement, sauf sur sa périphérie. Durant les saisons pluvieuses, la terre est détrempée pour de longues périodes.

La description des formations géologiques a montré la présence de deux types de formations:

- Les formations métamorphiques présentent essentiellement au niveau du massif de l'Edough et ses environs, constituant ainsi la limite Nord du lac,
- Les formations sédimentaires occupant le reste de la zone d'étude.

Les descriptions lithologiques montrent une matrice généralement composée en grande partie par des sables et des argiles.

Les variations climatiques à courte ou à longue échelle de temps peuvent avoir des impacts non négligeables sur le taux de recharge des nappes souterraines (Edmunds et Gaye, 1994; Scanlon et al., 2006 ; Jyrkama et Sykes, 2007).

Du fait de l'aridité, les eaux de surface ont beaucoup diminué et la recharge des aquifères est actuellement faible. Cependant durant les périodes humides, la couverture végétale est abondante et joue un rôle important dans la reprise évapotranspiratoire et donc une décharge de la nappe dans la zone racinaire (Walvoord et al., 2002). Par contre, si la couverture végétale est réduite (périodes arides) les fortes pluies, même très occasionnelles, peuvent créer des ruissellements en surface qui alimentent les mares temporaires et par conséquent une augmentation de la recharge des nappes souterraines (Favreau et al., 2002).

Le climat de la région du lac Fetzara est de type méditerranéen, il est tempéré et caractérisé par un hiver humide et doux et un été chaud et sec. La température moyenne est de 11°C en hiver et 25°C en été. La pluviométrie se situe entre 600 et 700 mm par an,

dont 80% sont concentrés durant la saison pluvieuse entre les mois d'octobre et mars. L'humidité moyenne mensuelle varie de 70 à 79 %.

Le bilan d'eau établi par la formule de Thornthwaite montre que l'ETP atteint son maximum au mois de juillet (150.9 mm) et son minimum au mois de janvier (22.5 mm).

La reconstitution de la RFU s'effectue au mois de novembre (46 mm) et atteint son maximum (100 mm) à partir du mois de décembre jusqu'au mois d'avril, à partir duquel on assiste à un épuisement du stock.

L'écoulement commence après le remplissage de la RFU (100 mm) c'est-à-dire au mois de décembre et se termine en avril, avec un maximum au mois de Janvier (85.8 mm) et un minimum au mois d'avril (4 mm).

L'excédent égal à (210.5 mm) représentant 30.67 % des précipitations annuelles, alors que l'ETR est de l'ordre de (475.8 mm) représentant 69.32 % des précipitations annuelles.

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

Du point de vue chimique, les concentrations en ions majeurs doivent augmenter dans les mêmes proportions que les concentrations en chlorures lors de l'évaporation.

L'origine des sels dissous dans les eaux est généralement liée aux minéraux contenus dans les roches et des formations traversées. Ainsi, la richesse des eaux en éléments  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{SO}_4^{--}$  est liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées de sels et par dissolution des formations évaporitiques. Par contre, les éléments  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{HCO}_3^-$  sont liés à la dissolution des carbonates.

Les éléments les plus importants des eaux sont les chlorures, les bicarbonates et le sodium. Comme souvent observe dans les eaux naturelles la teneur en chlorures augmente généralement avec le degré de minéralisation. Les ions chlorures sont présents avec des teneurs très variables dans l'eau dans le secteur étudié. La forte contribution de la teneur en chlorures sur la minéralisation des eaux a été mise en évidence à partir de la précédente analyse des données. Il a été montré par la détermination des différents types d'eau, l'existence d'un faciès chloruré sodique pour les eaux marquées par une nette dominance des chlorures. L'origine de ces chlorures pose un problème. Les chlorures, c'est l'élément le plus important en quantité, particulièrement dans l'eau. Les teneurs élevées de cet élément sont dues à sa forte solubilité d'une part, et d'autre part il n'intervient pas dans les phénomènes de précipitation chimiques et ne se fixe pas sur le complexe argilo-

humique (Barbiéro et Valles, 1992). On assiste à une concentration pendant la période de basses eaux et une dilution pendant la période des hautes eaux.

La forte corrélation entre les conductivités électriques des eaux et les ions chlorures suppose que ces derniers contrôlent la minéralisation des eaux.

Le sodium est fortement conservé dans les processus hydrochimiques dans les quels il est fortement associé avec le chlore (Duce et Hoffman, 1976). Le sodium et le chlore sont les ions dominants dans les eaux, et dans plusieurs cas ils peuvent avoir la même source (Nordstrom et al., 1990). Le sodium provient du lessivage des formations riches en NaCl et des formations argileuses.

Le tracé de la concentration du sodium en fonction des chlorures pour les eaux du lac Fetzara montre un groupement de données fortement linéaire. La corrélation entre  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  est toujours élevée et la même dans les eaux à faible concentration et salines. Par contre les points d'eau qui se situent au-dessous de la droite de pente 1 indiquent un appauvrissement en sodium, ces eaux sont contrôlées surtout par des réactions d'échange cationique. Etant donné que la teneur en sodium devrait équilibrer la teneur en chlore, le déficit en  $\text{Na}^+$  est expliqué par le phénomène d'échange ionique entre l'eau et le complexe argilo-humique et se traduit par une adsorption de  $\text{Na}^+$  et une libération de  $\text{Ca}^{++}$ .

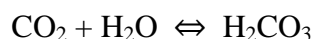
Concernant les ions sulfates, l'enrichissement des eaux en ions sulfates doit être lié à l'oxydation des sulfures dans l'eau ou la dissolution des minéraux sulfatés (gypse, anhydrite).

Les ions bicarbonates sont les ions dominants dans le système carbonique. L'enrichissement en bicarbonates est lié à l'augmentation du pH suite au dégazage du  $\text{CO}_2$ .

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (calcite) par des eaux chargées en gaz carbonique. La somme des équations de dissolution est donnée comme suit:

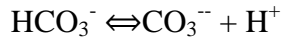
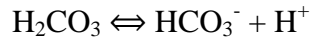


Le système  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{--}$  est un système essentiel dans le cycle naturel de l'eau. Une eau en contact avec l'atmosphère va dissoudre du gaz carbonique:



Où  $p\text{CO}_2$  est la pression partielle de  $\text{CO}_2$  (dans l'atmosphère  $p\text{CO}_2 = 10^{-3.5}$  atm).

La dissolution du  $\text{CO}_2$  entraîne la formation des ions bicarbonates  $\text{HCO}_3^-$  et carbonates  $\text{CO}_3^{--}$  suivant les réactions :



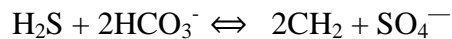
Les teneurs en potassium sont très faibles par rapport à celles des cations. Cette prédominance du sodium sur le potassium est un fait général sur l'ensemble de ces eaux. Elle peut être expliquée par une fixation du potassium dans les minéraux. Ainsi, lors d'une échange de base, la faible valeur du rapport  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  suppose que les sodiums sont plus facilement échangeables que les ions potassium.

Le magnésium est présent dans les carbonates et la dissolution des minéraux carbonatés (dolomite) conduisent à la mise en solution des ions magnésium dans les eaux, la sous-saturation des eaux vis-à-vis de la dolomite sont en accord avec les fortes teneurs en magnésium observées dans les eaux.

Le calcium participe dans la composition de divers minéraux: carbonatés (calcite, dolomite), présents dans les roches dans cette région. Sa présence dans l'eau peut provenir essentiellement de l'altération de ces roches.

Par ailleurs, la corrélation montre que les teneurs en sulfates et en calcium ne montrent un coefficient de corrélation significatif pour une grande partie des points d'eau étudiés. Ce résultat n'exclut pas les évaporites sulfatées (gypse) comme la seule origine des deux éléments considérés, mais indique l'existence d'une autre origine qui a provoqué l'excès en calcium par rapport à la dissolution du gypse dans plusieurs points et l'excès en sulfates en d'autres points moins nombreux.

L'excès en calcium est être attribué à la dissolution des roches carbonatées et le phénomène d'échange de base, alors que l'excès en sulfates est attribué à l'oxydation des minéraux sulfurés ou à l'oxydation du sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ).



L'augmentation des teneurs en sulfates est attribuée au sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ): lorsqu'il est en contact avec l'air, l'eau cherche son équilibre avec l'atmosphère; par conséquent, une partie du sulfure d'hydrogène aura tendance à se volatiliser et l'autre partie va s'oxyder en sulfates.

Pour identifier sommairement les différentes corrélations entre éléments chimiques, une analyse en composante principales (ACP) a été effectuée sur les échantillons des eaux du

lac Fetzara. Les variables utilisées sont: CE, T, pH, Eh, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>, mais également Br<sup>-</sup>.

On remarque que plusieurs paramètres sont fortement corrélés avec l'axe factoriel 1: Cl, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, conductivité électrique (CE). L'axe 1 représente la part principale de la minéralisation due à la dissolution/précipitation des éléments calcites et évaporitiques concentrées par évaporation.

Les eaux présentent généralement deux types de faciès chimiques : chloruré sodique pour les eaux les plus minéralisées et bicarbonaté sodique pour les eaux les moins minéralisées. Cette transition d'un faciès à un autre souligne la complexité des processus hydrogéochimiques qui gouvernent la salinité des eaux.

Un faciès bicarbonaté sodique se trouve dans certains aquifères des bassins sédimentaires et témoigne d'interactions eau-roche (échange Ca<sup>++</sup> contre Na<sup>+</sup> sur des argiles).

Un faciès Chloruré-sodique fréquents dans les milieux riches en évaporites (exemple : halite [NaCl]).

Nous allons étudier le comportement des rapports ioniques Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> et Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>. Un rapport Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> élevé (= 1) est typique des eaux dominées par une dissolution de la halite.

A partir du rapport Br/Cl, il est possible d'identifier les anomalies de salinité dans l'eau, d'évaluer les sources salées (sources marines, dissolution/précipitation...), les processus de salinisation.

- Un rapport Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> similaire à celui de l'eau de mer ( $3.5 \times 10^{-3}$ ) indique une origine marine.
- Un rapport Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> plus faible (< à celui de l'eau de mer) met en évidence une source de salinité à partir des eaux usées et une dissolution des évaporites.

L'utilisation de l'approche géochimique (Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>) pour les du lac Fetzara nous a permis d'exclure l'hypothèse d'une augmentation de la salinité des eaux par intrusion marine. Cette augmentation de la salinité des eaux ne semble pas provenir d'une contamination marine, la salinité élevée liée essentiellement à la dissolution de l'halite.

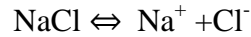
Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seul les minéraux carbonaté tendent à précipité surtout sous la forme de calcite.

Par contre les minéraux évaporitique sont toujours à l'état de sous-saturation, cela est expliqué par l'effet des valeurs élevées de la constante d'équilibre des minéraux évaporitiques [halite (1.58) ; gypse (-4.58)], ce qui permet aux éléments évaporitiques de se présenter dans l'eau à des constantes élevés. Par contre pour les minéraux carbonatés,

la constante d'équilibre est plus faible [dolomite ((-17.02) ; calcite (-8.37)], ce qui produit une précipitation rapide des éléments chimiques.

Halite: chlorure de sodium (NaCl), de structure cubique, dit aussi sel gemme. Minéral des roches sédimentaires, à structure cristalline cubique. Incolore, soluble dans l'eau.

La réaction de dissolution de l'halite s'écrit:



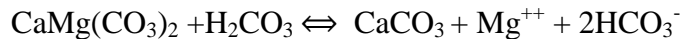
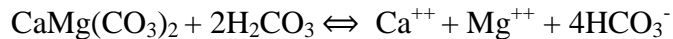
Dans la nature, l'aragonite et la calcite ont la même composition chimique  $\text{CaCO}_3$  mais par contre, leur organisation géométrique cristalline est différente. L'aragonite précipite en premier puis change de symétrie et se transforme dans le temps en calcite, l'aragonite est dite métastable.

La réaction de dissolution de la calcite s'écrit simplement:



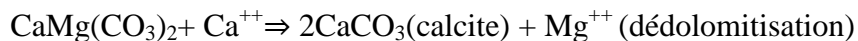
La dolomite est une espèce minérale formée de carbonate de calcium et de magnésium de formule chimique  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ .

Les réactions de dissolution de dolomite s'écrivent:

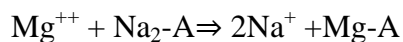
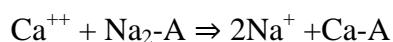


La forte minéralisation de l'eau, est démontrée par la dissolution des formations évaporitiques chlorurées et gypsifères, et en partie par le processus de dedolomitization selon les réactions chimiques suivantes:

- Forte dissolution des chlorures de sodium (halite):  $\text{NaCl} \Rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$
- Dissolution du gypse et anhydrite  $\Rightarrow \text{Ca}^{++} + \text{SO}_4^{--}$
- Précipitation de la calcite :  $\text{Ca}^{++} + 2\text{HCO}_3^- \Rightarrow \text{Ca}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{H}^+$
- Dédolomitisation: dissolution de la dolomite et la précipitation de calcite.



- Echange ionique: ce phénomène se produit souvent sur les argiles par fixation des ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  et libération de sodium  $\text{Na}^+$  :



A, étant un échangeur ionique, généralement une argile.

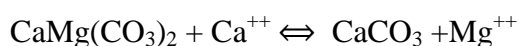
L'interprétation géochimique de l'eau de la région d'étude a permis de mettre en évidence trois principales réactions qui caractérisent son évolution chimique. Il s'agit d'une forte dissolution des chlorures notamment la halite (NaCl), le gypse (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O) et l'anhydrite (CaSO<sub>4</sub>), et d'une dédolomitisation et l'échange des ions entre l'eau et l'argile.

La salinité peut entraîner des effets nocifs conséquents en raison de la fixation du sodium par les colloïdes du sol. Le sodium exerce alors une action néfaste sur la végétation de façon indirecte, en dégradant les propriétés physiques du sol. Sous cette action, les sols deviennent compacts et asphyxiants pour les plantes. Lorsque la concentration des ions Na à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent le plus fréquemment les cations Ca<sup>++</sup> dans le complexe absorbant. Une eau chargée en sels, peut provoquer cette action. Le risque est déterminé à partir de la valeur du Sodium absorbable (Sodium Absorption Ratio, SAR). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. La méthode de Richards, qui est la plus fréquemment utilisée, sera développée pour examiner l'utilisation des eaux destinées à l'irrigation dans la région d'étude. La classification de Richards a permis de classer les eaux de la région. Ces eaux sont en général acceptables pour l'utilisation agricole, mais nécessitent un contrôle préalable.

### Conclusion

Trois sources de minéralisation peuvent être mises en évidence:

- La première concerne la dissolution des minéraux calcites et évaporites concentrées par évaporation.
- La seconde, en revanche, est liée au phénomène de dédolomitisation comme en témoignent la sous-saturation des eaux en gypse, leur sur-saturation en calcite et dolomite et l'augmentation des teneurs en magnésium. La dissolution du gypse a pour conséquence l'augmentation des ions Ca<sup>++</sup> et celle du rapport Ca<sup>++</sup>/Mg<sup>++</sup> ; Lorsque ce dernier a une valeur supérieure à 0.5 qui est le cas de l'ensemble des points, le phénomène de dédolomitisation est favorisé:



Cette réaction explique la saturation en calcite et dolomite et sous-saturation par rapport au gypse.

- La troisième est la réaction d'échange de base entre l'eau et le complexe argilo-humique.



## CONCLUSION GENERALE

Le but de ce travail touche l'évolution de la salinité des eaux du lac Fetzara à partir d'une approche géochimique. Ce site situé dans la région d'Annaba, couvre une superficie estimée à 18600 ha dont une très grande partie affectée par le phénomène de salinisation. Depuis plusieurs décennies, les pouvoirs publics ont engagé de nombreux programmes d'aménagement et de mise en valeur des terres, mais les résultats n'ont jamais abouti.

Dans cette étude, il apparaît que la concentration des eaux sous l'effet du climat, qui est caractérisé par un déficit hydrique très important en période estivale (pluviométrie < Evaporation), provoque une concentration des sels induisant la précipitation de certains minéraux.

Trois campagnes de mesures et de prélèvements d'échantillons ont été successivement effectuées en janvier, mai et octobre 2011 qui correspondent respectivement à la saison pluvieuse, fin de la saison pluvieuse et en fin de la saison sèche.

Les échantillons d'eau ont été récoltés au niveau de 25 points, sélectionnés suivant une répartition spatiale homogène sur toute la zone d'étude. Température, pH, Eh et conductivité électrique (CE) ont été mesurés sur le terrain. Les analyses chimiques du  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{CO}_3^{--}$  et  $\text{Br}^-$  ont été effectuées au laboratoire.

L'étude de la chimie des eaux est basée principalement sur les informations tirées de la base de données analytiques, sur laquelle une description a été effectuée en utilisant les méthodes suivantes:

- Les diagrammes décrivant la composition chimique des eaux parmi lesquels le diagramme de Piper permet de déterminer la typologie des faciès chimiques et leurs évolutions et le diagramme de Durov qui permet en même temps de définir les faciès chimiques et la minéralisation des eaux (TDS).
- Les diagrammes binaires associés aux rapports caractéristiques qui permettent d'établir les corrélations et d'estimer la prépondérance d'un processus par rapport à un autre.
- Les analyses factorielles avec en particulier les ACP (Analyse en Composantes Principales) utilisées ici, qui permettent d'observer les relations entre les différentes variables et échantillons.

- Les indices de saturation qui permettent d'évaluer la saturation de l'eau vis-à-vis des différents minéraux.

Les températures moyennes mesurées reflètent l'influence du climat dans la zone au moment de la collecte des échantillons mais également l'influence de la saison. Les pH sont neutres à faiblement basiques; tandis que les variations de la conductivité électrique (CE) des eaux ne sont pas homogènes sur l'ensemble des points étudiés. Un effet de dilution impliquant une diminution de la minéralisation des eaux a été constaté sur la plupart des échantillons après la saison des pluies.

Les diagrammes de Piper et Durov réalisés à partir de l'ensemble des analyses chimiques, montrent que les eaux étudiées présentent deux faciès chimiques l'un chloruré-sodique et l'autre bicarbonaté-sodique.

L'analyse statistique multivariée des données hydrochimiques, a permis d'identifier trois principaux mécanismes qui sont responsables de l'évolution de la minéralisation des eaux de la zone. Le phénomène de salinisation est de loin le processus principal. Le mécanisme à la base de la minéralisation en éléments majeurs des eaux est le phénomène de dissolution/précipitation des formations évaporitiques et carbonatées concentrés par évaporation. Les processus de second ordre seraient le phénomène d'échange ionique et les processus d'oxydo-réduction, indiquant que des processus de sulfato-réduction ont lieu. L'enrichissement en bicarbonates est lié à l'augmentation du pH suite au dégazage du CO<sub>2</sub>.

Il ressort de cette analyse que la plupart des eaux dans la zone du lac Fetzara sont sous saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques (halite, gypse et anhydrite) en toute saison et saturées vis-à-vis des minéraux carbonatés (calcite, aragonite et dolomite) en saison sèche et sous-saturées durant et après la saison pluvieuse. Cette saturation est accentuée par la concentration par processus d'évaporation durant la saison sèche. Il faut également signaler que durant cette période, la nappe est soumise à une forte insolation et les solutions se concentrent par évaporation. Lorsque les produits de solubilité des ions carbonates et alcalino-terreux sont atteints, ces ions précipitent les premiers. Ces phénomènes seraient pour la plupart responsables de la diminution des concentrations en ions alcalino-terreux observées durant la saison sèche.

Ainsi, après la saison pluvieuse, les indices de saturation deviennent négatifs; ils sont très probablement dus aux mélanges entre les eaux de recharge (pluie, eaux d'engorgement et d'infiltration) sous-saturées et les eaux de la nappe à l'équilibre ou légèrement sursaturées.

Les points d'eaux analysées présentent des teneurs en bromures très faibles par rapport à l'eau de mer ( $1.5 \times 10^{-3}$ ).

L'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation, a révélé que les eaux de la majorité des échantillons prélevés ont une qualité admissible, 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.

En définitive, les processus de concentration par évaporation, de dissolution/précipitation des minéraux calcite et évaporitiques et de dilution après la saison pluvieuse, sont responsables des variations saisonnières de la chimie des eaux.

Cependant plusieurs points restent à approfondir et à développer, voici donc une liste non exhaustive des travaux qui seraient susceptibles d'être entrepris dans la continuité de cette étude:

- Il faudra donc poursuivre l'échantillonnage chimique en multipliant les points de mesure pour mieux comprendre les facteurs responsables de l'hétérogénéité géochimiques à grande et à petite échelle.
- Faire une analyse chimique et isotopique complète des eaux afin d'évaluer avec précision la minéralisation des eaux.
- Il n'existe pas, enfin, de relevés piézométriques fiables et suivis permettant d'avoir une idée des directions d'écoulement des eaux et de proposer ainsi une carte piézométrique correcte.
- Les processus d'oxydo-réductions jouent un rôle important dans la qualité des eaux. Les caractéristiques du potentiel redox des eaux peuvent constituer un bon indicateur de leur dégradation. Les études doivent donner une importance particulière aux minéraux suivants : fer, azote et soufre. Ce volet n'a malheureusement pas été abordé dans cette étude à cause de certaines contraintes.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahmed Salem M.; 2012** - Approche hydrodynamique de la nappe du Trarza Sud-Ouest de la Mauritanie. Thèse Doct., Univ. Paris-Sud; 148 p.
- Ait Brahim Y.; 2012** - Dénoyages miniers et hydrochimie élémentaire et isotopique des eaux souterraines de la région d'Oumjrane. Mémoire de fin d'étude, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc; 79 p.
- AJCI; 1985** - Etude de faisabilité du projet d'aménagement agricole de la région périphérique du lac Fetzara. Agence Japonaise Coopération Internationale, Volume 2, Annexe A et B; 150 p +72 p.
- Alili, D.; 1993** - Caractéristiques pluviométriques de l'année hydrologique 1992-93. ANRH, Alger.
- Andreasen D. C., Fleck W. B.; 1997** - Use bromide: ratio differentiates potential sources of chloride and shallow, unconfined aquifer affected by brackish-water intrusion. *Hydrogeology journal*; 5(2): 17-26.
- ANRH; 1980** - Etude Agro-Pédologique de la région de Fetzara–Azzaba et Oued Aneb au 1/100 000é par Aissoug et Lezzar, Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, 36 p.
- ANRH; 1993** - Plan de développement. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques; Alger, 54 p. .
- Ayres R. S., Westcott D. W.; 1976** - Water quality for agriculture. F.A.O. Irrigation and Drainage Paper No. 29. Rome. Italy, 128 p.
- Azzaoui S.; 1999** - Métaux lourds dans le bassin versant du Sebou, géochimie, source de pollution et impact sur la qualité des eaux de surface. Thèse Doct., Univ. Ibn Tofail, Kénitra, Maroc; 130 p.
- Banton O., Bangoy L. M.; 1999** - Hydrogéologie: multisciences environnementale des eaux souterraines. Presse de l'Université du Québec; 460 p.

- Barbiéro L., Valles V.; 1992** - Aspects géochimiques de l'alcalinisation des sols dans la vallée du Dallol Bosso (république de Niger). *Cahiers de l'ORSTOM, série pédologie*; 27(2): 143-152.
- Barlow P. M.; 2003** - Ground Water in Freshwater–Saltwater Environments of the Atlantic Coast, US Geological Survey; 1262 p
- Bauder J. W., Brock T. A.; 2001** - Irrigation water quality, soil amendment, and crop effects on sodium leaching. *Arid Land Research and Management*; 15: 101-113.
- Bear J., Cheng A. H.-D., Sorek S., Ouazar D. H. I.; 1999** - Seawater intrusion in coastal Aquifers: Concepts, methods and practices (Theory and applications of transport in Porous Media); *Environmental Science & Engineering*; 1-8.
- Belhamra A.; 2001** - Contrôle de la salinité des eaux du lac Fetzara jusqu'à la mer. Mémoire Magister. Univ. Annaba; 110 p.
- Benziane A., Boualla N., Derriche Z.; 2012** - Aptitude des eaux du bassin de la Grande Sebkhia d'Oran à l'irrigation, *Journal of Applied Biosciences*; 56: 4066– 4074.
- BNEDR; 1997** - Étude d'aménagement et assainissement des terres dans la région périphérique du lac Fetzara – Dossier II. Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural; archives la Générale des Concessions Agricoles (Wilaya d'Annaba), 26 p.
- BNEDR; 1999** - Programme de mise en valeur des terres par le biais de la Concession – Mise en valeur des terres agricoles périphérique du lac Fetzara; Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural; archives la Générale des Concessions Agricoles (Wilaya d'Annaba), 52 p.
- Bolke J. K., Horan M.; 2000** - Strontium isotope geochemistry of groundwater and streams affected by agriculture. Locust Grove, MD. *Applied Geochemistry*; 15: 599-609.
- Bolke J. K.; 2002** – Groundwater recharge and agricultural contamination. *Hydrogéologie Journal*; 10: 153-179.
- Bouhlassa S., Alecheikh C., Kabiri L.; 2008** - Origine de la minéralisation et détérioration de la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique du quaternaire du bassin-versant de Rheris (Errachidia, Maroc). *Sécheresse*; 19; 67-75.

- Bourhan A.; 2010** - Discrimination de l'origine de la salinité des masses d'eau souterraine: contexte hydrogéologique et méthodes d'étude, Géosciences Réunion, BRGM, Univ. Avignon; 108 p.
- Boutkhil M.; 2007**- Etude de l'intrusion marine et de ses répercussions sur la dégradation des sols: cas des zones côtières d'Alger Est, *Actes des JSIRAU*; 6-9.
- Braune E., Xu Y.; 2010** - The role of ground water in Sub-Saharan Africa. *Ground Water*; 48 (2): 229-238.
- BRGM; 1996** - Méthodes et moyens de contrôle des biseaux salés. Rapport scientifique N° 38847; 81 p.
- Buckman H. O., Brady N. C.; 1967** - The nature and properties of soils. 6<sup>th</sup> edition. Eurasia Publication House Pvt. Ltd; 520 p.
- Calvache M.L., Polido-Bosch A.; 1996** - Processus d'intrusion-extrusion marine dans les aquifères côtiers du sud de l'Espagne. Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. *Sciences de la terre et des planètes*; 323(8): 673-679.
- Cartwright I., Weaver, T. R., Fifield L. K.; 2006** - Cl/Br ratios and environmental isotopes as indicators of recharge variability and groundwater flow: An example from the South-East Murray Basin, Australia. *Chemical Geology*; 231(1-2): 38-56.
- Chabour N.; 2006** - Hydrogéologie des domaines de transition entre l'Atlas Saharien et la Plateforme Saharienne à l'Est de l'Algérie. Thèse Doct., Univ. Constantine; 125 p.
- Chapelle F. H.; 1993** - Ground-water microbiology and geochemistry, John Wiley & Sons, Inc. NY; 93 p.
- Chen Y., Banin A.; 1975** - Scanning Electron Microscope (SEM) observations of soil structure changes induced by sodium calcium exchange in relation to hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*; 120: 428-36.
- Collins A. G.; 1975** - Geochemistry of oilfield waters. Elsevier scientific publishing company, New York; 495 p.
- Cudennec C., Leduc C., Koutsoyannis D.; 2007** - Dryland hydrology in Mediterranean regions-a review. *Hydrology Science Journal*; 52: 1077-87.

- Custodio E., Bruggeman G.A.; 1987** - Groundwater problems in coastal areas; Studies and Reports in Hydrology, Paris; 596 p.
- Custodio E.; 1997** – Studing, monitoring and controlling intrusion in Coastal aquifers. In guidelines for study. FAO; water reports, N° 11; 7-23.
- Custodio E.; 2002** - Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures. In: Bocanegra, Martines and Massone (Editors). *Groundwater and Human Development*; 1905-1918.
- Davis S. N., Whittemore D. O., Fabryka-Martin J.; 1998** - Uses of chloride/bromide ratios in studies of potable water. *Ground water*; 36: 338-350.
- Debieche T. H.; 2002**- évolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle, Thèse Doct., Univ. Franche-Comté; 199 p.
- De Martonne E.; 1926** - Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité. *La Météorologie*; 449-458.
- De Montety V.; 2008** - Salinisation d'une aquifère captive côtière en contexte deltaïque-cas de la camargue (Delta du Rhône, France). Thèse Doct., Univ. Avignon et des Pays de Vauclus; 208 p.
- Djamai R.; 1993** - Contribution à l'étude de la salinité des sols et des eaux du lac Fetzara (Annaba). Mémoire de Magister, Institut National Agronomique, Alger; 78 p.
- Djamai R.; 2000** - Etude spatio-temporelle de la salinité des sols du lac Fetzara (Annaba). Doc. Inédit; Univ. Annaba; p 61.
- Djamai R., Daoud Y., Ouardi J., Laifa A., Fadel D., Benslama M., Vallès V.; 2006** - Mathematical simulation the climatic variability-estimation of the water balance of the overturning pond of the Fetzara Lake (Algerian North-East). *European Journal of Scientific Research*; 13(2): 267-274.
- 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 évolution spatio-temporelle des phénomènes ». Thèse Doct., Institut National Agronomique, Alger; 167 p.

- Djamai R., Fadel D., Laifa A., Benslama M., Daoud Y., Valles V.; 2011** – Concept d'alcalinité résiduelle et évolution géochimique des processus. Application aux sols salés du lac Fetzara (Nord-Est algérien). *Revue Synthèse*; 23; 92 p.
- Douaoui A., Hartani T.; 2007** - Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Troisième atelier régional du projet Sirma, Tunisie. Cirad; 1-5.
- Droubi A.; 1976** - Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Thèse Doc., Univ. Strasbourg; 177 p.
- Droubi A., Fritz B., Gac J., Tardy Y.; 1978** - Generalized residual alkalinity concept, application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. *American Journal of Science*; 280: 560-572.
- Duce R. A., Hoffman E. J.; 1976** - Chemical fractionation at the air/sea interface. *Annual review of Earth and Planetary Sciences*; 4: 187-228.
- Durand J. H.; 1950** - Première résultats de l'étude des sols du lac Fetzara. Doc. Inédit; SE Alger; 112P+ carte.
- Durov S. A.; 1948** - Klassifikatsia prirodnykh vodi graficheskoe izobrazhenie ikh sostava. *Doklady Akademii Nauk*; 59(1): 87-90.
- Edmunds W. M., Gaye C. B.; 1994** - Estimating the spatial variability of groundwater recharge in the Sahel using chloride. *Journal of Hydrology*; 156 (1-4): 47-59.
- Edmunds W. M.; 1996** - Bromine geochemistry of British groundwater. *Mineralogical Magazine*; 60 (2): 274-284.
- Edmunds W. M., Droubi A.; 1998** - Groundwater salinity and environmental change. Isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and atmosphere. IAEA, Vienna, 503-518.
- El Blidi S., Fekhaoui M., El Blidi A., Idrissi L., Benazzou T.; 2003** - Contamination des rizières de la plaine du Gharb (Maroc) par des métaux traces. *Vecteur Environnement*; 46-53.



- Falstad J.; 2000** - Soil condition transplant status in Burger Draw. *Billings Gazette*. Prepared by D.G. Steward Page. Burger Draw Comments and Recommendations.
- FAO; 1989** - Evaluation des terres pour l'agriculture irriguée: Directives-Bulletin pédagogique de la FAO: Food and Agriculture Organization, 55; 307 p.
- Favreau G., Leduc, C., Marlin C., Guero A.; 2002** - Une dépression piézométrique naturelle en hausse au Sahel (Sud-Ouest du Niger). *Comptes Rendus Geosciences*; 334 (6): 395-401.
- Fetter B.; 1993** - The health transition and colonial British Africa. International Population Conference, Montréal; 429-439.
- Fisher R. S., Mullican W. F.; 1997**- Hydrochemical evolution of sodium sulfate and sodium chloride groundwater beneath the Northern Chihuahuan desert, Trans-Pecos, Texas, USA, *Hydrogeology Journal*; 5(2): 4-16
- Freeman J. T.; 2007** - The use of bromide and chloride mass ratio to differentiate salt-dissolution and formation brines in shallow groundwater of the Western Canadian Sedimentary Basin. *Hydrogeology Journal*; 15: 1377-1385.
- Frenkel H., Goertzen J.O., Rhoades J. D.; 1978** - Effect of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*; 142: 32-39.
- Gascoyne M., Kaminen D. C.; 1994** - The hydrogeochemistry of fractured plutonic rocks in the Canadian Shield. *Applied Hydrogeology*; 2(94): 43 - 49.
- Gaucher G., Burdin S.; 1974** - Géologie, Géomorphologie et hydrologie des terrains salés. Techniques vivantes, Presses Universitaires de France, Imp. Boudin, Paris; 234 p.
- Genxu W., Guodong C.; 1999** - Water resource development and its influence on the environment in arid areas of China, the case of the Heir River basin. *Journal of Arid Environments*; 43 (2): 121-131.
- Ghabayen S.M.S., McKee M., Kemblowski M.; 2006** - Ionic and isotopic ratios for identification of salinity sources and missing data in the Gaza aquifer. *Journal of Hydrology*; 318(4): 360-373.

- GHI; 2009** - Etude d'avant projet détaillée pour l'aménagement intégré portant sur la protection des localités à l'aval du lac et les terres agricoles à la périphérie du lac Fetzara contre les inondations-Wilaya d'Annaba (Étude hydrologique), Gabinetete Hispano d'Igéniera; 115 p.
- Gouaidia L.; 2008** - Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana Nord-Est Algérien. Thèse Doct., Univ. Annaba; 130 p.
- Groleau A., Harrault L., Viollier E., Gaillard A., Pepe M., Benedetti M.; 2008** - Variabilité temporelle du pH et du système CO<sub>2</sub> carbonate dans la Seine à Paris, Univ. Paris Diderot, 17 p.
- Habes S.; 2006** - Pollution saline d'un lac, cas du lac Fetzara, Est Algérienne. Mémoire de Magister, Univ. Annaba; 103 p.
- Habes S., Djabri L., Djabri Y., 2011** - Qualité des eaux d'un lac dans une région côtière de l'Est Algérien: cas du lac Fetzara. Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Edition 2, Tanga, Maroc; 331 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 Doct., Univ. Annaba; 168 p.
- Haddani H.; 2010** - Mise en évidence de l'intrusion marine vers les aquifères côtiers de la zone comprise entre El Jadida et Oualidia (Maroc). Mémoire de fin d'étude, Univ. Chouaib Doukkali, Maroc; 43 p.
- Hallaire M.; 1958** – Soil water movement in the film and vapor phase under the influence of evapotranspiration. *HRB Special Report*; 40: 88-105.
- Hamdy A., Ragab R., Scarascia Mugnozza E.; 2003** - Coping with water scarcity: water saving and increasing water productivity. *Irrigation and Drainage*; 52 (1): 3-20.
- Hanson B., Grattan S.R., Fulton A.; 1999** - Agricultural Salinity and Drainage. University of California Irrigation Program. *Division of Agriculture and Natural Resources Publication*, Oakland; 160 p.

- Hardy N., Shainber I., Gal M., Keren R.; 1983** - The effect of water quality and storm sequence upon infiltration rate and crust formation. *Journal of Soil Science*. 34 ; 665-676.
- Hsissou Y.; 1999** - Impact de l'environnement naturel et anthropique sur la qualité des eaux alluviales en zone semi-aride; cas de la plaine de Souss (Maroc). Thèse Doct., Univ. Ibn Zohr Agadir; 172 p.
- Hsissou Y., Murdy J., Mania J., Bouchaou L., Tulipano P.; 1999** - Utilisation du rapport Br/Cl pour déterminer l'origine de la salinité des eaux souterraines: exemple de la plaine du Souss (Maroc). C. R. Acad. Sci. Paris; 328: 381-386.
- Idder T.; 2007** - Le problème des excédents hydriques à Ouargla: situation actuelle et perspectives d'amélioration. *Sécheresse*; 18 : 161-167.
- Ifagraria; 1967** - Etude générale de la mise en valeur agricole des plaines côtières d'Annaba. Société Ifagraria, Rome; Partie 1; 169 p.
- Jones B. F., Vengosh A., Rosenthal E., Yechieli Y.; 1999** - Géochimical investigations. In Seawater Intrusion in Coastal Aquifers- Concepts, Methods and Practices. *Kluwer academic publishers*, Netherlands; 51-72.
- Jyrkama M. I., Sykes J. F.; 2007** - The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the Grand River watershed (Ontario). *Journal of Hydrology*; 338 (3-4): 237-250.
- Kadi A., 1997** - La gestion de l'eau en Algérie. *Hydrological Sciences Journal*; 42(2): 191p.
- Karaouli F., Zammouri M., Tarhouni J., Hamed Y.; 2008** - Etude hydrogéologique et impact de l'intensification de l'exploitation sur la qualité des eaux souterraine du bassin de Moulares-Redeyef (Sud-Ouest tunisien). *Sécheresse*; 19: 61-65.
- Khammari B., De Marsily G.; 1994** - Identification de l'intrusion marine en nappe côtière par cokrigeage entre les teneurs hydrochimiques (Nappe alluviale du bas Seybouse, Algérie); 18 p.
- Kharaka Y. K., Hanor J. S.; 2005** - Deep fluids in the continents: I sedimentary basins. *Treatise on Geochemistry*; 5(16): 499-540.

- Klopmann W., Bourhane A., Asfirane F.; 2011** - Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau « emploi des outils géochimiques, isotopiques et géophysiques », BRGM, France; 38 p.
- Kolodny Y., Kartz A., Starinsky A., Moise T., Simon E.; 1999** - Chemical tracing of salinity sources in Lake Kinneret (Sea of Galilee). *Limnology Oceanography*; 44: 1035-1044.
- Lange J., Leibundgut C.; 1999** - A non-calibrated rainfall-runoff model for large, arid catchment. *Water Resources*; 35: 2161-72.
- Leybourne M. I., Goodfellow W. D.; 2007** - Br/Cl ratios and O, H, C, and B isotopic constraints on the origin of saline waters from eastern Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta* ; 71(9): 2209-2223.
- Maouni A.; 2007** - Evolution et origine du chimisme des eaux de l'aquifère superficiel de Zaâfrane : région de la steppe Sud Algéroise. Etude de la variation spatiale de la salinité et ses risques sur les sols et la végétation. Thèse Doct., Univ. Annaba, 257 p.
- Marjoua A., Olive P., Jusserand C.; 1997** - Origines des sels dans l'aquifère de la Chaouia côtière (Maroc). Hydrochemistry (Proceeding of the Rabat Symposium). IASH Publ. N°244; 245-252.
- Miller R. W., Donahue R. L.; 1995** - Soils in our environment, Prentice Hall; 7th edition, U.S.A.; 784 p.
- Morell I., Médina J., Pulido A., Fernandez-Rudio R.; 1986** – The use of bromide and strontium ions as indicators of marine intrusion in the aquifer of Torreblanca Castellon, Spain. *9 th Salt water intrusion meeting*, Deft: 12(16): 629-640.
- Mudry J., Blavoux A.; 1986** - Utilisation de l'analyse en composantes principales (sur variables centrées réduites) pour l'étude du fonctionnement hydrocinématique de trois aquifères karstiques du Sud-Est de la France. *Hydrogéologie*; 1: 53-59.
- Ndembo Longoj J.; 2009** - Apport des outils hydrogéochimiques et isotopiques à la gestion de l'aquifère du Mont Amba. Thèse Doct., Univ. Avignon; 203 p.

- Nishri A., Stiller M., Rimmer A., Geifman Y., Krom M.; 1999** - Lake Kinneret (the Sea of Galilee): the effects of diversion of external salinity source and the protocol chemical composition of the internal salinity sources. *Chemical Geology*; 158: 37-52.
- Nordstrom D. K., Plummer L.N., Langmuir D., Busenberg E., May H. M., Jones B. F., Parkhurst D.L., 1990** - Revised chemical equilibrium data for major water-mineral reactions and their limitations. *American chemical society*, Washington; 398-413.
- Olive P.; 1996** - Introduction à la géochimie des eaux continentales. *Tempus S-JEP 09781/95*, gestion et protection des ressources en eau; 127 p.
- Ouardi J.; 2006** - Dégradation des sols et de la nappe des périmètres irrigués du Tadla Marocain par salinisation et sodisation. Thèse Doct., Univ. Cadi Ayyad, Marrakech; 154 p.
- Oulaaross Z.; 2009** - Etude climatologique, hydrogéologique et géophysique du Sahel Côtier des Doukkala (Maroc). Apport de l'analyse statistique et de l'inversion des données géoélectriques à l'étude du biseau salé de la lagune de Sidi Moussa. Thèse Doct., Univ. Chouaib Doukkali & Univ. Bordeaux 1; 279 p.
- Peter-Borie M., Lucassou F., Aubie S.; 2009** - Contexte hydrogéologique et hydraulique du littoral basique français, observation de la cote Aquitaine, BRGM, France; 31 p.
- Piper A. M.; 1944** - A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *American Geophysical Union, Trans*; 914-923.
- Poutoukis D.; 1991** - Hydrochimie, teneurs isotopiques et origine des saumures associées aux gisements de potasse d'Alsace. Thèse Doct., Univ. Paris-11, Orsay; 124 p.
- Raoult J. F., Foucault A.; 2005** - Dictionnaire de géologie, 6<sup>ème</sup> édition; 388 p.
- Raymond K. L., Butterwick L.; 1992** - Perborate in Detergents (ed. N. T. de Qude). *Springer*, New York; 288-318.
- Richard L. A.; 1954** - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agric. Handbook 60*, USDA, Washington D.C.; 160 p.
- Richter B. C., Kreitler C.W.; 1993** - Geochemical techniques for identifying sources of groundwater salinization, Boca Katon, FL, C.K. Smoley; 258 p.

- Rittenhouse G.; 1967** - Bromide in oilfield waters and its use in determining the possibilities of origin of these waters. *American Association of Petroleum Geologists*; 51: 2430-2440.
- Rittenhouse G., Fulton R. B., Grabowski R. J., Bernard J. L.; 1969** – Minor elements in oilfield waters. *Chemical Geology*; 4: 189-209.
- Rodier J., Legube B., Merlet N., 2009** - L'Analyse de l'eau, 9<sup>e</sup> édition, Dunod, Paris; 1526 p.
- Rouabhia A.E.K., Djabri L., 2010** - l'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux souterraines de l'aquifère Miocène de la plaine d'El Ma El Abiod. *Larhyss Journal*; 55-67.
- Rouabhia A.E.K., Djabri L., Hadji R., Baali F., Fehdi C., Hani A.; 2010** - Geochemical characterization of groundwater from shallow aquifer surrounding Fetzara Lake N. E. Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*; 5(1): 1-13
- Scanlon B. R., Healy R. W., Cook P.; 2002** - Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*; 10 (1): 18-39.
- Scanlon B. R., Keese K. E., Flint A. L., Flint L. E., Gaye C. B., Edmunds W. M., Simmers I.; 2006** - Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*; 20 (15): 3335-3370.
- Schoeller H.; 1962** - Les eaux souterraines. Masson et Cie, Editeurs, Paris, 642 p.
- Simmers I.; 1997** - Recharge of phreatic Aquifers in (Semi-) Arid Areas. *International Association of Hydrogeology*; 255 p.
- Stumm W., Morgan J. J.; 1981** - Aquatic chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibrium in natural waters, 2nd Edition; 780 p.
- Thornthwaite C. W., Mather J.; 1957**- Instruction and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. *Philadelphia Publications in Climatology*; 10(3): 185-311.
- Tôth J.; 1999** - Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*; 7: 1-14.

**Travers L.; 1958** - La mise en valeur du lac Fetzara. *Annales de Géographie*; 67(361): 260-262.

**U.N.E.S.C.O.; 1987** - Groundwater problems in coastal areas; 582 p.

**Vallet-Coulomb C., Radakovitch O., De Montety V., Hermitte D., Sonzogni C., Ollivier P., Paul M.; 2009** – Salinisation de l'eau souterraine en Camargue. In: Monaco, A., Ludwig, W., Provansal, M., and Picon, B., Le golf du Lion: un observatoire de l'environnement en Méditerranée. Editions: Quae; 151-161.

**Vengosh A., Rosenthal A.; 1994** - Saline groundwater in Israel: it's bearing on the water crisis in the country. *Journal of Hydrology*; 156: 389–430.

**Vengosh A., Spivack A. J., Artzi Y., Ayalon A.; 1999** - Boron, strontium and oxygen isotopic and geochemical constraints for the origin of the salinity in groundwater from the Mediterranean Coast. *Water Resources Research*; 35: 1877–1894.

**Vengosh A.; 2003** - Salinization and saline environments, in treatise on geochemistry, *Environmental Geochemistry*; 9: 333-365.

**Walvoord M. A., Plummer M. A., Phillips F. M., Wolfsberg A. V.; 2002** - Deep arid system hydrodynamics 1. Equilibrium states and response times in thick desert vadose zones. *Water Resources Research*; 38 (12): 1308

**Younsi A.; 2001** - Méthodologie de mise en évidence des mécanismes de salure des eaux souterraines côtières en zone semi-aride irriguée (Chaouia côtière, Maroc). Thèse Doct., Univ. Chouaïb Doukali. El Jadida; 175 p.

**Zahi F.; 2008** - La qualité des eaux et des sols de la région du lac Fetzara (Nord-Est d'Algérie). Mémoire de Magister, Univ. Annaba; 156 p.

**Zahi F., Djamai R., Chaab S., Djabri L., Douiche A., Medjani F.; 2013** - Dynamique de la nappe et qualités physico-chimiques des eaux souterraines du lac Fetzara (Nord-Est algérien). *Revue Synthèse*; 26 : 86-95.

**Zenati N.; 1999** - Relation nappes-lac confirmation par l'hydrochimie; cas de la plaine Ouest d'El Hadjar, lac Fetzara N-E Algérien. Mémoire Magister, Univ. Annaba; 151 p.

**Zenati N.; 2010** - Pollution de l'environnement aquatique: Diagnostic et proposition « Région de Annaba ». Thèse Doct., Univ. Annaba; 288 p.

**Sites internet consultés**

<http://www.xlstat.com>

<https://www.rockware.com/product/overview.php?id=165>

<http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>

<http://www.terre-et-eau.univ-avignon.fr/hydrochimie.html>.



**LISTE DES FIGURES**

**Chapitre I. Les origines de la salinité des eaux en zones côtières.....13**

Figure 1. Gammes de concentrations et terminologie.....14

Figure 2. Dissolution des sels marins issus des aérosols et embrun marins.....15

Figure 3. Relation eau douce eau de mer.....17

Figure 4. Source naturelle de salinité des eaux souterraines par lixiviation.....22

Figure 5. Mécanismes naturels de salinisation des eaux de surfaces et souterraines.....23

Figure 6. Exemple et conséquences des différentes pressions s'exerçant sur un aquifère côtier.....23

Figure 7. Sources naturelles et anthropiques de salinité: évaporation et recyclage des eaux d'irrigation.....25

**Chapitre II. Caractéristiques du paysage.....26**

Figure 8. Situation géographique du lac Fetzara.....27

Figure 9. Les fossés.....28

Figure 10. Canal principal.....28

Figure 11. Pont vanne.....29

Figure 12. Géologie du bassin versant du lac Fetzara.....30

Figure 13. Carte pédologique de la région de Annaba.....34

Figure 14. Modèle numérique de terrain de la région d'étude.....35

Figure 15. Distribution de la superficie du bassin versant du lac Fetzara.....37

Figure 16. Les principaux sous bassins versant du lac Fetzara.....38

Figure 17. Bassin versant du lac Fetzara.....38

Figure 18. Nappes entourant le Lac Fetzara.....39

Figure 19. Courbes de remplissage du lac.....41

---

Figure 20. Courbes pluviothermiques: station des Salines.....	43
Figure 21. Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite (Station les Salines 1981-2011).....	48
<b>Chapitre III. Matériel et méthodes.....</b>	<b>52</b>
Figure 22. Localisation des points d'eau dans le bassin versant du lac Fetzara.....	53
Figure 23. Rapports molaires $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ , $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$ des principales sources de salinité.....	58
<b>Chapitre IV. Histoire des études réalisées.....</b>	<b>59</b>
Figure 24. Carte pédologique.....	65
<b>Chapitre V. Etude statistique multivariee des eaux du lac fetzara.....</b>	<b>67</b>
Figure 25. Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (campagne janvier 2011).....	76
Figure 26. Répartition des échantillons sur le plan factoriel (campagne janvier 2011)....	76
Figure 27. Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (campagne mai 2011).....	77
Figure 28. Répartition des échantillons sur le plan factoriel (campagne mai 2011).....	77
Figure 29. Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (campagne octobre 2011).....	78
Figure 30. Répartition des échantillons sur le plan factoriel (campagne octobre 2011)...	78
<b>Chapitre VI. Approche géochimique des eaux.....</b>	<b>81</b>
Figure 31. Variation de la température des eaux durant les trois campagnes.....	81
Figure 32. Variation du pH des eaux durant les trois campagnes.....	82
Figure 33. Variation de Eh des eaux durant les trois campagnes.....	83
Figure 34. Minéralisation totale des eaux prélevées en janvier 2011.....	84
Figure 35. Minéralisation totale des eaux prélevées en mai 2011.....	85

---

---

Figure 36. Minéralisation totale des eaux prélevées en octobre 2011.....	85
Figure 37. Diagramme de Piper des eaux prélevées en janvier 2011.....	87
Figure 38. Diagramme de Piper des eaux prélevées en mai 2011.....	87
Figure 39. Diagramme de Piper des eaux prélevées en octobre 2011.....	88
Figure 40. Diagramme de Durov des eaux prélevées en janvier 2011.....	89
Figure 41. Diagramme de Durov des eaux prélevées en mai 2011.....	89
Figure 42. Diagramme de Durov des eaux prélevées en octobre 2011.....	90
Figure 43. Indice de saturation (IS) (campagne janvier 2011).....	93
Figure 44. Indice de saturation (IS) (campagne mai 2011).....	93
Figure 45. Indice de saturation (IS) (campagne octobre 2011).....	93
Figure 46. Relation sodium-chlorures (campagne janvier 2011).....	95
Figure 47. Relation sodium-chlorures (campagne mai 2011).....	95
Figure 48. Relation sodium-chlorures (campagne octobre 2011).....	96
Figure 49. Relation chlorures-Bromures (campagne janvier 2011 en mg/l).....	98
Figure 50. Relation chlorures-bromures (campagne mai 2011 en mg/l).....	99
Figure 51. Relation chlorures-bromures (campagne octobre 2011 en mg/l).....	99
Figure 52. Classification des eaux d’irrigation d’après le diagramme de Richards (campagne janvier 2011).....	102
Figure 53. Classification des eaux d’irrigation d’après le diagramme de Richards (1945) (campagne mai 2011).....	103
Figure 54. Classification des eaux d’irrigation d’après le diagramme de Richards (1954) (campagne octobre 2011).....	103

---

**LISTE DES TABLEAUX**

**Chapitre I. Les origines de la salinité des eaux en zones côtières.....13**

**Chapitre II. Caractéristiques du paysage.....26**

Tableau 1. Superficie du bassin versant du lac Fetzara.....37

Tableau 2. Données climatiques moyennes mensuelles de la région du lac Fetzara (Annaba-Les Salines: 1982-2011).....42

Tableau 3. Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite de la Station des Salines (1982/2011).....47

Tableau 4. Indices d'aridité de de Martonne (1926) de la station de Annaba (1981-2011).....50

**Chapitre III. Matériel et méthodes.....52**

Tableau 5. Faciès hydrochimiques et contextes géologiques.....55

Tableau 6. Caractéristiques géochimiques des sources de salinité.....58

**Chapitre IV. Histoire des études réalisées.....59**

Tableau 7. Classe de sols.....64

Tableau 8. Sommaire de bilan du lac Fetzara.....66

**Chapitre V. Etude statistique multivariée des eaux du lac Fetzara.....67**

Tableau 9. Statistique descriptive pour la chimie des eaux (campagne janvier 2011).....71

Tableau 10. Statistique descriptive pour la chimie des eaux (campagne mai 2011).....71

Tableau 11. Statistique descriptive pour la chimie des eaux (campagne octobre 2011).....71

Tableau 12. Matrice de corrélation des différents paramètres (première campagne).....73

Tableau 13. Matrice de corrélation des différents paramètres (deuxième campagne).....73

Tableau 14. Matrice de corrélation des différents paramètres (troisième campagne).....74

Tableau 15. Corrélacion entre les variables et les facteurs (première campagne).....79

Tableau 16. Corrélacion entre les variables et les facteurs (deuxième campagne).....79

Tableau 17. Corrélacion entre les variables et les facteurs (troisième campagne).....79

**Chapitre VI. Approche géochimique des eaux.....81**

Tableau 18. Rapport  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  des eaux du lac Fetzara.....96

Tableau 19. Evolution des classes d'irrigation selon Richards (1954).....102

## **REMERCIEMENTS**

*Ce travail de thèse n'aurait pu voir le jour sans la collaboration de nombreuses personnes qu'il m'est particulièrement très agréable de remercier.*

*Je tiens à remercier en tout premier lieu le Professeur **DJAMAI Rachid** en tant que directeur de thèse qui s'est impliqué à des moments stratégiques: prélèvements d'eau dans des conditions climatiques difficiles, les analyses en laboratoire, la correction du manuscrit*

*ci-dessous, pour la confiance qu'il m'a témoigné et pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de diriger ce travail. Je le remercie également pour la confiance qu'il m'a témoigné de m'avoir initié dans le domaine de la recherche scientifique. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour toute l'attention, la patience et le temps qu'il m'a consacré, malgré ses lourdes responsabilités et ses nombreuses préoccupations et surtout pour son soutien moral, je lui dis « MERCI ».*

*Si j'ai la joie d'écrire ces lignes aujourd'hui, c'est bien sûr grâce aux autres membres du jury qui ont évalué ce travail et qui, par leurs remarques m'ont permis d'avoir un peu plus de recul sur cette étude. Mes vifs remerciements vont également pour Monsieur le Professeur **BENSLAMA Mohamed**, de l'université de Annaba, pour avoir bien voulu s'intéresser à ce travail et qui a accepté de me faire le grand honneur de présider le Jury de ma soutenance de thèse.*

*Le professeur **REHAMNIA Rabah** a accepté de participer en tant que membre examinateur du jury pour juger ce travail. Je tiens à lui exprimer mes vifs remerciements. Je suis très heureuse que ce travail soit jugé par, le Professeur **FADEL Djamel**, de l'Université de Souk-Ahras. Ses remarques me seront d'une grande utilité.*

*Je dois remercier vivement le professeur **BENSAID Rabah**, de l'Université de Skikda pour m'avoir examiné cette thèse.*

*Le Dr **AYALAT Hacène**, Maître de Conférence à l'Université El Tarf, a accepté d'évaluer ce travail en tant que membre examinateur du jury. Je le remercie vivement.*

*Je tiens également à remercier profondément l'ensemble des collègues et amis du laboratoire « sols et développement durable » de l'Université de Annaba.*

*Enfin je remercie affectueusement toute ma famille.*

*En bref, merci à tous!*

## ملخص

### مساهمة في دراسة مصدر ملوحة مياه بحيرة فتزارة- عنابة (الجزائر)

مياه حوض بحيرة فتزارة تعتبر من بين المصادر المهمة في سقي الأراضي المتواجدة في ضواحي هذه البحيرة هذا المياه من جهة تشهد فترات من الجفاف طويلة و متكررة و من جهة أخرى تعرف تدهور في طبيعتها هذا التدهور يفسر من خلال ظاهرة الملوحة.

قمنا بدراسة متعددة الجوانب لمعرفة تطور ملوحة مياه بحيرة فتزارة انطلاقا من الدراسة الجيولوجية و المناخية و كذلك الدراسة الجيوكيميائية و الاحصائية و ذلك لتفسير و ايجاد مختلف العوامل المؤدية الى ملوحة هذه المياه.

ان تحديد سيرورة ملوحة مياه بحيرة فتزارة تم عن طريق متابعة التطور المكاني و الزماني للعناصر الكيميائية ( $Na^+$ ,  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{--}$ ,  $CO_3^{--}$ ,  $HCO_3^-$ ) و ( $Br^-$ ) البروم.

من خلال هذه الدراسة تم التوصل الى ان هذه الملوحة ناتجة عن ظاهرة التبخر بالاضافة الى ظاهرة الترسيب و التحلل لمختلف العناصر الكيميائية المتواجدة كل هذه العوامل هي السبب في تغير الطبيعة الكيميائية للمياه من فصل إلى آخر.

اسقاط النتائج على مخططي Durov و Piper بينت نوعين من السحن الكيميائية كلوريدي صودي و بيكاربونات صودي.

من خلال هذه دراسة قابلية هذه المياه للسقي تبين أن معظم عينات الدراسة التي تم أخذها لها خاصية مقبولة. هذه المياه يمكن استعمالها لسقي محاصيل زراعية مقاومة للأملح فوق تربة قابلة للصرف و لكن تتطلب مراقبة مستمرة لمعرفة تطور هذه الملوحة.

**الكلمات المفتاح:** ملوحة, مياه, جيوكيمياء, مقارنة إحصائية, ترسيب/تحلل, فتزارة.

## RESUME

### Contribution à l'étude de l'origine de la salinité des eaux du lac Fetzara-Annaba (Algérie)

Les eaux du bassin versant du lac Fetzara est l'une des principales ressources pour l'irrigation des terres agricoles situées à la périphérie du lac. Ces eau subissent les contraintes des périodes de sécheresse répétées et longues d'une part et, d'autre part, connaissent une dégradation de leurs qualité, cette dégradation est exprimée par la salinisation.

La détermination du processus de salinisation des eaux du lac Fetzara a été approchée à partir de l'étude de l'évolution spatio-temporelle des éléments chimiques majeurs ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{CO}_3^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) et mineur ( $\text{Br}^-$ ).

Une approche pluridisciplinaire intégrant la géologie, le climat, la géochimie et une analyse statistique multivariable a été entreprise pour caractériser les processus et les facteurs qui contrôlent l'acquisition de la minéralisation des eaux du lac Fetzara.

La projection des résultats des analyses dans les diagrammes de Piper et Durov montre deux faciès chimiques: chloruré-sodique et bicarbonaté-sodique.

Les processus de concentration par évaporation, de dissolution/précipitation des minéraux calcite et évaporitiques et de dilution après la saison pluvieuse, sont responsables des variations saisonnières de la chimie des eaux.

L'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation, a révélé que la majorité des échantillons prélevés ont une qualité admissible. Ces eaux sont en général acceptables pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés, mais nécessitant un contrôle préalable de l'évolution de la salinité.

**Mots clés :** salinité, eaux, géochimie, approche statistique, dissolution/précipitation, Fetzara.



## ABSTRACT

### Contribution to the study of the origin of the salinity of waters of the lake Fetzara-Annaba (Algérie)

Waters of the pond overturning of the lake Fetzara is one of the main resources for the irrigation of farmlands place in the periphery of the lake. These waters undergo the constraints of the repeated and long periods of drought on one hand and, on the other hand, know a degradation of their quality, this degradation is expressed by the salinization.

The determination of the process of salinisation of the waters of the lake Fetzara was approached from the study of the spatiotemporal evolution of the major chemical elements ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{CO}_3^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) and the minor ( $\text{Br}^-$ ).

A pluri-disiplinary approach was used involving structural geology, water geochemistry and a multi-variable statistical analysis applied to the morphology of the sites and to the borehole parameters in order to describe the processes and the factors controlling the mineralization of the water.

The projection of the results of analyses in the diagrams of Piper and Durov shows two chemical facies: chlorinated sodic and bicarbonaté-sodic.

The processes of concentration by evaporation, dissolution/haste of minerals calcite and évaporitique and of dilution after the rainy season are responsible seasonal variations of the chemistry of waters.

The study of the capacity of waters in the irrigation revealed that waters of the majority of the taken samples have an acceptable quality; these waters are generally acceptable for the irrigation of the tolerant cultures in salts on well drained grounds, but require a preliminary control of the evolution of the salinity.

**Key words:** salinity, water, geochemistry, statistical approach, dissolution/haste, Fetzara.

---

---

**TABLE DES MATIERES**

**Remerciements**.....1

**Résumé en arabe**.....2

**Résumé en français**.....3

**Abstract**.....4

**Table des matières**.....5

**Introduction**.....9

**Chapitre I. Les origines de la salinité des eaux en zones côtières**.....13

1. Définition de la salinité des eaux.....13

2. Sources de la salinité des eaux.....14

    2.1. Le domaine marin.....14

        2.1.1. Les embruns marins.....14

        2.1.2. Le biseau d'eau salée.....16

        2.1.3. Mécanismes de l'intrusion marine.....16

        2.1.4. Facteurs déterminants de l'intrusion marine.....18

            2.1.4.1. Effet de l'exploitation.....18

            2.1.4.2. Situation par rapport à la mer.....18

            2.1.4.3. Alimentation de la nappe.....18

            2.1.4.4. Hydrogéologie.....19

    2.2. Le domaine continental.....19

        2.2.1. Dissolution des évaporites.....19

        2.2.2. Concentration par évaporation.....20

        2.2.3. Facteurs déterminants la salinité continentale.....21

    2.3. Sources anthropiques des sels.....24

---

2.4. La salinisation des lacs et des zones humides.....	25
Conclusion.....	25
<b>Chapitre II. Caractéristiques du paysage.....</b>	<b>26</b>
1. Situation géographique.....	26
2. Description du lac.....	27
3. Géologie.....	29
4. Pédologie.....	30
4.1. Les sols peu évolués (SPE).....	31
4.2. Les vertisols (SV).....	32
4.3. Les sols hydromorphes (SH).....	32
4.4. Les sols halomorphes (SHA).....	33
4.5. Utilisation agricole des sols.....	34
5. Géomorphologie.....	35
5.1. Les montagnes.....	35
5.2. Les collines.....	35
5.3. Les glacis.....	36
6. Hydrologie et Hydrogéologie.....	36
6.1. Hydrologie.....	36
6.2. Hydrogéologie.....	39
6.3. Ressources en eaux.....	40
6.3.1. Ressources en eaux superficielles.....	40
6.3.2. Ressources en eaux souterraines.....	41
7. Etude climatique.....	41

---

---

7.1. Le régime pluviométrique.....	42
7.2. Le régime thermique.....	42
7.3. L'humidité .....	43
7.4. Le vent.....	43
7.5. L'évaporation.....	44
7.6. Le bilan hydrique.....	44
7.6.1. L'évapotranspiration.....	45
7.6.2. L'interprétation du bilan hydrique .....	48
7.7. L'indice d'aridité de de Martonne (1926).....	49
Conclusion.....	50
<b>Chapitre III. Matériel et méthodes.....</b>	<b>52</b>
1. Echantillonnage et analyse.....	52
2. Méthodes d'étude.....	53
2.1. Traitement statistique.....	53
2.2. Diagrammes interprétatifs.....	54
2.3. Indice de saturation (IS).....	55
2.4. Les relations ions-chlore.....	56
2.4.1. La relation sodium-chlore.....	56
2.4.2. La relation brome-chlore.....	57
Conclusion.....	58
<b>Chapitre IV. Histoire des études réalisées.....</b>	<b>59</b>
1. Etude Durand (1950).....	59
2. Etude d'Ifagraria (1964).....	60
3. Etude AJCI (1985).....	60

---

---

4. Etude Djamai (1993).....	61
5. Etude BNEDER (1997).....	62
6. Etude Djamai (2000).....	62
7. Etude GHI 2009.....	63
7.1. Etude pédologique.....	63
7.2. Etude hydrologique.....	65
Conclusion.....	66
<b>Chapitre V. Etude statistique multivariee des eaux du lac Fetzara.....</b>	<b>67</b>
1. Statistiques descriptives.....	67
2. Matrice de corrélation.....	72
3. Analyse en Composantes Principales (ACP).....	74
Conclusion.....	80
<b>Chapitre VI. Approche géochimique des eaux.....</b>	<b>81</b>
1. Les paramètres physico-chimiques.....	81
1.1. La température (T °C).....	81
1.2. Le potentiel d'hydrogène (pH).....	82
1.3. Le potentiel d'oxydo-réduction (Eh).....	83
1.4. La conductivité électrique (CE).....	83
2. Diagrammes interprétatifs.....	86
2.1. Diagramme de Piper.....	86
2.2. Diagramme de Durov.....	88
3. Indice de Saturation (IS).....	90
4. Relations ions-chlorures.....	94
4.1. Relation Na <sup>+</sup> -Cl <sup>-</sup> .....	94

---

4.2. Relation Br <sup>-</sup> -Cl <sup>-</sup> .....	97
5. Aptitude des eaux à l'irrigation.....	99
Conclusion.....	104
<b>Chapitre VII. Synthèse et discussion.....</b>	<b>105</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>112</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>115</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>128</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>131</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>133</b>

## **INTRODUCTION**

La salinisation est l'une des principales causes de dégradation de la qualité de l'eau dans le monde. Les mécanismes à l'origine de la salinité d'un système hydrologique sont diverses et complexes. Ainsi, le mode de salinisation dépend du contexte géographique (côtier, continental...), géologique (nature de l'aquifère, minéralogie des sédiments...) et climatique. Les principaux vecteurs impliqués dans la salinisation des masses d'eau sont l'intrusion marine, la dissolution des formations évaporitiques (Bourhane, 2010).

Les eaux de surfaces et souterraines, initialement faiblement minéralisées, peuvent, par interaction avec les roches du bassin versant et par évaporation successives, devenir salines. Les concentrations en sels, peuvent augmenter jusqu'à la précipitation d'évaporites. Les lieux principaux de la formation de sels solides sont les sols agricoles irrigués et les bassins endoréiques où l'évaporation atteint ou excède l'influx d'eaux continentales (Kloppmann et al., 2011).

Les ressources en eau des nappes phréatiques du pourtour méditerranéen, et plus particulièrement celles du Moyen Orient et de l'Afrique du Nord, connaissent de plus en plus une dégradation qualitative et quantitative (Custodio et Bruggeman, 1987; Edmunds et Droubi, 1998; Vengosh et Rosentha, 1994; Vengosh et al., 1999).

Le développement économique et social est directement lié à la disponibilité et à l'utilisation des ressources en eau, et notamment les eaux souterraines, qui sont souvent les seules disponibles tout au long de l'année (Genxu et Guodong, 1999; Hamdy et al., 2003; Braune et Xu, 2010), mais une partie de ces ressources est "fossile" et leur exploitation n'est pas durable (Scanlon et al., 2002).

L'Afrique du Nord est une région typiquement semi-aride où les ressources en eau sont susceptibles d'évoluer spectaculairement sous l'influence de fluctuations climatiques ou d'actions humaines (Cudennec et al., 2007). Ces changements peuvent affecter les stocks d'eau souterraine, rarement en augmentation (Idder, 2007), souvent en diminution importante (Karaoul et al., 2008), mais aussi leur qualité (Karaoul et al., 2008; Bouhlassa et al., 2008). En dehors des flux passant d'un système aquifère à un autre, la recharge naturelle des nappes phréatiques provient essentiellement de l'infiltration des eaux des oueds, lors de leurs crues les plus fortes. En région méditerranéenne, un tel phénomène est souvent très variable dans le temps et dans l'espace (Lange et Leibundgut, 1999).

L'Algérie septentrionale présente un climat semi-aride qui se caractérise par une forte irrégularité pluviométrique. D'une manière générale, les bassins versants sont imperméables (ANRH, 1993). Ce qui donne sur le plan des régimes hydrologiques, une extrême irrégularité saisonnière et interannuelle des écoulements qui est accentuée par de longues périodes de sécheresse, des crues violentes et rapides, et une érosion intense et des transports solides importants (Kadi, 1997).

La salinité des eaux présente l'un des grands problèmes en Algérie, vu son effet dévastateur sur la qualité des eaux. Elle est souvent liée à la dissolution des formations géologiques, à l'effet de l'évaporation et à l'effet d'une intrusion marine (Habes, 2013).

La salinité des eaux et du sol du lac Fetzara, a fait l'objet d'un bon nombre de travaux antérieurs (Durand, 1950; IFAGRARIA, 1967; A.J.C.I, 1985; Djamai, 1993 et 2007; Zenati, 1999; Belhamra, 2001; Habes, 2006 et 2013; Zahi, 2008), pour expliquer l'origine, les causes et l'évolution de ce phénomène.

Le climat de la région du lac Fetzara présente un déficit pluviométrique important. Par ailleurs, la structure temporelle des termes du bilan hydrique est assez complexe. La pluie et surtout l'évaporation présente des variations cycliques annuelles avec une saisonnalité indiscutable, c'est une caractéristique des climats arides, ceci conduit habituellement à la concentration des éléments solubles dans les sols se traduisant par la salinisation de ces derniers. Cependant, les pluies peuvent être importantes pour certaines années, le bilan sera plus positif, traduisant ainsi la recharge de la nappe et le lessivage des éléments solubles vers cette dernière (Djamai et al., 2006).

Notre objectif est de contribuer à la compréhension du processus de minéralisation des eaux souterraines et de surfaces dans cette zone. Cette étude a été menée dans ce sens, avec l'intention de déceler les facteurs provoquant cette salinité, et de localiser leurs foyers.

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour pouvoir déterminer les différentes origines de la salinité à savoir ; l'analyse en composantes principales (ACP) et l'approche géochimique.

Cependant, la prédiction de l'aspect géochimique de la salinité des eaux est une démarche originale qui pourrait s'avérer fructueuse pour une meilleure connaissance de l'origine de cette salinité dans cette région. Cette démarche s'appuie sur les éléments suivants: Utilisation des rapports ioniques caractéristiques, parmi les critères géochimiques qui peuvent aider à l'identifier l'intrusion de l'eau de mer en zones côtières, on utilise



notamment les rapports ioniques  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$ . L'utilisation des teneurs en anion bromure est un complément indispensable des mesures de concentrations en chlorures pour expliquer l'origine des anomalies de salinité dans l'eau. Il permet, grâce à la relation  $\text{Br}^- = f(\text{Cl}^-)$  et au rapport molaire  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$ , de distinguer les zones à influence marine des zones à influence évaporitique.

Utilisation du logiciel « Diagramme » pour déterminer l'état de saturation des eaux par les principales espèces chimiques sous l'effet de l'évaporation isotherme (25°C).

La thèse est structurée autour de sept chapitres précédés par une introduction qui décrit l'origine du sujet, les objectifs visés et l'approche méthodologique utilisée pour atteindre l'objectif.

Le premier chapitre du travail présente une recherche bibliographique sur l'origine de la salinité des eaux.

Le deuxième chapitre est essentiellement dédié à la présentation du secteur d'étude d'un point de vue géographique, géologique, hydrogéologique et climatologique.

Dans le troisième chapitre, il sera question du matériel et les méthodes d'étude, dans le quel sera présenté les travaux effectués sur les eaux du lac Fetzara, les campagnes d'échantillonnages, les techniques analytiques et les outils de traitement des données.

Le quatrième chapitre traitera toutes les principales études effectuées sur le site.

Le chapitre cinq utilisera une approche statistique à partir d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) afin de déterminer les différentes sources de variabilité de la chimie des eaux, en utilisant le logiciel « Xlstat ».

Le chapitre six caractérise de manière globale la géochimie des eaux (minéralisation, faciès chimiques des eaux et origine de la minéralisation).

Le dernier chapitre intitulé synthèse et discussion fera état de la synthèse globale des résultats obtenus avec une discussion en vue d'une meilleur compréhension du comportement hydrochimique des eaux et le processus d'acquisition de la salinité des eaux du la Fetzara.

Enfin, le document sera finalisé par une conclusion générale et les perspectives.

## **CHAPITRE I. LES ORIGINES DE LA SALINITE DES EAUX EN ZONES COTIERES**

Bien que le phénomène d'intrusion marine soit une des origines principales de la salinisation des eaux côtières, il est important de mentionner qu'il existe d'autres origines de la salinité (Custodio, 1997; Bear et al, 1999; Barlow, 2003) telles que:

- L'évaporation et la reconcentration des eaux de surface ou d'aquifères peu profonds.
- La dissolution d'évaporites et l'influence des réservoirs géologiques.

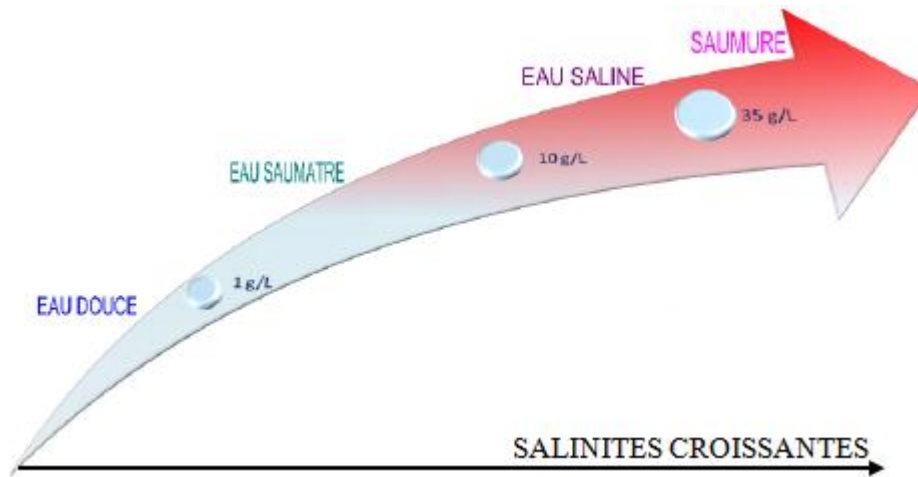
### **1. Définition de la salinité des eaux**

La salinité peut être déterminée directement par la somme des concentrations mesurées en éléments dissous et indirectement, à partir de la conductivité électrique (mS/cm). Toutefois, le terme de salinité est souvent utilisé comme synonyme de chlorinité qui désigne la concentration en chlore dissous sous forme de chlorures (mg/l ou g/l) (Klopman et al, 2011).

Par le terme minéralisation, on désigne la concentration des solides totaux dissous (CTD), ou charge totale dissoute (CTD). Le terme correspondant dans la littérature internationale est TDS, l'abréviation anglaise de Total Dissolved Solids. Le terme salinité est synonyme de TDS et s'exprime généralement en mg/l ou g/l.

Usuellement, on considère en fonction de leur salinité, les eaux douces, saumâtres, salines et les saumures (Kharaka et Hanor, 2005).

- Eau douce: eau dont la salinité est inférieure à 1g/l.
- Eau saline: eau dont la salinité est comprise entre 1 g/l et 35 g/l.
- Saumure: eau dont la valeur de salinité est supérieure à la valeur moyenne de celle de l'eau de mer, c'est-à-dire plus de 35 g/l TDS ( $3.5 \times 10^4$  mg/l TDS).



**Figure 1.** Gammes de concentrations et terminologie (Kharaka et Hanor, 2005).

## 2. Sources de la salinité des eaux

Le cycle de la salinité dans les eaux continentales (figure 2) peut être subdivisé en deux grands domaines, le domaine « marin » lié directement ou indirectement à l'eau de mer et le domaine « continental » pour lequel les sels dissous sont issus essentiellement de l'interaction avec des roches sédimentaires (hors évaporites marines) et concentrées par l'évaporation.

### 2.1. Le domaine marin

L'intrusion marine représente l'un des mécanismes de salinisation les plus répandus impactant la qualité de l'eau côtière. Ce phénomène entraîne des niveaux de salinité qui peuvent dépasser les normes de potabilité de l'eau mais également compromettre son aptitude à l'irrigation (Jones et al, 1999).

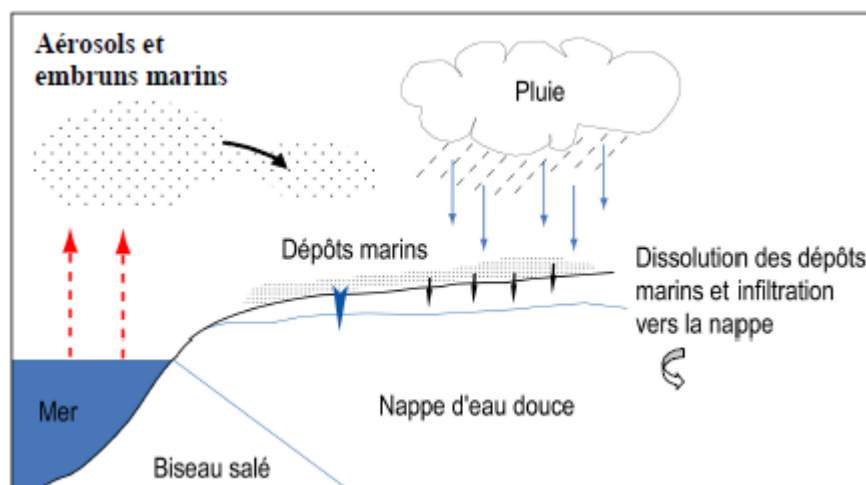
#### 2.1.1. Les embruns marins

Les embruns marins sont des aérosols enlevés par le vent à la crête des vagues. Ils contiennent une forte concentration en sels minéraux, surtout le chlorure de sodium et constituent une source naturelle potentielle de la salinisation des eaux côtières. Ces embruns chargés en cristaux de NaCl, vont se déposer sur les sols. Pendant la période pluvieuse où l'on observe une recharge efficace de la nappe, les eaux infiltrées vont lessiver les cristaux de sels et les entraîner jusqu'à la nappe; ce qui engendre une salinisation de celle-ci (Haddani, 2010).

Dans le domaine « marin » la salinité résulte de la présence d'aérosols marins dans les précipitations, après évaporation partielle et vont s'infiltrer dans les aquifères. La salinité peut être associée également à une intrusion directe de l'eau de mer qui n'est pourtant pas limitée au littoral. En effet, des transgressions marines ont pu engendrer, dans le passé, à l'échelle des temps géologiques, des infiltrations d'eau de mer bien au-delà de la ligne de cote actuelle. Les eaux marines des sédiments marins peuvent également être préservées au sein même de ces sédiments. L'évaporation de saumures sédimentaires, dites « primaires » et peut conduire au dépôt de roches évaporitiques. Ces dernières, lorsqu'elles sont traversées par des eaux souterraines ou de surfaces peuvent se dissoudre donnant des saumures mélangées aux eaux souterraines et suffisent pour induire une salinisation des nappes pouvant impacter et compromettre certains usages.

L'invasion des eaux douces par les eaux salées aura pour effet une dégradation des sols et une salinisation par suite des irrigations avec ces eaux (Boutkhil, 2007).

Dans le cas d'un simple mélange eau douce-eau de mer, l'analyse des teneurs de  $\text{Cl}^-$  et du rapport ionique  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$  permet de montrer la contribution de l'eau de mer à la salinisation de la nappe côtière. Le plus souvent, l'analyse des autres éléments (sodium, calcium...) met en évidence l'influence de processus complémentaires jouant sur la chimie des eaux: échanges nappe-encaissant, interaction eau-roche (échange de cations monovalents contre bivalents), réduction des sulfates, ou précipitation de calcite/dolomite (Vallet-Coulomb et al. 2009).



**Figure 2.** Dissolution des sels marins issus des aérosols et embruns marins (Hsissou, 1999).

### **2.1.2. Le biseau d'eau salée**

Généralement, le long des côtes se développent des plaines à remplissage alluvionnaire, caractérisées par des réservoirs aquifères dont les niveaux piézométriques sont très proches d'un sol fertile (Oulaaross, 2009).

L'équilibre hydrodynamique des systèmes aquifères dans les zones côtières est le plus précaire. Leur mise en exploitation présente des aspects spécifiques liés en particuliers aux relations qui s'établissent entre l'eau douce et l'eau marine. Lorsqu'une pollution de l'eau douce par une eau salée a lieu, il est en général difficile d'en faire disparaître les effets (Khammari et De Marsily, 1994; Marjoua et al., 1997).

Il est alors préférable d'essayer de prévoir les risques d'intrusion marine, ce qui nous place directement devant un double problème complexe, associant la notion de quantité à celle de qualité.

D'autant plus que dans ces zones côtières (arides et semi-arides), la demande en eau est en général forte pour l'alimentation quotidienne des populations rurales et pour l'irrigation.

Les investissements réalisés dans les zones côtières agricoles exigent beaucoup d'eau, ce qui pousse les agriculteurs à creuser d'avantage de puits sollicitant des nappes côtières qui ne sont, généralement que des minces lentilles d'eau douce nageant fragilement sur un biseau d'eau salée omniprésent.

En période sèche, les pompages s'intensifient et engendrent un abaissement du niveau de la nappe et une éventuelle intrusion marine. Parallèlement à cette progression du biseau, la zone de mélange « eau douce- eau salée » s'élargit et lorsqu'elle atteint les crépines du pompage, l'eau pompée devient contaminée.

### **2.1.3. Mécanismes de l'intrusion marine**

En l'absence de perturbation (surexploitation par exemple), la pénétration du niveau de la mer à l'intérieur des terres est naturellement régie par une différence de masse volumique entre deux eaux (UNESCO, 1987; Calvache et Polido-Bosch, 1996):

- L'une salée et marine, plus dense et donc plus assujettie aux forces gravitationnelles;

- L'autre plus ou moins « douce » provenant de l'infiltration des précipitations et constituant ainsi une nappe côtière s'écoulant vers la mer.
- L'interface eau douce- eau salée prend une allure hyperbolique, qui limite la partie basale nommée « biseau ». Dans la réalité, on observe une zone de transition dont l'épaisseur ne dépasse guère quelques mètres.

La forme et l'épaisseur de cette interface dépendent de plusieurs facteurs:

- Les variations des niveaux de la nappe et du niveau de la mer;
- La différence de densité entre les deux liquides qui tend à maintenir l'eau salée en profondeur;
- La diffusion moléculaire du sel dans l'eau douce tendant à minimiser les gradients de concentration;
- Le débit de la nappe qui est fonction du régime d'exploitation et d'implantation des différents aménagements hydrauliques et de la recharge de la nappe;
- La porosité et la perméabilité des terrains aquifères littoraux;
- La géométrie de l'aquifère : topographie du substratum imperméable au niveau de l'interface eau douce- eau salée;
- Les pluies susceptibles de recharger une nappe côtière engendrent une augmentation du débit des eaux souterraines et une poussée de l'interface eau douce- eau salée vers la mer voire une expulsion des niveaux salés vers des niveaux plus profonds.
- En présence de pompages intensifs et périodiques et lorsque l'aquifère est hétérogène, ce phénomène va engendrer une propagation des sels marins vers les eaux souterraines et une augmentation de la salinité de ces eaux pompées.

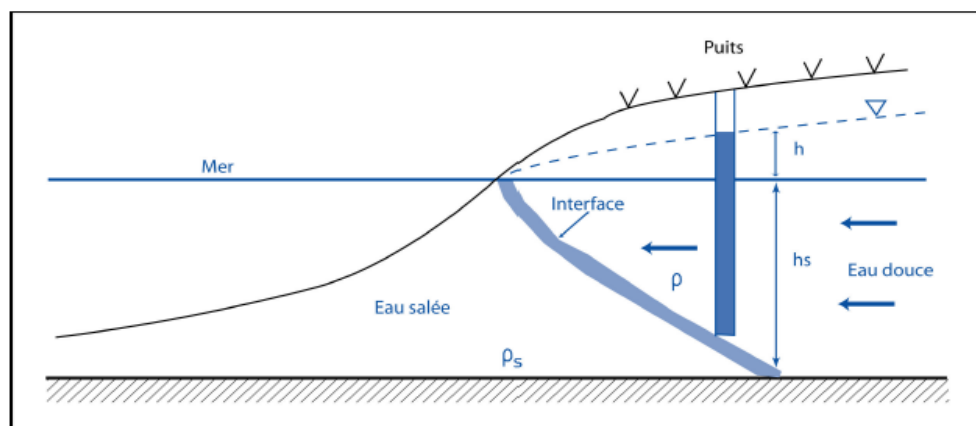


Figure 3. Relation eau douce eau de mer (Custodio, 2002).

## **2.1.4. Facteurs déterminants de l'intrusion marine**

### **2.1.4.1. Effet de l'exploitation**

Toute exploitation intense de la nappe côtière par creusements anarchiques des puits va entraîner un déséquilibre hydrodynamique de l'interface « eau douce – eau salée marine ». Cela se traduit par une diminution des débits souterrains et un abaissement du niveau de la nappe. Celui-ci va devenir inférieur à celui de la mer, ce qui va provoquer un écoulement des eaux marines vers l'aquifère côtier.

Ainsi, l'aspect lié à l'exploitation d'un aquifère en zone côtière peuvent être énumérés comme suite (Olive, 1996; Simmers, 1997):

Baisse du niveau de la nappe;

Pénétration du biseau d'eau salée vers les terres;

Salinisation des eaux de la nappe côtière à cause de cette pénétration, principalement dans les deux premiers kilomètres du rivage;

Abandon des puits à cause des fortes salinités des eaux.

### **2.1.4.2. Situation par rapport à la mer**

La distance du point de captage par rapport à la mer joue un rôle déterminant dans l'évolution de la qualité des eaux. En effet, ces eaux accusent une salinité de plus en plus élevée au fur et à mesure que l'on se rapproche du rivage.

### **2.1.4.3. Alimentation de la nappe**

Généralement, les nappes d'eau souterraine côtières sont alimentées principalement par l'infiltration et la percolation efficaces des eaux de pluie. Le taux d'infiltration efficace conditionne l'évolution piézométrique et par conséquent l'évolution de la qualité des eaux souterraines. En effet, une importante infiltration efficace va favoriser une élévation du niveau de la nappe, une augmentation de son débit et un phénomène de dilution de sa salinité. Dans le cas contraire d'une infiltration efficace moindre ou nulle combinée à des pompages intensifs, nous observons un abaissement du niveau de la nappe et une surconcentration saline des eaux souterraines.

#### **2.1.4.4. Hydrogéologie**

La nature lithologique de l'aquifère, sa perméabilité, sa productivité, son épaisseur, la topographie du substratum à proximité de la mer, sont tous des facteurs qui jouent des rôles importants dans les mécanismes de pollution des eaux souterraines. Les débits souterrains faibles et une bonne perméabilité de l'aquifère côtier favorisent des intrusions marines dont l'extension dépend de l'intensité des pompages dans ces endroits vulnérables.

### **2.2. Le domaine continental**

Les eaux, initialement faiblement minéralisées, peuvent par interaction avec les roches du bassin versant et par évaporation successive, devenir salines.

#### **2.2.1. Dissolution des évaporites**

Les évaporites, terme désignant des dépôts riches en chlorures et sulfates alcalins (avec les ions  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^+$ ). La précipitation de ces sels succède à des concentrations par évaporation intense, généralement dans des lagunes peu ou pas reliées à la mer, ou encore dans des lacs salés. Par ordre de cristallisation, on a les principaux minéraux suivants: le gypse, l'anhydrite, le sel gemme (halite), la carnallite et la sylvite. Ils donnent soit des lits continus, soit des masses lenticulaires, soit des cristaux ou des amas isolés au sein d'argiles ; de sables argileux ou de dolomies (Raoult et Foucault, 2005).

Les halogénures comme par exemple l'halite ( $NaCl$ ) et les sulfates, ainsi que le gypse ( $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) font partie des minéraux salifères les plus souvent impliqués dans les cas de salinisation par une réaction eau-roche. Les réactions de dissolution dépendent des conditions physico-chimiques et thermodynamiques bien particulières (pression, température, constante de solubilité du minéral impliqué, force ionique de la solution...). La dissolution de l'halite se traduit par une augmentation de la concentration en ions Chlore ( $Cl^-$ ) et sodium ( $Na^+$ ), tandis que la dissolution du gypse conduit à une augmentation des ions calcium ( $Ca^{++}$ ) et sulfate ( $SO_4^{--}$ ) (Bourhane, 2010).

Une fois en contact avec l'aquifère, l'eau de la nappe peut s'enrichir d'éléments nouveaux provenant du réservoir géologique. Cette interaction est d'autant plus importante que le temps de résidence est long et les minéraux des roches aquifères sont solubles (Vengosh, 2003).



### **2.2.2. Concentration par évaporation**

L'aridité du climat se manifeste essentiellement par une faible hauteur pluviométrique, combinée à une forte évapotranspiration potentielle ce qui aboutit à l'augmentation de la salinité des eaux.

Les conditions climatiques se manifestent par deux caractéristiques qui s'ajustent parfaitement aux mécanismes de la mobilisation et de l'accumulation des sels

(Hsissou, 1999):

- Un régime irrégulier des précipitations avec une dominance des averses brutales qui sont séparées par des périodes de sécheresse ;
- Une saison sèche prolongée, pendant laquelle la chaleur et l'insolation provoquent une intense évaporation. Sous climat chaud et aride, le sel peut circuler grâce au lessivage des horizons superficiels salés (mobilisation), et de la remontée capillaire (remobilisation et accumulation).

L'effet de la concentration des eaux par évaporation peut être aussi important dans le cas d'une nappe d'eau souterraine proche de la surface. En effet, le climat constitue un facteur déterminant dans les phénomènes de dilution et de surconcentration en sels des eaux souterraines superficielles (Younsi, 2001), et principalement celles dont l'alimentation se fait exclusivement à partir de l'infiltration efficace des eaux pluviales. En effet, pendant les saisons humides où l'on observe une infiltration efficace importante, on note une élévation piézométrique, une augmentation du débit souterrain et une dilution de la charge saline des eaux. Par contre, pendant les saisons sèches caractérisées par une absence d'alimentation de la nappe à laquelle s'ajoute une exploitation de celle-ci, on observe une concentration des eaux en sels.

Les minéraux naturels de la croûte terrestre constituent la source principale de sel dans le sol, et dans l'eau. En effet durant le processus d'altération chimique, qui implique l'hydrolyse, l'hydratation, l'oxydation et carbonatation, les sels sont libérés progressivement avant de subir une solubilisation.

Cependant la minéralisation des eaux dépend de la nature des formations avec lesquelles elles entrent en contact (Gaucher et Bardin, 1974).

La perméabilité des sols joue un rôle important dans la protection des nappes d'eau souterraine sous jacentes. Ils pourraient arrêter et fixer une grande part de la pollution des eaux qui transite par les sols pour percoler vers la nappe.

La dissolution des aérosols et des embruns marins, constitue une source potentielle naturelle de la salinité des eaux souterraines côtières (BRGM, 1996). Ces aérosols et embruns chargés en cristaux de sels, vont se déposer sur les sols. Pendant la période pluvieuse où l'on observe une recharge efficace de la nappe, les eaux infiltrées vont lessiver les cristaux de sels et les entraîner jusqu'à la nappe, ce qui engendre une pollution de celle-ci. Cette pollution est localisée dans les premiers kilomètres du rivage.

Quand les pluies sont faibles (périodes sèches), ne faisant qu'imprégner les couches superficielles sans pouvoir atteindre la nappe, la concentration des sels dissous dans l'eau du sol par évaporation est intense. Il s'ensuit une salinisation progressive des solutions de la zone non saturée et par conséquent celle de la zone saturée lors des périodes d'infiltration.

Les nappes d'eaux souterraines dans les zones côtières circulent à des profondeurs généralement faibles qui ne dépassent pas 15 mètres, et qui diminuent au fur et à mesure qu'on se rapproche de la côte marine. A cela vient s'ajouter les hauteurs pluviométriques accompagnées d'une intense évaporation, tous ces facteurs s'unissent pour augmenter la concentration des sels dans les zones non saturées, qui vont par la suite être lessivées par les eaux de pluie efficace au cours des averses, pour assurer l'alimentation des nappes phréatiques ce qui provoquent une élévation de leur salinité ainsi que leurs minéralisation (Hsissou, 1999).

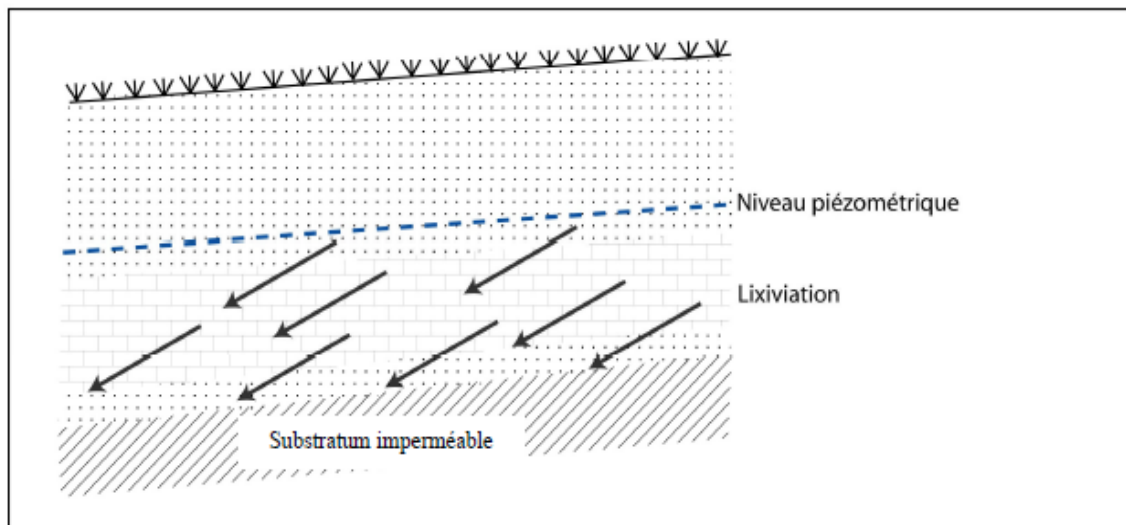
La composition lithologique, la porosité et la perméabilité des terrains aquifères pourraient constituer une autre source de salinité des eaux souterraines ou faire augmenter cette salinité (Oulaaross, 2009).

### **2.2.3. Facteurs déterminants la salinité continentale**

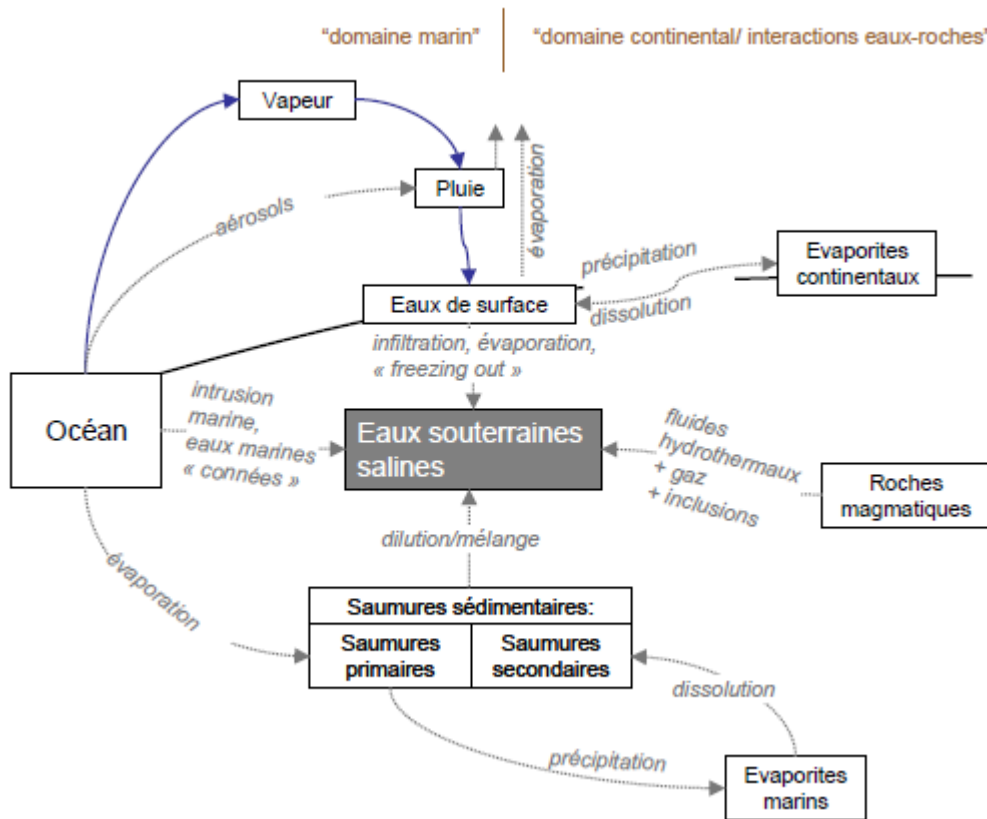
La dissolution de la roche réservoir pourrait constituer une autre source de salinité des eaux souterraines. Elle dépend principalement de la composition lithologique, la porosité et la perméabilité des terrains aquifères (Haddani, 2010).

Plusieurs facteurs jouent un rôle essentiel dans la mise en solution des éléments chimiques et sont étroitement liés à la nature des formations en place (Stumm et Morgan, 1981; Fetter, 1993). Parmi ces facteurs, nous pouvons distinguer :

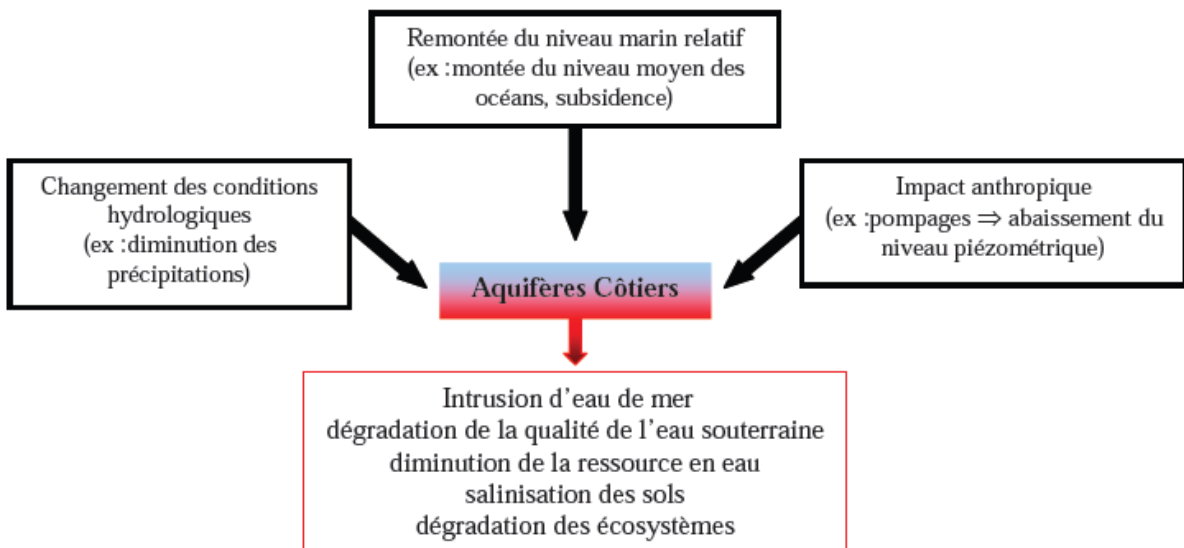
- L'importance de la surface de contact eau-roche et la durée de contact entre l'eau et la matrice de l'aquifère, l'eau est d'autant plus chargée que la surface et la durée sont grandes (forte porosité ouverte);
- Les facteurs physiques telles que la température et la pression influencent de manière significative les échanges eau- roche ;
- La perméabilité ou la vitesse de circulation de l'eau dans le terrain : plus l'eau circule lentement dans une formation, plus sa minéralisation augmente.
- La nature de la roche réservoir et de celle de la zone non saturée. A titre d'exemple, les terrains évaporitiques libèrent par lessivage des teneurs importantes en NaCl, dans les eaux souterraines qui y circulent; dans des formations aquifères calcaires, elles seront très riches en calcium.



**Figure 4.** Source naturelle de salinité des eaux souterraines par lixiviation (Hsissou, 1999).



**Figure 5.** Mécanismes naturels de salinisation des eaux de surfaces et souterraines (Kloppman et al., 2011).



**Figure 6.** Exemple et conséquences des différentes pressions s'exerçant sur un aquifère côtier (Kloppman et al., 2011).

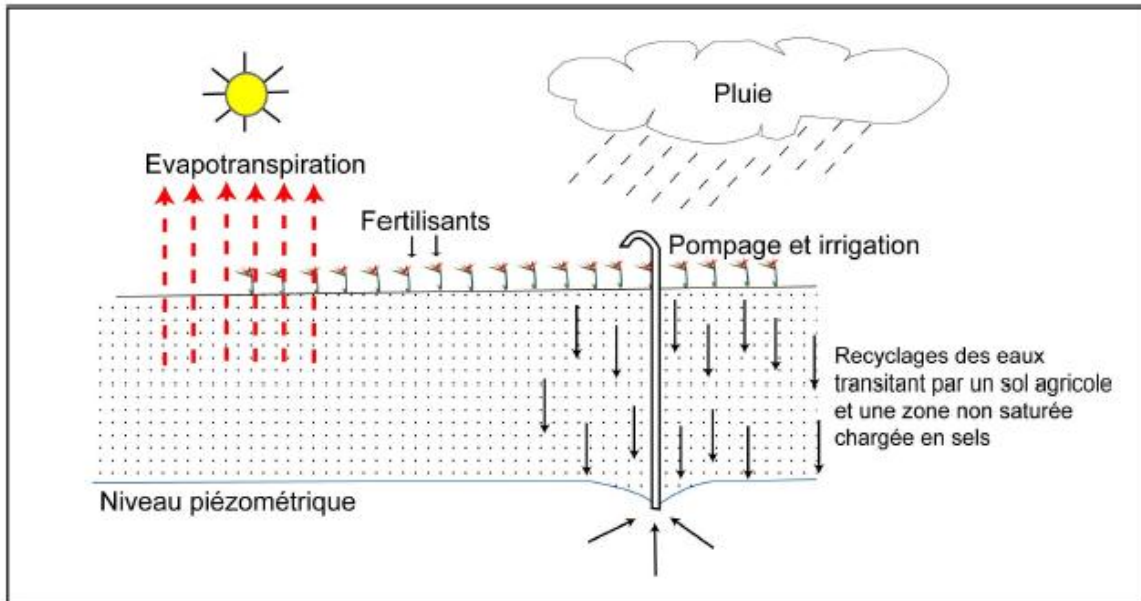
### 2.3. Sources anthropiques des sels

Le facteur anthropique correspond à la surexploitation d'un aquifère. On parle de surexploitation lorsque les prélèvements d'eau excèdent la recharge et conduisent à un abaissement du niveau piézométrique. Durant les 30 à 40 dernières années, le développement socio-économique et agricole des zones littorales a entraîné une forte augmentation des prélèvements d'eau, en particulier dans les régions où des ressources en eau alternatives, comme les eaux de surface, sont insuffisantes (de Montety, 2008).

En zone urbaine, les principales activités impliquées sont l'évacuation des eaux usées industrielles ou domestiques. La salinité des eaux usées provient essentiellement des rejets de détergents, riches en sodium et en bore (Raymond et Butterwick, 1992), de la lessive en poudre et des liquides utilisés dans les lave-vaisselle (riche en chlore). Ces flux salins industriels ou domestiques peuvent affecter la qualité des eaux souterraines, surtout s'ils sont réutilisés sans traitement approprié (difficile pour des éléments comme les chlorures et le bore) pour l'irrigation ou la recharge artificielle des nappes. En zone rurale, l'activité agricole et l'élevage sont les principales sources de salinisation des ressources en eau souterraine. L'usage d'eaux usées ou à forte salinité pour l'irrigation génère un apport d'ions comme les chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) ou le sodium ( $\text{Na}^+$ ). L'épandage de fertilisants artificiels et autres engrais d'origine animale entraîne un apport non négligeable en ions potassium ( $\text{K}^+$ ), ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) ou nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) mais aussi de  $\text{Cl}^-$  dans la nappe. D'autres formes d'azote sont apportées comme l'urée ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ), l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ), le nitrate d'ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) et l'engrais animal (Bolke et Horan, 2000; Bolke, 2002).

L'irrigation avec des eaux riches en sels peut entraîner la fixation de sodium par le complexe adsorbant du sol, donc un processus de salinisation, avec ses conséquences éventuelles pour les propriétés du sol : tendance à la dispersion des argiles, à la dégradation de la structure, à la perte de perméabilité et à l'asphyxie des plantes. L'intensité du processus de salinisation dépend des caractéristiques du sol, de la qualité des eaux utilisées, des conditions de leur emploi et en particulier de l'efficacité du système de drainage (Gouaidia, 2008).

Cependant ces pratiques d'irrigation accroissent le risque de salinisation, au point que plus de 20 % des sols irrigués sont affectés par un problème de salinité en Algérie (Douaoui et Hartani, 2007 ; Bouhlassa et al, 2008; Rouabhia et Djabri, 2010).



**Figure 7.** Sources naturelles et anthropiques de salinité : évaporation et recyclage des eaux d'irrigation (Hsissou, 1999).

#### 2.4. La salinisation des lacs et des zones humides

La salinisation affecte fréquemment les lacs des bassins endoréiques, surtout en zone aride. Deux types de configurations susceptibles d'entraîner une salinisation de ces types de milieu ont été distingués. La première intervient lorsque le volume d'eau perdue par évaporation est supérieur au volume d'eau douce arrivant dans le lac. Cette situation peut être observée notamment en cas de détournement des cours d'eau alimentant le lac, ce qui provoque une diminution des flux entrants et de la recharge. L'autre configuration se manifeste en cas d'apport d'eaux salées. Dans cette situation, l'arrivée de flux salins accentue la salinisation initiée par l'évaporation. Ces flux peuvent avoir une origine naturelle, par des sources à forte salinité ou par les eaux d'irrigation de la plaine agricole (Kolodny et al., 1999; Nishri et al. 1999).

#### Conclusion

Les processus qui augmentent la minéralisation d'une eau ou d'un sol au-delà d'un seuil défini par ses usages sont regroupés sous le terme de salinisation, il désigne l'ensemble des mécanismes physique ou chimiques comme l'évaporation, la dissolution de minéraux, l'interaction avec l'eau de mer. Cette désignation de la qualité de l'eau peut rendre cette ressource impropre à la consommation humaine, à l'usage industriels et affecter l'agriculture excédent la tolérance aux sels des plantes cultivées.

## CHAPITRE II. CARACTERISTIQUES DU PAYSAGE

Le lac Fetzara, initialement une zone humide naturelle, a été envisagée d'assécher depuis l'année 1844 dans le cadre de la lutte contre le paludisme. La première tentative achevée en 1880 creuserait un canal de 16 kilomètres d'Est en Ouest. Entre 1906 et 1934 sont creusés les canaux de l'oued Mellah, de l'oued Ziyed et de l'oued El-Hout, à partir de cette époque, le lac a gardé sa physionomie actuelle.

Les premiers projets de mise en valeur ne visaient qu'à un reboisement en eucalyptus dans les années 1875, 1888-1891 et 1949. Malgré des échecs répétés, une nouvelle tentative est faite en 1954, pour fournir de l'ombrage aux pâturages.

S'inspirant des marais Pontins (France), on a installé en 1940, des parcelles de 100 hectares, attribuées à des anciens élèves d'une école d'agriculture; malgré l'assistance technique et financière de l'État, l'échec fut complet (Trvers, 1958).

Une autre tentative en 1999-2000 par la CGA (générale des concessions agricoles) pour la création de trois périmètres agricoles, n'a pas donné des résultats escomptés (sols inondés durant toute la période hivernale).

Depuis l'année 2003, le lac Fetzara a été inclut dans la liste des zones humides d'importance internationales liste conformément à l'article 2. 1 de la convention RAMSAR.

### 1. Situation géographique

Le Lac Fetzara est situé à 18 Km au Sud-Ouest de Annaba et à 14 Km de la mer. Il est représenté par une large dépression dont les dimensions sont approximativement de 17 km d'Ouest en Est et 13 Km du Nord au Sud. La superficie du lac Fetzara est d'environ 18600 ha, la partie inondable du lac est située au centre de la zone et couvre une superficie estimée à 13000 ha (Djamai et al., 2011). Il est limité au Nord par le massif de l'Edough, au Sud par les monts d'Ain Berda et les cordons dunaires situés à l'Est et à l'Ouest (Habes et al., 2011).

Le lac Fetzara se situe dans la wilaya d'Annaba, Daïra et commune de Berrahal. A la périphérie du lac existent plusieurs agglomérations: au Nord, le chef lieu de la commune de Berrahal, au Sud les territoires des communes d'El Eulma (oued El-Hout) et de Cheurfa et, à l'Est, les petits villages d'El Gantra et de oued Ziyed (GHI, 2009).

### Coordonnées géographiques

- **Latitude:** 36° 43' et 36° 50' N
- **Longitude:** 7°24' et 7°39' E
- **Altitude:** Mini: 10.25 m, Maxi: 40 m Moyenne: 25.35 m
- **Superficie:** 20.680 hectares

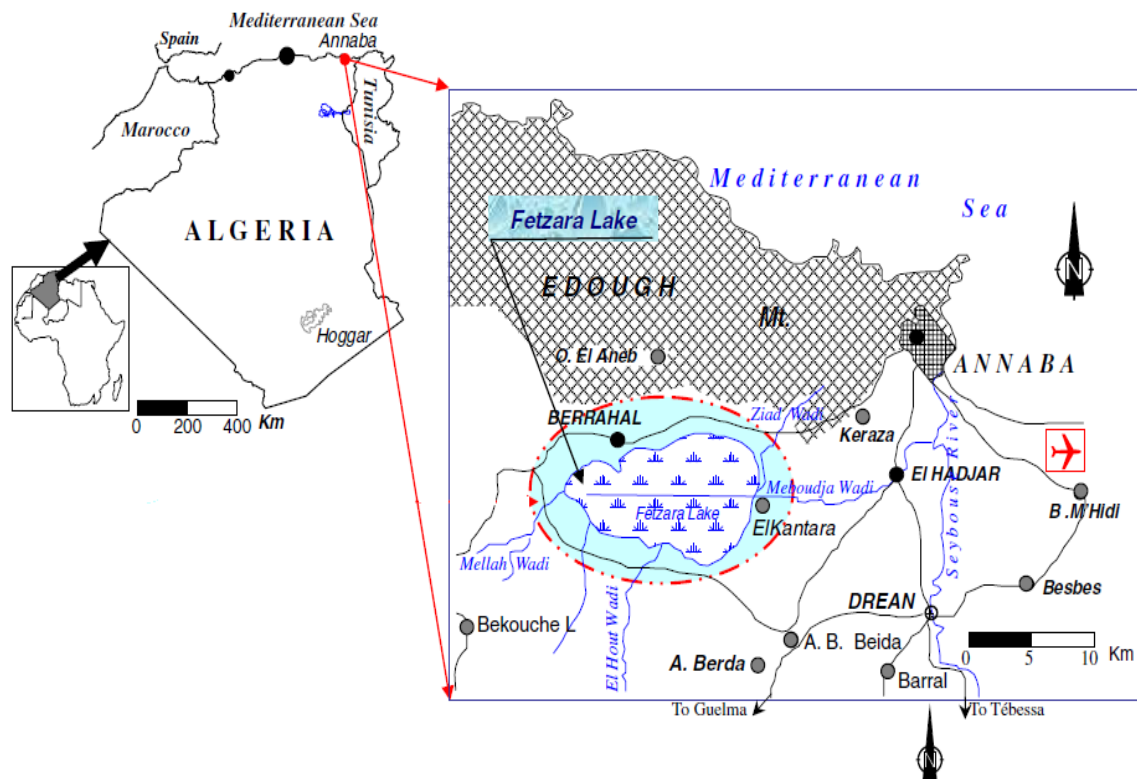


Figure 8. Situation géographique du lac Fetzara (Rouabhia et al., 2010).

## 2. Description du lac

Le réseau d'assainissement est composé de trois niveaux

- Les trois oueds (Ziyed, El-Hout et Mellah) constituent les axes principaux de drainage naturel des excédents d'eau et jouent le rôle d'émissaires naturels de colature des fossés principaux.
- Les fossés principaux collectent les eaux des fossés secondaires.
- Les fossés secondaires qui longent les parcelles et se jettent dans les fossés principaux

L'état général des fossés est alarmant étant donné qu'ils sont complètement envahis par les roseaux et la végétation de toute nature.





**Figure 9.** Les fossés (GHI, 2009)

Le lac est drainé par un canal de 14 Km de long, qui la traverse d'Ouest en Est. Ce canal a été réalisé entre la période de 1943 à 1947.

L'observation sur le terrain montre une dégradation importante de se talus



**Figure 10.** Canal principal (GHI, 2009).

Actuellement, la capacité d'évacuation du pont vanne ne peut dépasser les  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , selon les observations effectuées.



**Figure 11.** Pont-vanne (GHI, 2009).

### 3. Géologie

C'est une vaste dépression de 186 00 ha environ dont le fond est formé par une vase riche en matières organiques.

Les formations géologiques de la zone étudiée comportent (GHI, 2009):

- Des alluvions récentes du quaternaire constituées de limons, sable, gravier et travertin qui occupent la plaine alluviale.
- Des affleurements de flysch de grés de Numidie (quartzeux et rougeâtres), alternant avec des lits d'argile formant les reliefs des massifs du Nord-Ouest et du Sud de la zone, datés de l'Eocène supérieur associés à des affleurements de marne à ammonites pyriteuses du Crétacé inférieur ainsi que du calcaire du Trias.
- Des roches éruptives et métamorphiques (schistes cristallins et granites) du trias, formant les massifs du Nord de la zone.
- Quelques affleurements de calcaire et calcaire marneux phosphatés de l'Eocène moyen et inférieur

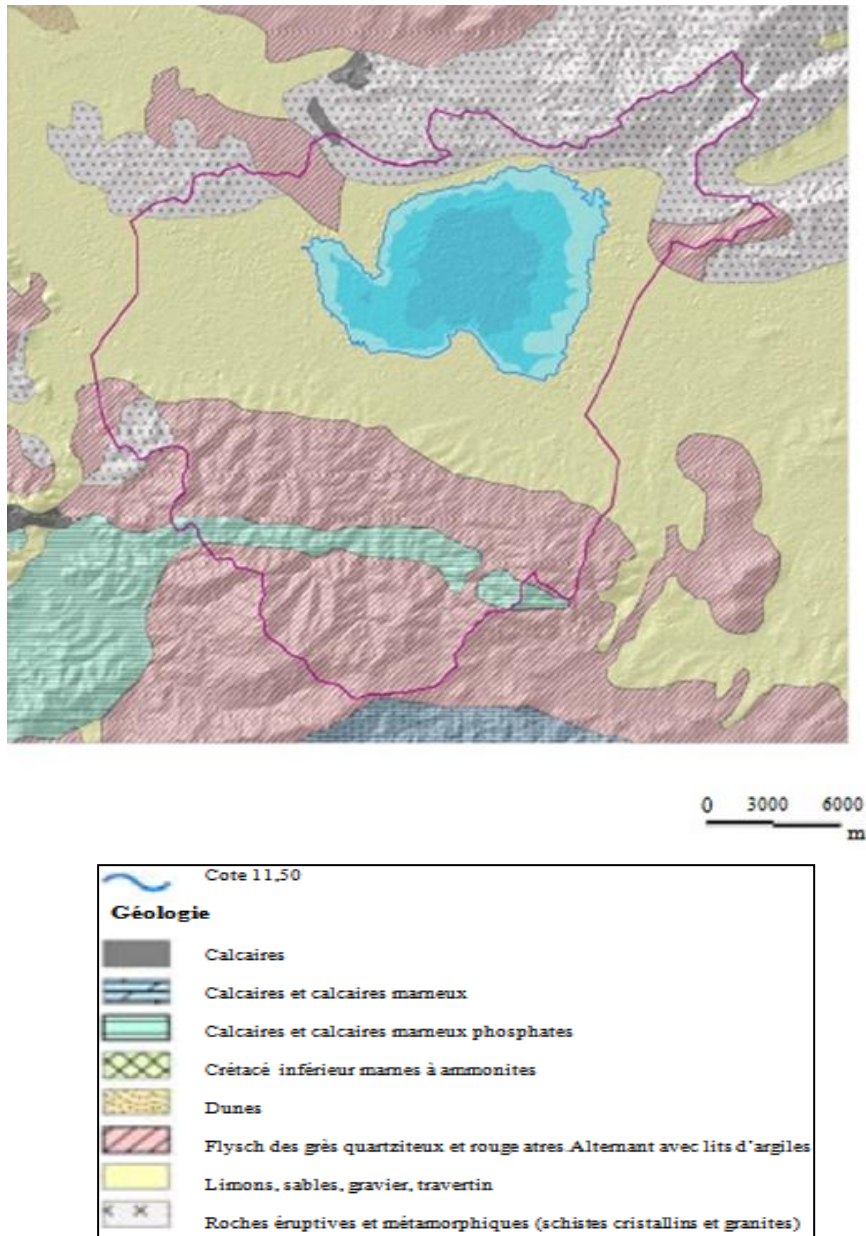


Figure 12. Géologie du bassin versant du lac Fetzara (GHI, 2009).

#### 4. Pédologie

Les sols de la région du lac Fetzara ont suscité l'intérêt de plusieurs organismes de développement à savoir; la société de conseil italien Ifagraria (1967), l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (A.N.R.H., 1980), l'Agence Japonaise de Coopération Internationale (A.J.C.I., 1985) et le Bureau National d'Etude pour le Développement Rural (B.N.E.D.R., 1997 et 1999), ces derniers ont dressé des cartes pédologiques qui constituent toujours une base d'information de la plupart des études pédologiques dans la région.

Les différents types de sol de la région de notre étude sont:

#### **4.1. Les sols peu évolués: (SPE)**

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

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

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

- Les sols peu évolués non climatiques, d'apport alluvial, ils sont caractérisés par un niveau hydromorphe, d'une texture fine, d'une faible perméabilité et d'une rétention en eau élevée.
- Les sols peu évolués non climatique, d'apport alluvial, non calcaire, ce sont des sols plus fertiles, caractérisés par une bonne perméabilité et d'une texture moyenne.
- Les sols peu évolués non climatiques, d'apport alluvial, peu calcaire, ces derniers sont fertiles et conviennent à une large gamme de cultures. Ils sont caractérisés par une texture et un taux de matière organique moyen. La perméabilité est modérée pour cette classe. Ces sols sont formés par les effets colluviaux et alluviaux. La texture est grossière à moyennement grossière. Certains sols sont calcaires et d'autres ne le sont pas. Dans les terrasses basses, assez forte hydromorphie dans les couches inférieures.
- Les sols peu évolués non climatiques, d'apport colluvial non calcaire. Ces sols colluviaux sont les plus répandus dans la classe. Ils sont caractérisés par les faibles teneurs en humus dans la couche supérieure. Généralement, sableux et de très bonne perméabilité avec une nappe basse.
- Les sols peu évolués non climatiques, d'apport colluvial, avec des colluvions fines non calcaires. Ces sols sont semblables aux sols précédents. Mais, ils sont moyennement grossiers et ont une forte hydromorphie.

#### **4.2. Les vertisols (SV)**

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

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

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

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

#### **4.3. Les sols hydromorphes (SH)**

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

Deux sous classes caractérisent ce type de sols:

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

#### **4.4. Les sols halomorphes (SHA)**

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

On a plusieurs types de sols halomorphes:

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

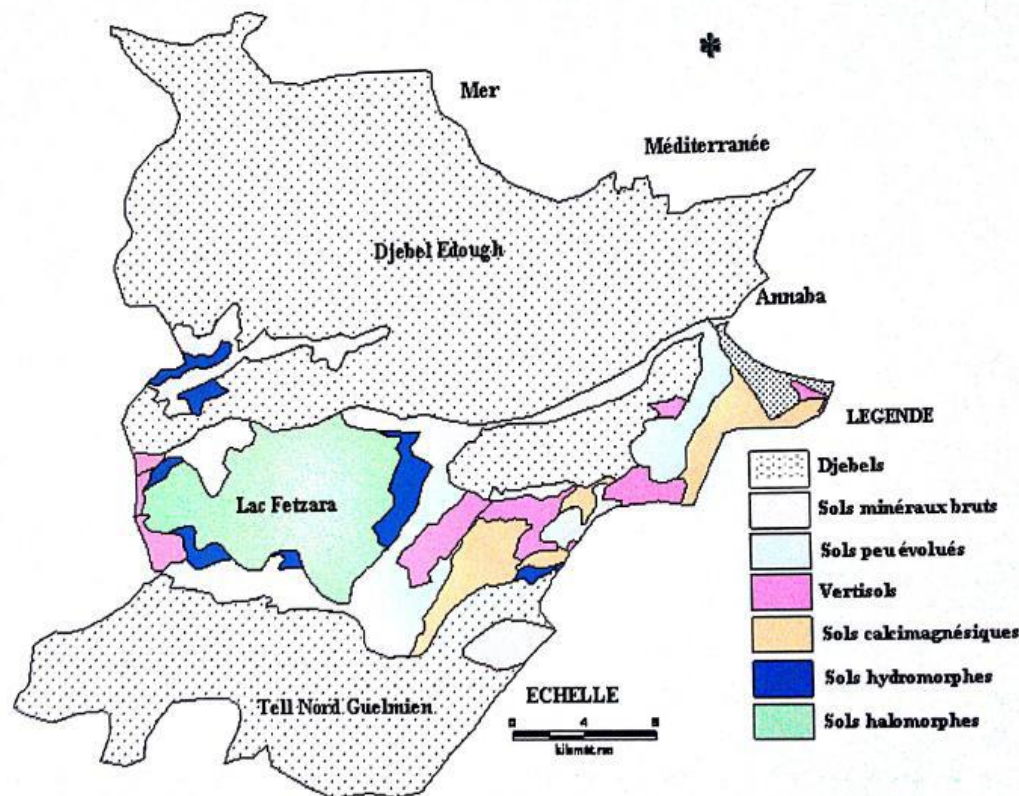


Figure 13. Carte pédologique de la région de Annaba (in Zenati, 2010)

#### 4.5. Utilisation agricole des sols

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

Dans la zone située à l'Est du lac Fetzara, s'étendant jusqu'à la route Annaba- Guelma, les terres cultivées, si elles ne sont pas lissées en jachère, alternent principalement entre la céréaliculture en sec (blé tendre, orge) et la tomate industrielle. On peut rencontrer le tabac et un maraîchage sur des superficies réduites (poivron, choux, choux- fleurs, laitue et parfois oignon).

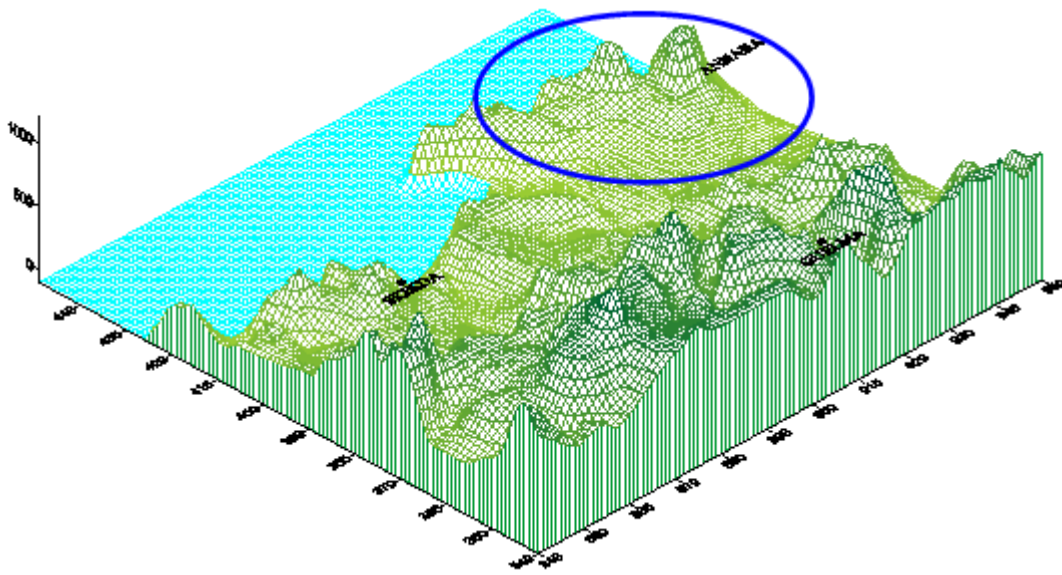
Au Nord du lac Fetzara (zones d'oued Ziyed et Kali Toussa), zones généralement inondées pendant l'hiver, ces terres sont lissées comme pâturage, toutefois dans certaines parcelles on y cultive du maraîchage à cycle court: courgettes, cucurbitacées, tomates, haricots....

Au Sud et à l'Ouest du lac de Fetzara, les terres sont cultivées en céréales ou fourrages en sec, alors qu'autour des quelques points d'eau (puits et retenues) sont cultivées la tomate industrielle et la pastèque.

L'élevage se concentre principalement dans la périphérie du lac Fetzara, où peuvent côtoyer à la fois le mode traditionnel (un à quelques bovidés, des brebis, chèvres, et de la volaille); un élevage intensif plus modernisé, utilisant des structures grandes et consolidées, dans lesquelles, l'élevage reçoit une alimentation d'engraissement (étables pour vaches laitières, bergères batteries pour poules de chair ou de ponte et pour dindes).

## 5. Géomorphologie

L'aire d'étude correspond à la partie occidentale de la plaine d'Annaba qui s'organise en arc de cercle autour du massif de l'Edough.



**Figure 14.** Modèle numérique de terrain de la région d'étude (GHI, 2009)

### 5.1. Les montagnes

Qui constituent en majorité les limites de la plaine étudiée, sauf dans la partie Ouest où on rencontre du sable dunaire ancien. Leur altitude ne dépasse pas les 400 mètres. Elles possèdent des pentes raides entaillées par des talwegs creusés par l'érosion torrentielle.

### 5.2. Les collines

S'étendent au pied des montagnes et constituent une transition entre elles et les premières pentes ou glacis qui se prolongent vers la plaine alluviale de Fetzara.



### 5.3. Les glacis

Ce sont généralement des glacis de collines à pente variable. En l'absence des collines, ces glacis s'appuient directement sur les montagnes. Ils constituent un raccord entre montagnes, collines et les différentes zones alluviales.

Entre ces massifs, la dépression se présente comme une vaste cuvette de remblaiement alluvial très plate et très basse (altitude de 20 à 30 m au Sud et de 10-15 m au Nord).

## 6. Hydrologie et Hydrogéologie

### 6.1. Hydrologie

Les ressources en eau en Algérie proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. Il est à noter que ces ressources sont très variables notamment celles qui proviennent des nappes tributaires des aléas climatiques. L'exploitation de ces ressources est très intense avec les besoins grandissants. Les bassins versants sont regroupés en trois zones (ANRH, 1993):

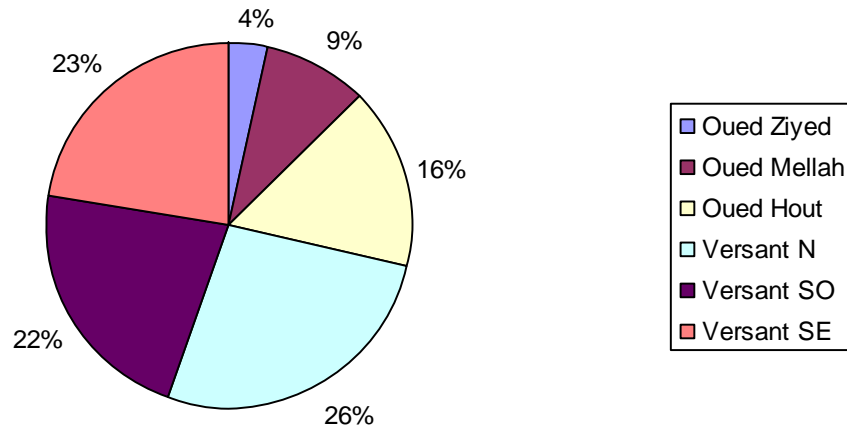
- Les bassins tributaires de la Méditerranée situés au Nord de l'Algérie ont un apport moyen annuel estimé à 11 milliards de m<sup>3</sup>. L'utilisation de l'eau est liée aux activités économiques.
- Les bassins endoréiques occupant les hautes plaines dont les eaux se perdent en grande partie par évaporation dans les chotts. L'écoulement annuel moyen est estimé à 700 hm<sup>3</sup>.
- Les bassins sahariens apportent en moyenne 650 hm<sup>3</sup> par an. L'écart pluviométrique moyen montre un déficit accentué d'Est en Ouest. L'Est algérien est la partie la plus humide avec une moyenne pluviométrique de 530 mm par an. Le Centre occupe la seconde place avec 480 mm. Enfin, l'Ouest est plus sec avec une moyenne annuelle de 260 (Alili, 1993).

D'après AJCI (1985) le Bassin versant du lac Fetzara est de 515 km<sup>2</sup>. Les eaux sont collectées des oueds Ziyed, El-Hout et Mellah, des ruisseaux, des eaux écoulant directement à la surface des pentes de la périphérie du lac, et des pluies.

L'oued Ziyed se situe au Nord-Est du lac, avec un bassin versant de 19 km<sup>2</sup>.

L'oued El-Hout est considéré comme étant le plus grand cours d'eau du Sud-Est, son bassin versant est de 81 km<sup>2</sup>.

L'oued Mellah se situe à l'Ouest du lac Fetzara, son bassin versant est de 47 km<sup>2</sup>. Représentant tous les trois 29% de la superficie totale du bassin versant et faisant partie du réseau hydrographique endoréique.



**Figure 15.** Distribution de la superficie du bassin versant du lac Fetzara

**Tableau 1.** Superficie du bassin versant du lac Fetzara (Données en km<sup>2</sup>, AJCI 1985).

Oueds principaux	Superficie
Oued Ziyêd	19
Oued Mellah	47
Oued El-Hout	81
Ruisseaux et autres petits bassins	Superficie
Versant Nord	138
Versant Sud-Ouest	114
Versant Sud-Est	116
<b>Total</b>	<b>515</b>

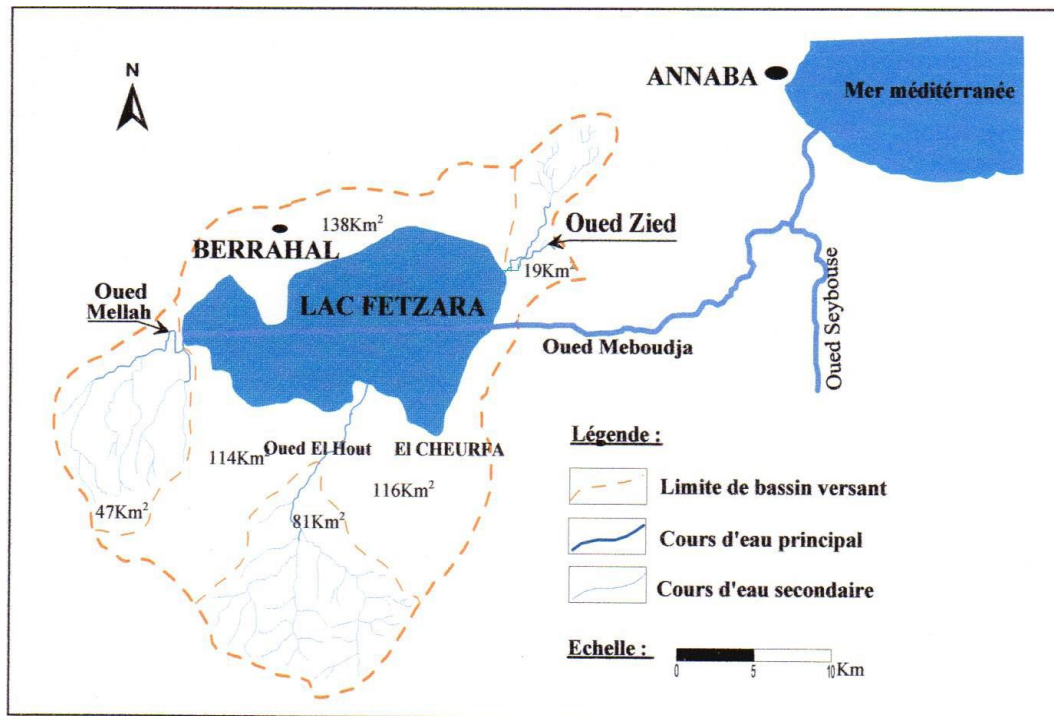


Figure 16. Les principaux sous bassins versant du lac Fetzara (in Zenati, 1999)



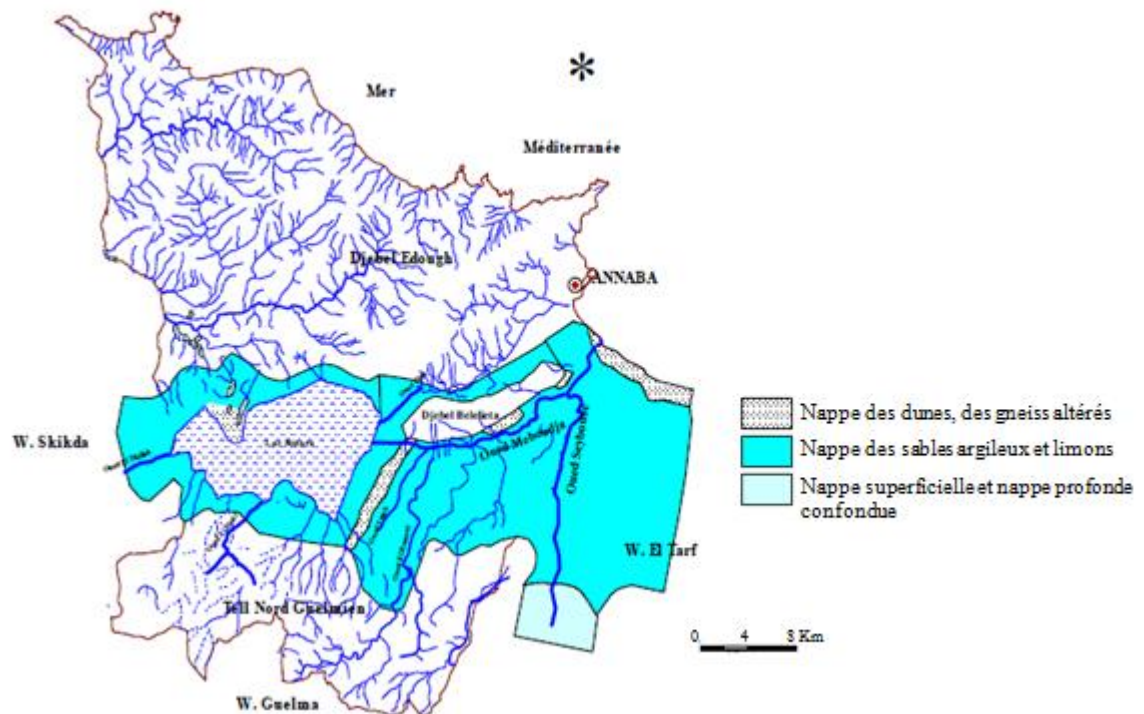
Figure 17. Bassin versant du lac Fetzara (GHI, 2009).

## 6.2. Hydrogéologie

Du point de vue hydrogéologique, le lac Fetzara occupe la région Ouest de la plaine d'Annaba, il est entouré par une nappe superficielle discontinue. La lithologie de cette nappe est constituée par des alluvions (sables, limons et argiles) avec une texture argilo-sableuse à argilo-limoneuse, son épaisseur varie entre 2 et 10 m, donc à potentialité hydrauliques très limitées. Cette nappe est exploitée par un nombre important de puits destinés à l'irrigation, l'industrie et l'élevage (Zahi et al., 2013).

Les études faites (Rouabhia et al., 2007; Zenati, 1999 et 2010) dans les environs du lac montrent deux directions principales du flux souterrain. D'un côté, le lac est alimenté par l'aquifère. D'autre part, il y a aussi une alimentation de l'aquifère à partir des eaux de l'oued Meboudja, dans le secteur Nord-Est du lac.

Les interprétations piézométriques montrent une très forte interaction entre l'oued, le lac et les systèmes aquifères. Les études ont démontré aussi que les extractions d'eau dans les puits ont provoqué des changements dans la direction de circulation de l'eau souterraine. En plus, la recharge provenant des précipitations a descendu aussi pendant les dernières années. Ces facteurs ont provoqué une augmentation de la salinité de l'eau souterraine.



**Figure 18.** Nappes entourant le Lac Fetzara (in Zenati, 1999).

### **6.3. Ressources en eaux**

#### **6.3.1. Ressources en eaux superficielles**

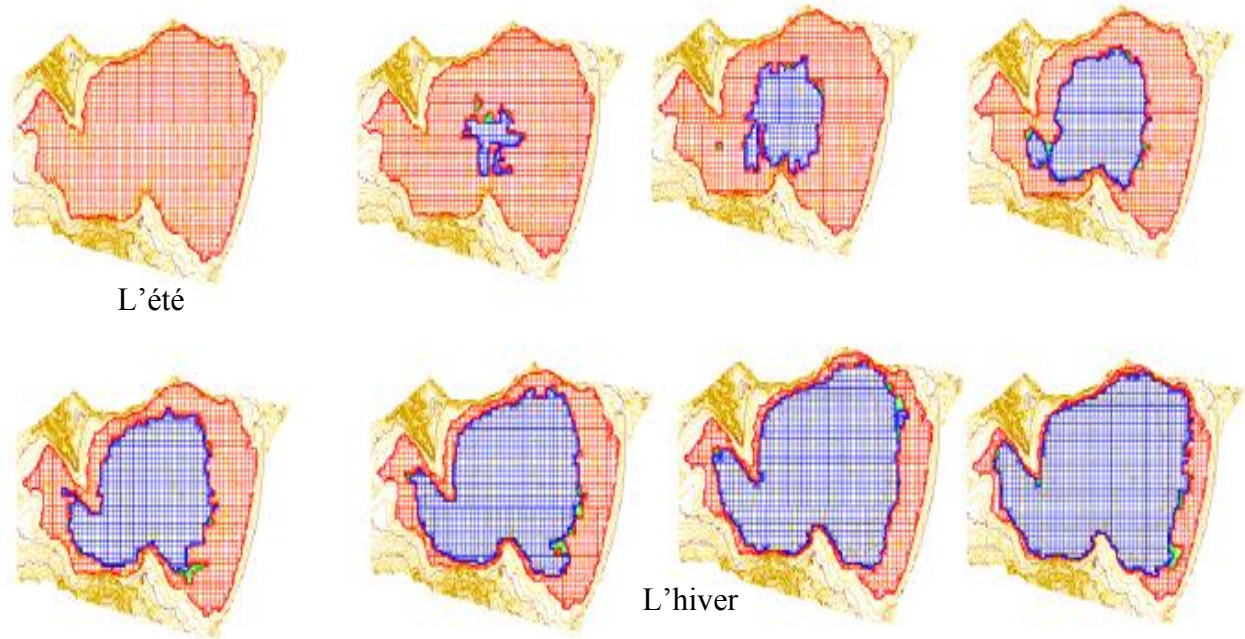
Les eaux du lac proviennent de trois (03) oueds (Ziyed, El-Hout et Mellah), des ruisseaux, des eaux coulant sur la surface des pentes de la périphérie du lac et de pluie tombant directement sur le lac, En ce qui concerne le drainage du lac, il est effectué tout au long de l'année par un canal d'assèchement artificiel vers l'oued Meboudja un affluent du Seybouse.

Le sous bassin oued Seybouse maritime, du bassin du Seybouse, drainant 1066 km<sup>2</sup>; les cours d'eau et oued Mellah vers l'Est de la zone, parcourent des plaines ondulées et leurs eaux sont utilisées en irrigation des cultures.

Les plaines basses de texture fine à drainage mauvais sont facilement inondables pendant la période des pluies. Les diverses terrasses alluviales et les dunes qui bordent le lac Fetzara renferment une nappe phréatique assez peu profonde. La durée d'inondation du lac est fonction de la pluviométrie de l'année.

Durant la saison pluvieuse, l'eau remonte jusqu'à la côte de 12 mètres environ. Cet aspect temporaire, la succession de périodes d'assèchement et de mise en eau rendent le lac particulièrement intéressant, au vu de la minéralisation renouvelée à chaque saison, ce qui prolifère un milieu favorable pour l'alimentation des oiseaux hivernants et notamment les Anatidés de surface et les foulques.

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



**Figure 19.** Courbes de remplissage du lac (GHI, 2009).

### 6.3.2. Ressources en eaux souterraines

Les diverses dépressions de la zone d'étude sont constituées par un remplissage alluvionnaire hétérogène et devraient contenir de grands volumes d'eau, même si l'on ne peut pas parler de nappes uniques.

Les cordons dunaires absorbent de grandes quantités d'eau qui, sont en bonne partie rendues dans les zones de contact avec les formations alluviales des différentes dépressions des zones marécageuses.

La puissance et l'extension de toutes ces ressources ne sont pas connues avec certitude.

## 7. Etude climatique

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

Pour étudier le climat de la région du lac Fetzara, nous avons choisi les données disponibles sur la station météorologique de Annaba (Aéroport-Les Salines), qui peut être

considérée comme étant la station la plus proche de la zone d'étude. La station Aéroport-Les Salines de Annaba se situe à environ 25 km à vol d'oiseau du lac Fetzara, et c'est en même temps, celle qui dispose de données les plus complètes et surtout les plus régulières. Les données climatiques prises en considération pour l'étude du climat de la zone du projet portent sur 29 ans et concernent les moyennes mensuelles de la période 1982-2011.

**Tableau 2.** Données climatiques moyennes mensuelles de la région du lac Fetzara (Annaba-Les Salines : 1982-2011)

Paramètres	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Température °C	10.99	11.27	13.12	15.27	18.30	22.04	25.29	25.83	23.06	20.02	15.61	13.15
Pluviométrie en mm	108.37	75.01	66.43	56.47	38.55	13.26	2.60	9.69	42.40	62.21	88.64	122.66
Humidité en %	79.3	76.5	75	74.2	74.7	73.1	70.2	71.8	72.3	74.8	76.2	77.5
Evaporation en mm	61.9	66.9	88	87.3	103.9	130.4	153.9	154.3	127.9	99.8	79.7	66
Vents m/s	3.6	3.8	4.1	3.8	3.8	3.5	4	4.3	3.9	4.1	4	3.8

### 7.1. Le régime pluviométrique

La région est soumise à des conditions climatiques marquées par de forts contrastes saisonniers et des irrégularités très nettes des précipitations. La répartition des précipitations moyennes mensuelles sur une période de 29 ans a permis d'identifier une saison pluvieuse allant de d'octobre à mai et une saison sèche allant de juin à septembre. Le mois le plus pluvieux correspond au mois de décembre avec une moyenne mensuelle de 122.664 mm. Le mois le plus sec est le mois de juillet avec une moyenne de 2.609 mm.

### 7.2. Le régime thermique

La température est indicatrice du pouvoir évaporant de l'air et est un facteur déterminant dans l'évaluation du bilan hydrique. Les contrastes de température sont importants avec des variations à la fois saisonnières et annuelles. La région d'Annaba connaît un climat thermique de type méditerranéen assez chaud. Juillet et aout sont les mois les plus chauds, avec une moyenne de 25.563°C. Le mois le plus froid est celui de janvier (10.991°C).

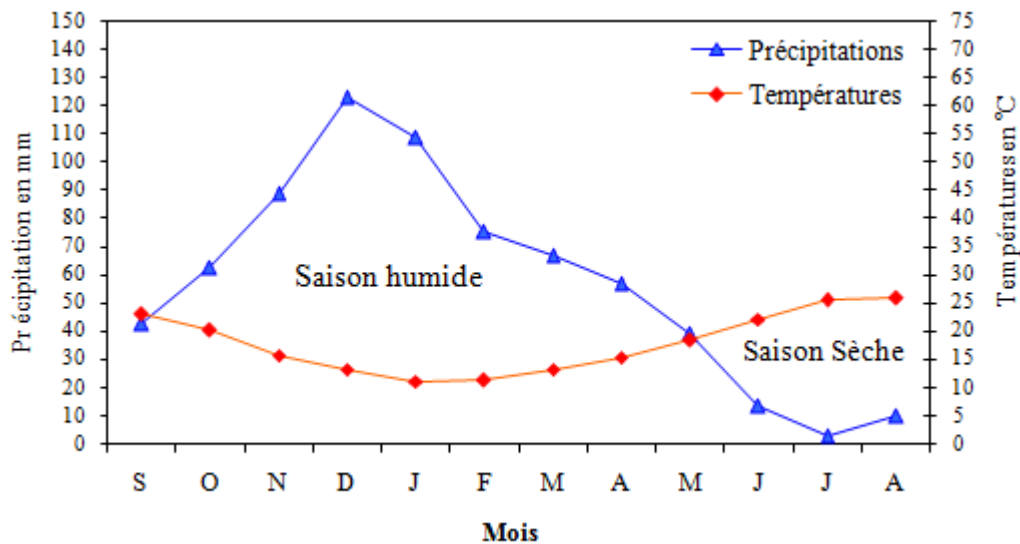


Figure 20. Courbes pluviothermiques: station des Salines.

### 7.3. L'humidité

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

On a pu remarquer que l'humidité maximale à la station des Salines est de l'ordre de 77.5 % au mois de décembre, par contre l'humidité minimale est de 70.2 % au mois de juillet, avec une moyenne annuelle de l'ordre de 74.65 %.

### 7.4. Le vent

Le vent est l'un des éléments les plus déterminants des régimes pluviaux de l'évapotranspiration et par conséquent le climat de la région.

Il y a trois types de vent dans cette région (B.N.E.D.R, 1997):

- **Les vents dominants**

Dans ce cas, pendant la période sèche d'avril à septembre, et pendant les périodes de transitions, les vents du Nord et du Nord-Est sont dominants, et quand en période pluvieuse d'octobre à mars, les vents d'Ouest et de Nord-Ouest sont dominants. Les vents du Nord et du Nord-Est d'été sont généralement doux, et ceux d'Ouest et de Nord-Ouest d'hiver sont généralement forts.

- **Le sirocco**

Il s'agit d'un vent sec et poussiéreux, provenant du Sahara vers le Nord, particulier à la région.



- **Les vents violents**

Localisés avec nuages orageux et tonnerre, qui apparaissent en période de transition des saisons sèches et pluvieuses (avril, mai et septembre).

Nous remarquons que les vents dominant sont de direction Nord et Nord-Ouest, les vitesses moyennes varient entre 3 et 3.8 m/s. Les vitesses les plus élevées sont enregistrées aux mois d'octobre, mois de mars et au mois d'août avec des vitesses oscillant entre 4.1 et 4.3 m/s, par contre le mois de juin reste le mois venteux avec 3.5 m/s. par contre la période allant du mois d'août au mois d'octobre, se caractérise par des vitesses atteignant 3.6 à 3.8 m/s.

### **7.5. L'évaporation**

L'évaporation mensuelle varie au cours de l'année, la maximale est enregistrée en juillet et aout (153.9 mm et 154.3 mm) et la minimale en janvier (61.9 mm). L'évaporation totale moyenne annuelle est très importante, elle est 1220 mm/an. Nous remarquons un déficit hydrique très important (Evaporation > Précipitation) de mars à novembre.

### **7.6. Le bilan hydrique**

Pour estimer le bilan hydrique la méthode de Thornthwaite et Mather (1957) est la plus appliquée. Le bilan de Thornthwaite permet d'estimer pour chaque moi:

L'évapotranspiration potentielle (ETP en mm).

L'évapotranspiration réelle (ETR en mm).

La réserve facilement utilisable (RFU en mm).

Ce terme présente la quantité d'eau disponible dans le niveau superficiel du sol.

L'excédent d'écoulement (Exc en mm) dans le cas ou:

ETP=ETR, la RFU est à son maximum (100 mm).

L'excédent appelé également pluie efficace et le reste des eaux de pluie constituent l'écoulement et l'infiltration. Déficit Agricole (DA en mm), il résulte de la différence entre l'ETP et l'ETR. Il représente la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux cultures pour que la sécheresse ne l'atteigne pas.

Si  $P > ETP$ , alors:  $ETR = ETP$

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

Si  $P < ETP$ : On évapore toute la pluie et on prend à la RFU (jusqu'à la vider) l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETR soit:

- $ETR = P + \min(RFU, ETP - P)$
- $RFU = 0$  ou  $RFU + P - ETP$
- Si  $RFU = 0$ , la quantité ( $DA = ETP - ETR$ ) représente le déficit agricole, c'est-à-dire sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.

### 7.6.1. L'évapotranspiration

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

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

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

On distingue :

L'évapotranspiration potentielle (ETP).

L'évapotranspiration réelle (ETR).

- **L'évapotranspiration potentielle (ETP)**

On appelle évapotranspiration potentielle (ETP), exprimée en hauteur de lame ou tranche d'eau évaporée, la somme des 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, on utilise la formule de Thornthwaite.

- **Formule de Thornthwaite**

Thornthwaite (1957) a établi une correction entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration mensuelle, il définit d'abord un indice thermique mensuel (i), où :

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

Où

$$I = \sum_{i=1}^{12} i \Rightarrow i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.5}$$

$$a = \left(\frac{1.6}{100}\right) I + 0.5$$

Avec:

ETP: évapotranspiration potentielle en mm.

T: Température moyenne mensuelle (1981-2011) en °C.

i: Indice thermique mensuel.

I: Indice thermique annuel.

K: Coefficient d'ajustement mensuel.

- **L'évapotranspiration réelle (ETR)**

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

Pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR) par la méthode de Thornthwaite est liée au volume de précipitation. Trois cas peuvent se présenter :

- 1er cas:  $P \geq ETP \Rightarrow ETR = ETP$ .

Il y a reconstitution des réserves du sol jusqu'à saturation, le surplus, représentera l'écoulement superficiel.

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

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

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

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

Nous avons estimé les valeurs de la RFU selon la formule de Hallaire (1958) qui s'écrit de la manière suivante:

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

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

C: Capacité au champ.

f: Capacité au point de flétrissement.

H: profondeur du sol en (mm).

D: densité apparente,  $D = 1$ .

Les valeurs de  $C-f$  donnée par Hallaire (1958) selon la nature du sol sont:

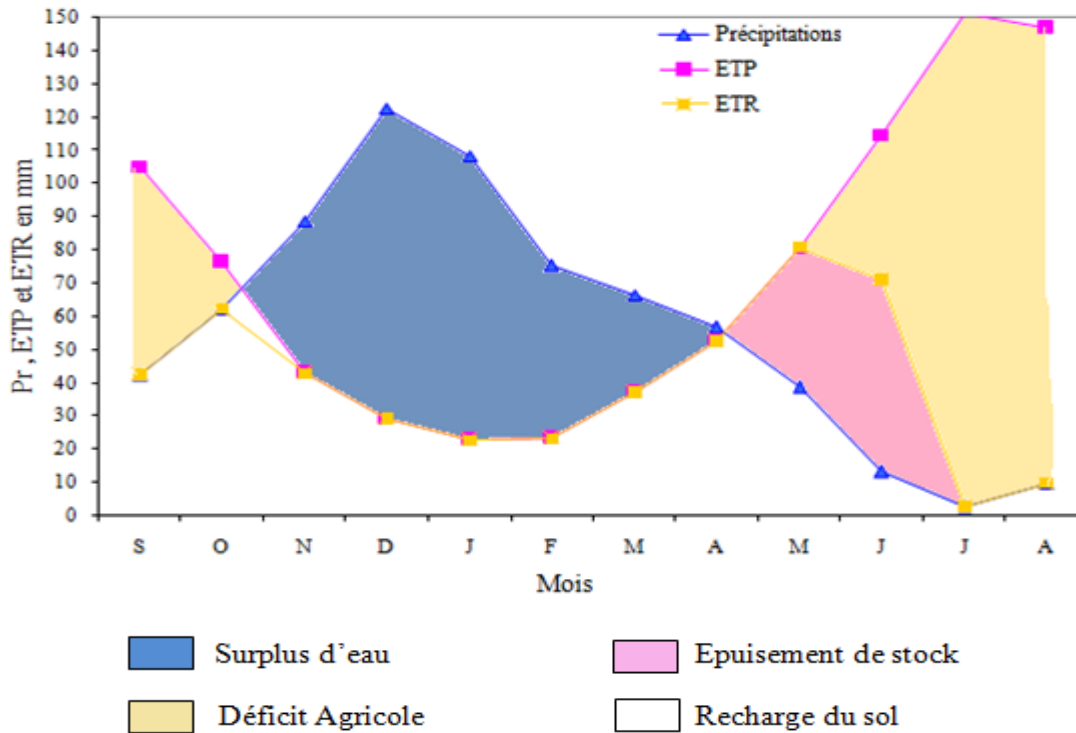
- $C-f = 5\%$  pour un sol sableux.
- $C-f = 10\%$  à  $15\%$  limoneux.
- $C-f = 20\%$  pour un sol argilo-sableux.

Les valeurs de l'ETP, estimées à partir des mesures climatologiques, sont généralement supérieures à la hauteur de la lame d'eau précipitée sauf pour les mois de novembre à mars. La valeur moyenne annuelle est de l'ordre de 881.4 mm.

La réserve facilement utilisable (RFU) du sol correspond à la quantité d'eau par unité de surface que le sol peut utiliser dans le cas où la lame d'eau précipitée n'est pas suffisante pour satisfaire l'ETP. Cette réserve est supposée nulle au mois de juillet à octobre qui correspond à la période où la réserve en eau du sol est en générale épuisée.

**Tableau 3.** Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite de la station Les Salines (1982/2011)

	T°C	ETP	Pr	BH	RUF	ETR	Def	Exc
<b>S</b>	23	105.1	42.403	-62.7	0,0	42.4	62.7	0.0
<b>O</b>	20	76.4	62.212	-14.1	0,0	62.2	14.1	0.0
<b>N</b>	15.6	42.7	88.645	46.0	46.0	42.7	0.0	0.0
<b>D</b>	13.2	29.3	122.66	93.4	100.0	29.3	0.0	39.4
<b>J</b>	11	22.5	108.38	85.8	100.0	22.5	0.0	85.8
<b>F</b>	11.3	23.1	75.01	51.9	100.0	23.1	0.0	51.9
<b>M</b>	13.1	37.1	66.438	29.4	100.0	37.1	0.0	29.4
<b>A</b>	15.3	52.5	56.477	4.0	100.0	52.5	0.0	4.0
<b>M</b>	18.3	80.8	38.55	-42.2	57.8	80.8	0.0	0.0
<b>J</b>	22	114.6	13.267	-101.4	0.0	71.1	43.6	0.0
<b>J</b>	25.3	150.9	2.609	-148.3	0.0	2.6	148.3	0.0
<b>A</b>	25.8	146.6	9.69	-136.9	0.0	9.7	136.9	0.0
<b>Annuel</b>	<b>17.8</b>	<b>881.4</b>	<b>686.3</b>	<b>-195.1</b>		<b>475.8</b>	<b>405.6</b>	<b>210.5</b>



**Figure 21.** Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite (Station les Salines 1982-2011).

### 7.6.2. L'interprétation du bilan hydrique

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

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

La figure 21 présente le graphisme du bilan d'eau (Thornthwaite) qui illustre les résultats du tableau N° 3 de la station les Salines.

Le bilan d'eau établi par la formule de Thornthwaite montre que l'ETP atteint son maximum au mois de juillet (150.9 mm) et son minimum au mois de janvier (22.5 mm).

La reconstitution de la RFU s'effectue au mois de novembre (46 mm) et atteint son maximum (100 mm) à partir du mois de décembre jusqu'au mois d'avril, à partir duquel on assiste à un épuisement du stock.

L'écoulement commence après le remplissage de la RFU (100 mm) c'est-à-dire au mois de décembre et se termine en avril, avec un maximum au mois de janvier (85.8 mm) et un minimum au mois d'avril (4 mm).

L'excédent égal à (210.5 mm) représentant 30.67 % des précipitations annuelles, alors que l'ETR est de l'ordre de (475.8 mm) représentant 69.32 % des précipitations annuelles. Le déficit agricole DA débute au mois de juin et se poursuit jusqu'au mois d'octobre.

### 7.7. L'indice d'aridité de de Martonne (1926)

Il est également calculé à partir des moyennes des précipitations et des températures. Il est possible de déterminer un indice annuel « A » ou des indices mensuels pour les périodes en comptes « a »:

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

P: total des précipitations annuelles (mm).

T: températures moyennes annuelles (°C)

$$a = \frac{12 \cdot P}{t + 10}$$

P: total des précipitations annuelles (mm).

t: températures moyennes mensuelles (°C).

Les valeurs sont d'autant plus faibles que le climat est aride. Un indice supérieur à 20 indique un climat humide. La tendance à la sécheresse s'affirme entre 10 et 20; en dessous de 10, c'est l'aridité. Pour la région de Annaba, l'indice d'aridité annuel (A) de de Martonne est de 24.687, ce qui correspond à un climat suffisamment humide. Concernant les indices d'aridité mensuels (a), la tendance à la sécheresse s'étale de mai à septembre, avec des indices variant entre 1 et 16. L'aridité concerne surtout les mois de juin, juillet et aout.

**Tableau 4.** Indices d'aridité de de Martonne (1926)  
de la station de Annaba (1981-2011)

	T°C	Pr	a
S	23	42.403	15.419
O	20	62.212	24.884
N	15.6	88.645	41.552
D	13.2	122.66	63.444
J	11	108.38	61.931
F	11.3	75.01	42.259
M	13.1	66.438	34.513
A	15.3	56.477	26.787
M	18.3	38.55	16.346
J	22	13.267	4.975
J	25.3	2.609	0.886
A	25.8	9.69	3.248
Annuel	17.8	686.3	24.687

### Conclusion

La description des formations géologiques à l'affleurement a montré la présence de deux types de formations:

- Les formations métamorphiques présentent essentiellement au niveau du massif de l'Edough et ses environs, constituant ainsi la limite nord du lac,
- Les formations sédimentaires occupant le reste de la zone d'étude.

La région du lac Fetzara est constituée de quatre types de sol, à savoir:

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

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

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

L'analyse des données climatiques d'une série d'observation de 29 ans a permis d'attribuer à la région d'étude un climat méditerranéen avec deux périodes bien distinctes:

- Une période chaude et sèche.

- Une période froide et humide.

La pluviométrie moyenne annuelle est de l'ordre de (686.3 mm).

L'estimation du bilan d'eau par la méthode de Thornthwaite a montré que, à partir du mois de novembre, l'apport considérable des pluies, la chute de température et la diminution de l'évapotranspiration permettent la recharge du sol mais un déficit agricole enregistré à partir du mois de juin jusqu'au mois de septembre (période correspondant à l'épuisement du stock).



## CHAPITRE III. MATERIEL ET METHODES

Pour cette étude, l'échantillonnage des eaux a été fait de manière à couvrir toute la zone afin d'avoir une bonne idée sur la qualité physico-chimique des eaux.

Lors du prélèvement, les paramètres physiques de l'eau [température ( $T^{\circ}$ ), potentiel d'hydrogène (pH), conductivité électrique (CE), le potentiel redox (Eh)] ont été mesurés in situ. L'analyse chimique des échantillons, réalisée au laboratoire, concerne les ions majeurs ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^{+}$ ,  $\text{K}^{+}$ ,  $\text{Cl}^{-}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}$ ,  $\text{SO}_4^{-}$ ,  $\text{CO}_3^{-}$ ) et l'élément mineur ( $\text{Br}^{-}$ ).

Plusieurs techniques d'études et méthodes de présentation ont été mises en œuvre pour synthétiser les données physico-chimiques et les interpréter:

- Les diagrammes décrivant la composition chimique des eaux parmi les quels le diagramme de Piper qui permet de déterminer la typologie des faciès chimiques et leurs évolutions et le diagramme de Durov qui permet en même temps de définir les faciès et les processus géochimiques responsables, le logiciel Rockworks15 a été utilisé pour traiter l'ensemble des données.

Les diagrammes binaires associés aux rapports caractéristiques qui permettent d'établir les corrélations et d'estimer la prépondérance d'un processus par rapport à un autre.

- Les indices de saturation qui permettent d'évaluer la saturation de l'eau vis-à-vis des différents minéraux.
- Les analyses factorielles avec en particulier les ACP (Analyse en Composantes Principales), qui permettent d'observer les relations entre les différentes variables et échantillons.

### 1. Echantillonnage et analyse

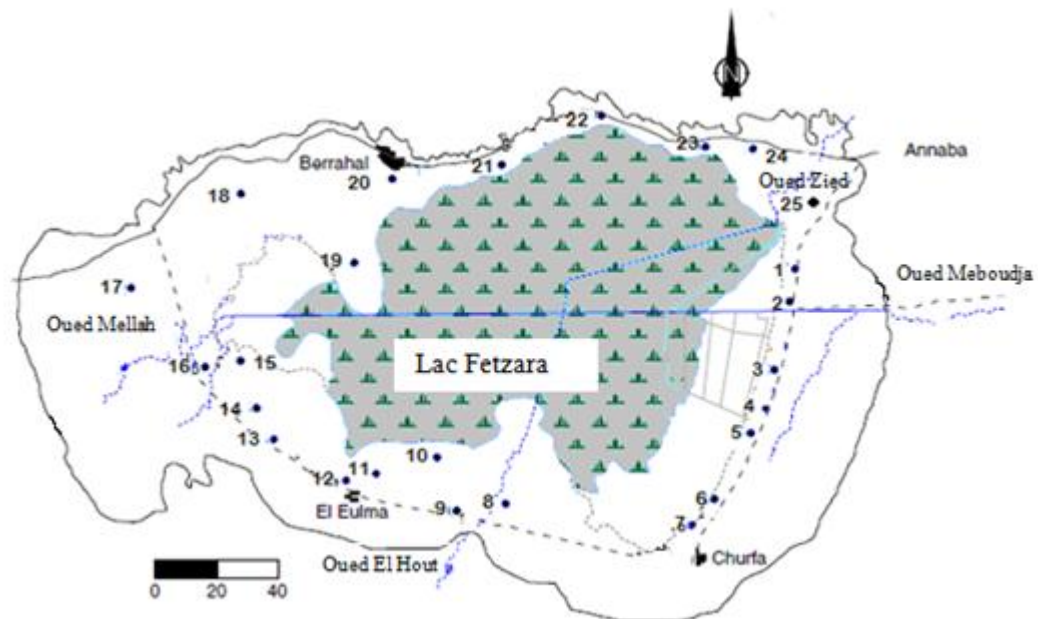
Dans le cadre de ce travail, trois campagnes de mesures et de prélèvements d'échantillons pendant l'année 2011 ont été successivement effectuées en janvier, mai et octobre qui correspondent respectivement, la période hivernale, fin de la saison pluvieuse (période juste après hivernage) et fin de la période sèche (figure 22).

- Première campagne: effectuée en janvier 2011 et a porté sur 25 points d'échantillonnage, période hivernale qui coïncide avec la période de recharge des aquifères et les cours d'eaux.

- Deuxième campagne: effectuée en mai 2011 avec 25 points d'échantillonnages.
- Troisième campagne: réalisée en octobre 2011 avec 19 points d'échantillonnage (5 points sont secs).

Les mesures de la conductivité électrique (CE), de la température ( $T^{\circ}\text{C}$ ), le potentiel d'hydrogène (pH), et potentiel d'oxydoréduction (Eh) ont été réalisées sur le terrain.

Les éléments majeures ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{--}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) et mineur ( $\text{Br}^-$ ) ont été analysés après filtration au laboratoire selon les techniques standards (Rodier et al., 2009). Le dosage du Chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) a été effectué par titrimétrie (méthode de Mohr). Les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ ) et carbonates ( $\text{CO}_3^{--}$ ) ont été dosés par titrimétrie par l'acide sulfurique, tandis que le sodium ( $\text{Na}^+$ ) et le potassium ( $\text{K}^+$ ) par spectrophotométrie de flamme, le calcium ( $\text{Ca}^{++}$ ) et le magnésium ( $\text{Mg}^{++}$ ) par complexométrie, les sulfates ( $\text{SO}_4^{--}$ ) par gravimétrie au  $\text{BaCl}_2$  et les bromures ( $\text{Br}^-$ ) ont dosés par spectrophotométrie.



**Figure 22.** Localisation des points d'eau dans le bassin versant du lac Fetzara (Rouabhia et al., 2010).

## 2. Méthodes d'étude

### 2.1. Traitement statistique

La représentation graphique des éléments chimiques et l'étude des rapports caractéristiques ont montré qu'un grand nombre de paramètres chimiques et physico-chimiques étaient significatifs, pris individuellement. Pour expliquer l'évolution du

chimisme, la plupart du temps une/ou plusieurs liaisons plus ou moins fortes entre ces paramètres. Il est donc apparu intéressant d'essayer de traiter les données statistiquement, en utilisant une méthode d'analyse en multidimensionnelle comme l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

L'ACP est une méthode statistique essentiellement descriptive dont l'objet est de présenter sous une forme graphique, le maximum d'information contenu dans un tableau de données. Chaque échantillon d'eau d'une campagne de prélèvement constitue une unité statistique, les différents paramètres soumis à l'analyse constituent les variables qui caractérisent ces unités statistiques. Chacune des trois campagnes analysées a donc été traitée statistiquement grâce à l'utilisation du logiciel Xlstat Version 2013.

L'utilisation de l'analyse en composantes principales (ACP) pour l'étude globale des eaux permet une différenciation sur leurs particularités chimiques, une détermination de leurs variations d'ensemble (facteurs) suivant les axes principaux et surtout une caractérisation des différents pôles d'acquisition de la minéralisation (Ndembo Longoj, 2009).

L'intérêt de cette technique réside sur le fait qu'elle permet de réduire à quelques plans factoriels la majeure partie de la variance exprimée par les descripteurs. Le premier axe F1 est celui qui exprime le plus fort pourcentage de la variance totale. Le second axe F2, indépendant du premier, est celui qui exprime la plus grande partie de la variance résiduelle et ainsi de suite (Mudry et Blavoux, 1986).

## **2.2. Diagrammes interprétatifs**

L'interprétation des éléments majeurs en termes de faciès chimique s'avère précieuse quand il s'agit de distinguer des groupes d'eau de chimisme et de minéralisation (salinité) différents au sein d'un aquifère. On peut également identifier des relations entre ces familles notamment en cas de mélange entre des eaux douces et salines, l'outil le plus fréquemment utilisé est le diagramme de Piper, basé sur les concentrations équivalentes (en meq/l) et relatives par rapport à la somme des cations voire anions. Il comporte deux diagrammes triangulaires pour les cations et anions ainsi qu'un losange qui combine la somme des cations monovalents ( $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ), celle des cations bivalents ( $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ ), et les bicarbonates plus carbonates ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{--}$ ) et ( $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{--} + \text{NO}_3^+$ ). C'est le losange qui est utilisé pour différencier les faciès hydrochimiques rencontrés.

**Tableau 5.** Faciès hydrochimiques et contextes géologiques (Banton et Bangoy, 1999)

<b>Faciès hydrochimique</b>	<b>Environnement géologique et géochimique</b>
Bicarbonaté-calcique et/ou magnésien	Faciès fréquents dans les eaux douces continentales et dans les environnements calcaires. La présence de formations dolomitiques est à l'origine de la tendance magnésienne.
Bicarbonaté-sodique et/ou potassique	Faciès fréquents dans les environnements riches en formations volcaniques. Un faciès bicarbonaté sodique se trouve aussi dans certains aquifères des bassins sédimentaires et témoigne d'interactions eau-roche (échange $\text{Ca}^{++}$ contre $\text{Na}^+$ sur des argiles).
Sulfatée	Faciès fréquents dans les environnements riches en minéraux évaporitiques (gypse [ $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ]) ou minéraux sulfurés (pyrite [ $\text{FeS}_2$ ]).
Chloruré-sodique	Faciès fréquents dans les milieux riches en évaporites (exemple: halite [ $\text{NaCl}$ ]). Faciès rencontrés également dans les secteurs pétrolifères et certaines zones d'activités volcaniques. L'eau de mer et les eaux salines issues des intrusions marines sont de faciès $\text{Na}^+\text{-Mg}^{++}\text{-Cl}^-$ mais peuvent évoluer dans les aquifères côtiers, vers un faciès alcalino-terreux chloruré par échange cationique.
Chloruré-calcique	Faciès rencontrés dans des milieux riches en minéraux argileux contaminés par une solution saline de type $\text{Na}^+\text{-Cl}^-$ (dissolution d'halite ou intrusion marine). Les interactions eau-roche se manifestent alors par des échanges cationiques entre ions bivalents ( $\text{Ca}^{++}$ et $\text{Mg}^{++}$ relâchés dans la solution) et monovalents ( $\text{Na}^+$ et $\text{K}^+$ adsorbés sur les argiles). Des saumures profondes de type $\text{Ca}^{++}\text{-Na}^+\text{-Cl}^-$ sont présents dans la plupart des boucliers cristallins du monde (Canada, Scandinavie, Russie...) et leur origine a été discutée dans la littérature (Leybourne et Goodfellow, 2007).

### 2.3. Indice de saturation (IS)

L'équilibre des eaux avec la matrice est souvent exprimé soit par l'indice de saturation [ $\text{IS}=\log(\text{PAI}/\text{Ks})$ ], où PAI est le produit d'activité des ions concernés et Ks le produit de solubilité du minérale considéré (Bouhlassa et al, 2008).

Le degré de saturation, de sous-saturation ou l'état d'équilibre d'une solution vis-à-vis d'un minéral n'est apprécié que si l'on peut comparer le produit de solubilité au produit d'activité ionique des ions de référence dans la solution (Droubi, 1976; Droubi et al, 1978).

Un indice de saturation nul signifie que l'eau est en équilibre avec le minéral étudié. L'eau sera sous saturée si  $\text{IS}<0$  (dissolution du minéral) et sursaturée si  $\text{IS}>0$  (précipitation du minéral) (Peter-Borie et al, 2009).

Le calcul de l'indice de saturation IS des minéraux dissous dans l'eau a été mené en utilisant le logiciel « Diagramme ».

## **2.4. Les relations ions-chlore**

L'établissement de diagrammes binaires consiste à représenter sur un graphique l'évolution d'un élément ou d'un rapport ionique en fonction d'un autre élément souvent supposé conservatif.

Ces genres de diagrammes permettent de visualiser l'évolution des teneurs en cations et anions majeurs en fonction des teneurs en chlore considéré comme élément conservatif. Les axes du graphique représentent les teneurs élémentaires souvent exprimées en mg/l). Cette approche permet d'illustrer plusieurs phénomènes géochimiques. Les cations et les anions majeurs reflètent alors les interactions des eaux salines avec leur encaissant (échanges ioniques, dissolution, précipitation). Les valeurs (points) en dehors d'une relation linéaire simple (dilution, évaporation sans précipitation de minéraux, mélange binaire...) peuvent attester de divers processus telles que la réduction bactérienne des sulfates et la précipitation de calcite ou calcite magnésienne (Vallet-Coulomb et al, 2009).

### **2.4.1. La relation sodium-chlore**

Ce type de diagramme représente l'évolution du sodium ( $\text{Na}^+$ ) en fonction du chlore ( $\text{Cl}^-$ ). Une relation linéaire peut mettre en évidence un mélange simple entre deux eaux de concentrations en  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  très différentes comme par exemple le mélange d'une eau douce et d'une eau de mer. Les points du graphique s'alignent alors sur une droite de mélange simple entre les deux pôles identifiés (pôle nappe et pôle mer). L'analyse du diagramme (teneurs molaires) permet de distinguer plusieurs configurations et d'émettre diverses hypothèses concernant l'origine de la salinité.

Dans le cas d'une dissolution d'halite ( $\text{NaCl}$ ), les points du graphique s'alignent sur une droite de pente égale à l'unité = 1.

Dans une eau de mer ou une nappe fortement contaminée par une intrusion marine, les points s'alignent sur une droite de pente égale à 0.86.

Dans le cas d'un mélange simple entre deux eaux, les points s'alignent sur la droite de mélange entre les deux pôles.

Un appauvrissement en sodium se traduit par des valeurs en-dessous de la droite de mélange et peut attester des interactions eau-roche de type échanges cationiques ( $\text{Na}^+$  contre  $\text{Ca}^{++}$ ).

#### 2.4.2. La relation brome-chlore

Cette représentation est très utilisée pour discriminer l'origine de la salinité, notamment pour déceler une contamination marine (l'eau de mer étant caractérisée par un rapport molaire  $\text{Br}^-/\text{Cl}^- = 1.5 \times 10^{-3}$ ).

La distinction des différents mécanismes de la salinisation permet de reconstituer l'origine des eaux souterraines, leurs cheminements et d'imaginer leurs futures évolutions. Parmi les critères géochimiques qui peuvent aider à identifier l'intrusion de l'eau de mer par opposition à d'autres sources de salinité en zones côtières, on utilise notamment le rapport ionique  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$ .

Les bromures et chlorures ont un comportement similaire et conservatif lors de la dilution d'eaux salines avec des eaux douces. Le rapport  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$  du pôle salin est donc conservé sur une large gamme de concentration avant de tendre vers celui des eaux douces diluant. Des interactions eau-roche n'affectent pas le rapport des deux éléments contrairement à la plupart des autres ions. Les rapports  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$  et les diagrammes binaires  $\text{Br}^-$  en fonction du  $\text{Cl}^-$  ou  $\text{Br}^-/\text{Cl}^- = f(\text{Cl}^-)$  ont été largement utilisées (Davis et al, 1998; Hsissou et al, 1999; Freeman, 2007).

Le diagramme  $\text{Br}^-$  en fonction de  $\text{Cl}^-$  indique qu'il existe trois groupes d'eaux des ions halogènes ( $\text{Br}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ) dans les eaux:

- **Rapport  $(\text{Br}^-/\text{Cl}^-) = (\text{Br}^-/\text{Cl}^-)_{\text{mer}}$**

Deux hypothèses pourront être avancées:

- Lessivage des aérosols et embruns marins apportés par les vents et les pluies.
- Intrusion marine.

- **Rapport  $(\text{Br}^-/\text{Cl}^-) > (\text{Br}^-/\text{Cl}^-)_{\text{mer}}$**

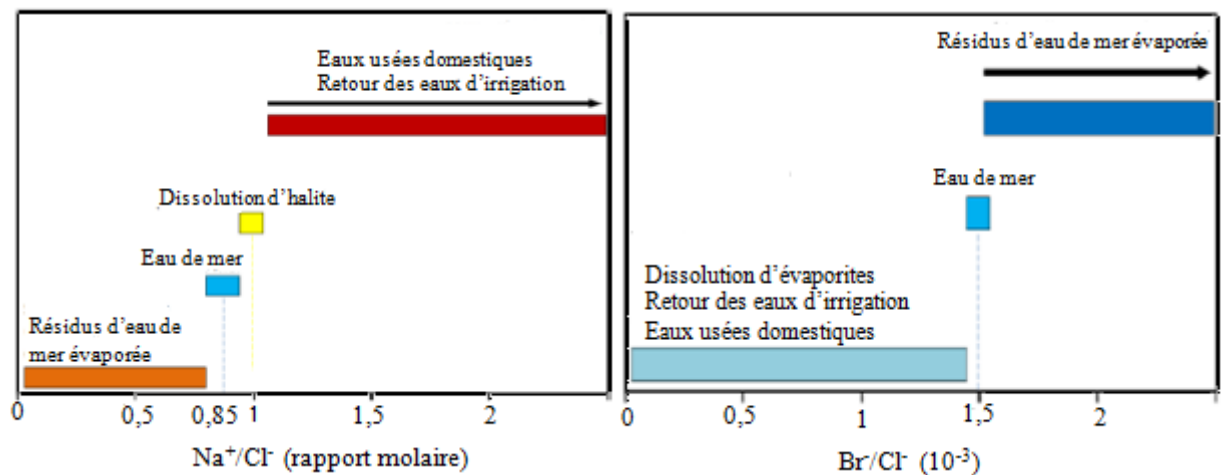
Cette augmentation du rapport  $(\text{Br}^-/\text{Cl}^-)$  pourra être expliquée par un enrichissement en  $\text{Br}^-$  dû à une décomposition de la matière organique du sol.

- **Rapport  $(Br^-/Cl^-) < (Br^-/Cl^-)_{mer}$**

Un faible rapport  $(Br^-/Cl^-)$  par rapport à celui de l'eau de mer suggère une présence de dissolution de sel chloruré, la halite (NaCl) par exemple, qui est le seul sel chloruré à posséder un rapport  $(Br^-/Cl^-)$  plus faible que celui de l'eau de mer.

**Tableau 6.** Caractéristiques géochimiques des sources de salinité (Vengosh, 2003).

	$Br^-/Cl^-$ rapport molaire ( $10^{-3}$ )	$Na^+/Cl^-$ rapport molaire
Eau de mer	1.5	0.86
Dissolution d'évaporites	<1.5	1(halite)
Eaux de retour d'irrigation	<1.5	>1



**Figure 23.** Rapports molaires  $Na^+/Cl^-$ ,  $Br^-/Cl^-$  des principales sources de salinité (Vengosh, 2003).

### Conclusion

Trois campagnes de prélèvement d'échantillons ont été successivement effectuées en janvier, mai et octobre 2011 qui correspondent respectivement la période pluvieuse, à la fin des saisons pluvieuses (périodes juste après hivernage) et sèches.

La première campagne (janvier 2011) a été réalisée sur un réseau de 25 points qui prend en compte les eaux de surface et les eaux souterraines (puits en état d'exploitation). Alors que la deuxième campagne reprend la totalité des points de la première campagne. Pour la troisième campagne on a prélevé de l'eau des mêmes points précédents mais on a trouvé que cinq parmi eux étaient secs.

## CHAPITRE IV. HISTOIRE DES ETUDES REALISEES

L'objectif de ce travail est de présenter tous les travaux réalisés sur le lac Fetzara et à la périphérie de celui-ci pour connaître l'évolution temporelle de la salinité des eaux et du sol et les facteurs qui influent l'évolution de la salinité. Pour cela, les données de plusieurs études sont utilisées. Il s'agit d'abord d'anciennes études entre 1950 et 1985, elles appartiennent à Durand (1950), Ifagraria (1967), étude AJCI (1985); elles ont été complétées par la suite par les travaux:

- Etude BNDER 1997.
- Djamai, 1993 & 2000.
- Etude Gabinetete Hispano D'Ingeniera (GHI) en 2009.

### 1. Etude Durand (1950)

L'Etude a été réalisée en tenant compte des zones homogènes de la végétation et l'échantillonnage a été réalisé pendant la saison sèche (aout 1949). Les points de prélèvement des échantillons ont été fixés sur des alignements orientés de manière à traverser les zones de végétation en des endroits où elles étaient aussi larges que possible ; ceci a donné lieu à 39 profils. La carte de la salinité des sols du lac Fetzara a été établie à l'origine à partir de leurs teneurs en chlorures (Cl<sup>-</sup>) pour être par la suite reconverties en salinité globale représentée par la CE en ms/cm à 25 à partir de la teneur en NaCl.

La valeur de la conductivité électrique montre que la salinité était plus élevée aux alentours du lac qu'au centre. La zone de Cheurfa, située au Sud-Est du lac était la plus élevée avec des valeurs dépassant parfois 45 mS/cm à 25°C, cette valeur n'a jamais été atteinte par suite. D'autre taches de salinité, plus ou moins importantes, ont été signalées particulièrement au Nord-Est et au Nord-Ouest. Cependant, selon la carte de la distribution des sels solubles sur les sols du lac Fetzara, il s'avère que d'une manière générale, la salinité pouvait être considérée comme importante sur l'ensemble des sols, puisqu'en dehors du centre, la CE dépasse les 5 mS/cm à 25°C sur plus de 42% des terres dont plus de 14% avec des valeurs supérieures à 14 mS/cm. D'autre part, nous constatons que l'unité de salinité 0-5 mS/cm étant très large, car la plupart des laboratoires du monde considèrent qu'un sol est déjà salé à partir de 2 mS/cm. Tout ceci laisse supposer que la superficie des sols affectés par le phénomène de salinisation serait plus importante. Lors de cette étude, un seul élément soluble a été déterminé, il s'agit de l'ion chlorure (Cl<sup>-</sup>). La concentration en chlorure était importante avec des valeurs se situant le plus souvent entre



120 et 180 meq/l et pouvant parfois dépasser les 450 meq/l près de Cheurfa au Sud-Est du lac.

## **2. Etude d'Ifagraria (1964)**

Dans le cadre de l'accord de coopération ratifié en 1964 entre la République Algérienne Démocratique et Populaire (Ministère de l'Hydraulique), et la République Italienne (Société IFAGRARIA), une étude générale de mise en valeur agricole des plaines côtières d'Annaba a été menée.

Dans cette étude, les prélèvements ont été effectués à partir du mois d'aout 1964 et se prolongés jusqu'au terme de la saison sèche. 50 points de sondages ont été réalisés sur les horizons 0-50 cm et 50-150 cm avec une densité moyenne d'un profil pour 480 ha. Le nombre de sondages a été réduit soit pour son uniformité, soit parce qu'il a été tenu compte de 29 profils de l'étude de Durand (1950). L'évaluation de la salinité a été déterminée sur extrait terre-eau.

Dans cette étude effectuée près 15 ans après celle de Durand (1950), il a été remarqué que la salinité globale était plus importante dans les zones périphériques du lac où elle atteignait la valeur maximale de 21 mS/cm au Nord de Cheurfa (Sud-Est du lac), à l'Ouest et à l'Est du lac près du canal principal, suivant le gradient d'écoulement des eaux. Le centre était moins salé avec une CE se situent entre 4 et 12 mS/cm. La superficie des sols salés ayant une CE supérieure à 4 mS/cm représente plus de 50%. L'unité 7-12 mS/cm est la plus importante avec 38%, par contre celle qui est >12 mS/cm représente à peu près 10%. Le facies chimique dominant des sols est du type chloruré-sodique.

## **3. Etude AJCI (1985)**

L'étude de faisabilité du projet d'aménagement agricole de la région périphérique du lac Fetzara mené par l'Agence Japonaise de Coopération Internationale (AJCI) a été réalisée suite à une requête exprimée par le Gouvernement Algérien pour une assistance technique. Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un plan à long terme relatif à l'augmentation de la production agricole et du développement de l'économie rurale.

L'échantillonnage a été effectué en deux missions:

Première mission: février à mars 1984, ce qui correspond à une saison humide; sur une superficie de près de 10000 ha.

- Deuxième mission: octobre 1984, ce qui correspond à une saison sèche; elle a porté sur le centre du lac et les plaines du Sud-Est et de l'Ouest, soit une superficie de 8500 ha.

Le total, 64 profils ont été réalisés, les horizons 0-50 cm et 50-150 cm ont été échantillonnées. Dans cette étude, il a été tenu compte également des données recueillies lors des prospections effectuées sur le terrain par Ifagraria (1967) et ANRH (1980).

L'étude AJCI (1985) montre que les zones représentant les valeurs de salinité les plus élevées étaient particulièrement localisées près de Cheurfa dans la partie Sud-Est du lac et au Sud de Berrahal, c'est-à-dire sur le pourtour du lac. Les unités de salinité 4-8 et 8-16 mS/cm couvraient plus de 55% des sols du lac. Dans l'ensemble, la superficie affectée par une salinité supérieure à 8 mS/cm était relativement limitée au centre du lac. Il est possible qu'une grande partie des sels solubles ait été drainé vers le canal pour être évacuée en dehors du lac. Le faciès chimique dominant est comme dans la précédente étude, du type chloruré-sodique.

Au cours des études pédologiques et de l'exploitation du terrain, ont été prélevés plusieurs échantillons d'eau. La salinité augmente dans l'ordre suivant: eaux de surface, eaux des oueds, eaux souterraines.

En ce qui concerne la valeur de la conductivité électrique des oueds, la plus haute est les eaux des alentours de Cheurfa (Sud-Est du lac), par suite l'oued El-Hout.

#### **4. Etude Djamai (1993)**

Cette étude a été effectuée pendant la période allant de novembre à décembre 1988. Un nombre de 28 points de sondages ont été réalisés sur les deux premiers horizons (0-25 cm et 25-50 cm). La conductivité électrique a été déterminée sur extrait de pâte saturée (Djamai, 1993).

Les résultats obtenus lors de cette étude indiquent que la salinité était toujours élevée, particulièrement au Nord, à l'Est et au Sud-Est du lac Fetzara. Au centre, il existe une plage légèrement moins affectée, ceci est certainement dû au lessivage des sols par les eaux de drainage du bassin versant de l'oued El-Hout. L'Ouest qui constitue la partie amont du lac, semble être la zone la moins atteinte par les sels solubles, à cause du gradient écoulement des eaux. Au niveau des valeurs de la salinité, la conductivité électrique moyenne calculée était estimée à 7.55 mS/cm à 25 mS/cm à 25°C avec des teneurs maximales dépassant parfois 23 mScm, surtout au Sud de Berrahal et à l'Est du lac. La classe la plus importante était représentée par unité 8-16 ms/cm. Le faciès

chimique dominant est de type chloruré-sodique. Les chlorures avec une teneur moyenne de 83.75 meq/l, étaient particulièrement importants dans la partie Sud-Est du lac avec un maximum à 25 meq/l. Le sodium ( $\text{Na}^+$ ) représente plus de 50% du total des cations et enregistre une valeur maximale de 136.11 meq/l au Sud-Est.

### **5. Etude BNEDER (1997)**

En 1997 Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural (BNEDR), a entrepris l'étude d'aménagement agricole de la région périphérique du lac Fetzara sur une superficie de 18 600 ha.

Il s'agit d'une étude sectorielle qui seulement prend une considération la partie pédologie. Cette étude constitue une actualisation et un complément à celle déjà établie par la AJCI en 1985. Les classes de sols identifiés sont au nombre de quatre:

- Sols peu évolués
- Vertisols
- Sols Hydromorphes
- Sols halomorphes

### **6. Etude Djamai (2000)**

L'étude a été réalisée en se basant sur les cartes de salinité établies par AJCI (1985) et Djamai (1993). En effet, la superposition des deux cartes a permis de localiser au niveau de l'intersection des différentes unités de salinité les points d'échantillonnage. Pour cette étude, 40 points de sondages ont été déterminés et comme dans l'étude précédente (Djamai, 1993), la CE a été évaluée sur extrait de pate saturé au niveau des deux premiers horizons (0-25 cm et 25-50). L'échantillonnage a été effectué durant la période allant d'octobre à novembre 1999.

Cette étude montre que les valeurs les plus élevées de la CE ne dépassaient guère 8 mS/cm à 25°C. La partie centrale et les zones limitrophes du lac étaient relativement plus salées que le reste. Les parties Est et Sud-Est restent les plus salées, ceci est certainement lié au gradient d'écoulement des eaux. La superficie des terres ayant un CE inférieure à 4 ms/cm représente près de 66%, alors que l'unité la plus élevée, c'est-à-dire 4-8 mS/cm, représente moins de 34% .Le facies chimique dominant est toujours comme dans les précédentes études chloruré-sodique. Les teneurs en chlorures variant entre 120 et 180 meq/l, et sont toujours très fortes, particulièrement dans la partie Est du lac et au Nord de

Cheurfa. Les concentrations en sodium évoluent dans le même sens que ceux des chlorures avec des valeurs variant entre 40 et 80 meq/l.

Les mesures sur le terrain sont plus ou moins rapprochées d'où deux ou trois répétitions permettent d'obtenir un ordre de grandeur.

## **7. Etude GHI (2009)**

Gabinette Hispano de Ingeniería (GHI) a élaboré plusieurs études et travaux :

- Pédologie des périmètres agricoles autour du lac.
- Hydrologie

Les objectifs généraux:

- La protection contre les inondations des localités situées à l'aval du lac.
- La protection du lac contre la pollution.
- L'assainissement et le drainage de toutes les eaux excédentaires vers la mer.

### **7.1. Etude pédologique**

Le problème de la salinité des sols du lac Fetzara a été considéré depuis bien des années. L'étude d'aménagement hydro-agricole de la plaine d'Annaba Ouest a été attribuée au Bureau d'Etudes: Gabinette Hispano Ingeniería (GHI) – Espagne par l'Office National de l'Irrigation et de Drainage (O.N.I.D).

La superficie prévue pour cette étude est d'environ 11.500 ha. Elle caractérise les meilleurs sols susceptibles d'être irrigués et situés la périphérie du lac Fetzara.

De ce fait, et dans le cadre de cette étude, l'effort a été fait pour observer la salinité sur un grand nombre d'échantillons du sol et l'eau souterraine. Cette salinité est en baisse par rapport aux études précédentes, ceci est certainement du aux effets de drainage. Cependant, des sols de plus de 24 mS/cm existent toujours aux alentours de Chorfa (Sud-Est du lac), et à l'amont de l'oued El-Hout. La conductivité électrique dans les horizons supérieurs dépasse généralement les 8 mS/cm. De plus, la salinité augmente avec la profondeur.

Les eaux souterraines présentent une salinité qui varie de 1.25 mS/cm pour la nappe située au Nord du canal principal et supérieure à 8 mS/cm pour la partie Sud du canal et peut atteindre 15.27 mS/cm (Sud du canal principal).

La principale contrainte des sols de la périphérie du lac Fetzara à la production végétale est la salinité.

La prospection pédologique effectuée sur ces sols et les résultats analytiques du laboratoire montre que:

Une grande partie des terres limitrophes au lac est mal drainée et la moitié subit des conditions hydromorphes/halomorphes. Il y a relativement peu de surface qui convient aux cultures sans travail important préliminaire de drainage.

Les terres situées à la périphérie du lac ne présentent aucune aptitude, elles sont classées comme pâturage ou terrain inculte. Ce dernier est dû à la haute teneur en sel et au degré d'inondation (période d'inondation s'étale d'octobre jusqu'en mai).

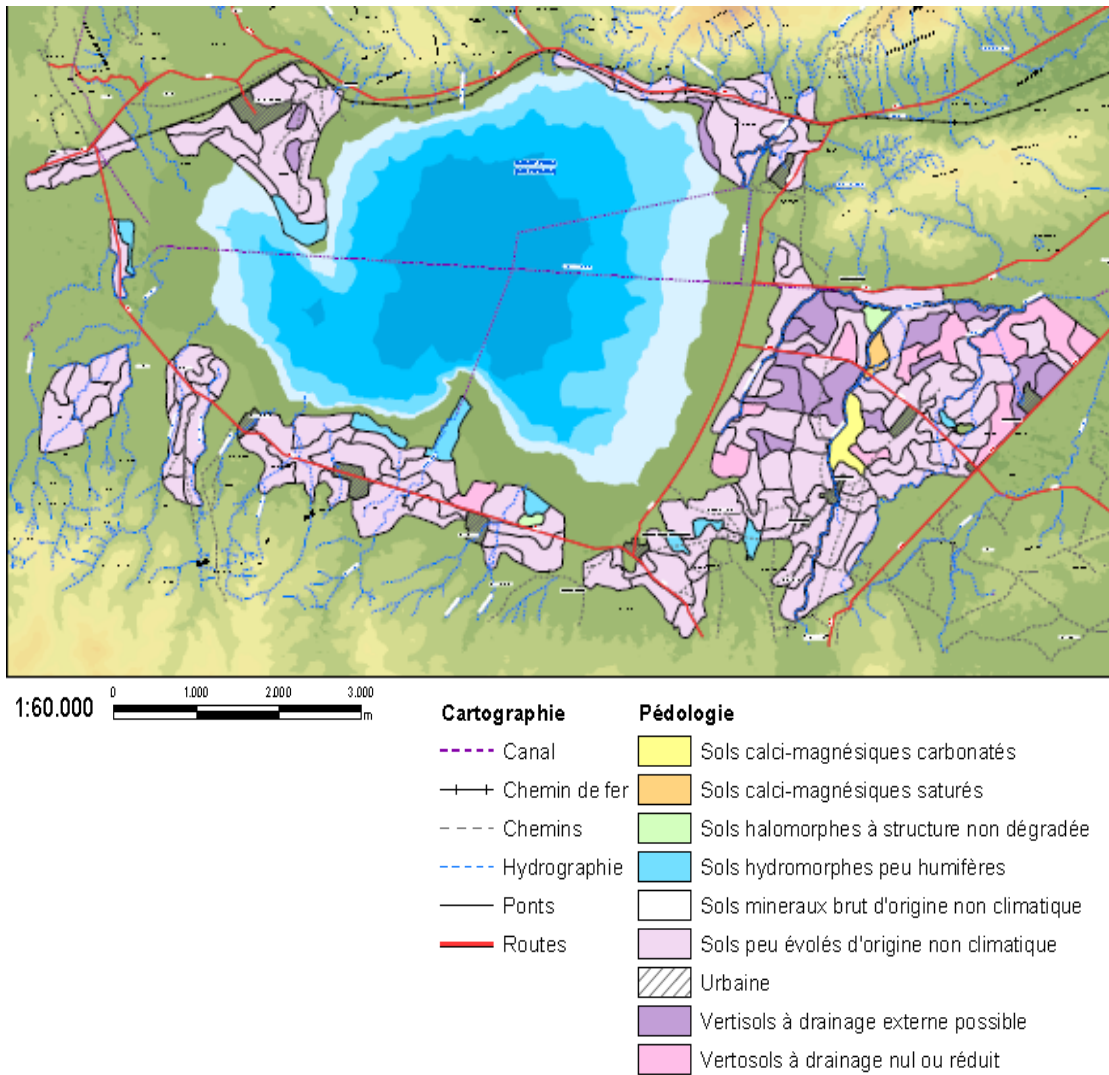
L'amélioration des sols salés passe avant tout par un drainage immédiat pour dessaliniser le sol et des labours profonds. Le drainage permet de maintenir une aération dans le sol et éviter l'alcalinisation par suite de la réduction de sulfates en sulfures.

Ces sols sont actuellement occupés par les prairies et sur certaines parcelles, on retrouve les cultures céréalières et maraîchères.

L'étude pédologique de la zone et l'établissement de la carte des sols (figure 24) a permis de distinguer un ensemble de sols qui occupe une superficie assez importante, localisé à la périphérie du lac. Il comporte des sols médiocres (forte salinité, présence de texture très fine en profondeur, drainage difficile).

**Tableau 7.** Classes des sols (GHI, 2009)

classes	S/classes	Superficie (ha)	%
Sols minéraux bruts	N/climatique	178	1.59
Sols peu Évolués	N/climatique	8612	76.72
Vertisols	Drainage externe nul ou réduit	886	7.89
	Drainage externe possible	742	6.61
Calcimagnésiques	Carbonatés	119	1.06
	Saturés	56	0.50
Halomorphes	Structure non dégradée	22	0.19
Hydromorphes	Peu humifères	610	5.44
Total	N/climatique	11 225	100



**Figure 24.** Carte pédologique d'après GHI 2009.

## 7.2. Etude hydrologique

Dans le but de calculer la fraction de la précipitation qui se transforme en écoulement de surface et en infiltration, un bilan d'eau à l'échelle mensuel a été établi pour le bassin versant du lac (341 km<sup>2</sup>), ainsi que pour la partie de la cuvette de celui-ci.

Le bilan réalisé pour le lac Fetzara suggère une entrée de 113 hm<sup>3</sup>/an, y compris les écoulements de surface et les eaux souterraines ainsi que des précipitations directes sur le lac. L'existence d'une importante recharge des eaux souterraines de l'infiltration dans le bassin versant, ainsi que dans la cuvette du lac lui-même, justifie la présence quasi permanente de l'eau pendant une année, surtout si on tient compte de l'importance des volumes évaporés et des sorties à travers du canal.

**Tableau 8.** Sommaire de bilan du lac Fetzara.

<b>Entrées Hm<sup>3</sup></b>	
Basin versant	
Écoulement	33.5
Infiltration	31.3
Cuvette	
Écoulement	13.6
Infiltration	12.71
Précipitation directe lac	22.23
<b>Total entrés</b>	<b>113.35</b>
<b>Sorties Hm<sup>3</sup></b>	
Évaporation direct	32.35
Canal	81
<b>Total sorties</b>	<b>113.35</b>

**Conclusion**

Les différentes études présentées montrent une diminution dans le temps de la concentration des sels solubles dans l'horizon de surface de la zone d'étude. La salinité était plus élevée aux alentours qu'au centre du lac, particulièrement vers Cheurfa (Sud-Est du lac) suivant le gradient d'écoulement des eaux.

## CHAPITRE V. ETUDE STATISTIQUE MULTIVARIEE DES EAUX DU LAC FETZARA

Les échantillons prélevés ont fait l'objet de mesures physico-chimiques diverses. Dans le cas de nombreux paramètres, il ne convient pas d'étudier la variabilité paramètre par paramètre. Le traitement statistique le plus approprié est l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette méthode permet d'étudier les sources indépendantes de la variabilité, tous paramètres confondus.

C'est une méthode factorielle, c'est-à-dire qu'elle permet de déterminer des axes factoriels indépendants dans l'hyperespace des « n » paramètres mesurés. Ces axes sont orthogonaux dans cet hyperespace, ce qui induit une indépendance entre ceux-ci.

L'ACP peut être calculée à partir de la matrice des covariances ou bien à partir de celle des corrélations. Dans le premier cas, la méthode favorise les paramètres dont les mesures donnent des valeurs élevées, au détriment des autres paramètres. Comme dans les analyses des eaux, il existe des mesures de nature diverse tels que le pH mesuré en unité pH, c'est-à-dire logarithmique, ou bien les éléments majeurs (mg/l) ou les concentrations, il est préférable d'effectuer les calculs à partir de la matrice des corrélations qui éliminent ces inconvénients (Ouardi, 2006).

L'utilisation de l'ACP pour l'étude de la chimie des eaux, permet de différencier les groupes ayant des caractéristiques chimiques similaires, leurs variations (facteur) suivant les axes principaux mais surtout les modes d'acquisition de la minéralisation. Nous avons effectué une ACP sur des variables centrées réduites à l'aide du logiciel Xlstat sur un ensemble de 13 paramètres physico-chimiques obtenus à partir de 25 points d'eau pour la première et la deuxième campagne, 19 points lors de la troisième campagne et sur 13 paramètres.

Les variables prises en compte sont: CE, T, pH, Eh, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>), mais également Br<sup>-</sup>.

### 1. Statistiques descriptives

L'étude statistique de la répartition spatiale des éléments chimiques présente les valeurs minimales, moyennes et maximales, ainsi que le coefficient de variation (tableaux, 9, 10, 11). L'homogénéité d'une série se traduit par les valeurs proches de la moyenne. La



dispersion autour de la moyenne est évaluée à l'aide du coefficient de variation (en %) qui est le rapport de l'écart type à la moyenne. Une série homogène présente des valeurs du coefficient de variation inférieur à 50% (Chabour, 2006).

Il est possible d'établir un classement des différents paramètres en fonction de leur coefficient de variation qui le suivant:

**Première campagne (janvier 2011):**

- Faible coefficient de variation: pH, T°C, Eh.
- Moyen coefficient de variation: CE, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Br<sup>-</sup>.
- Fort coefficient de variation: K<sup>+</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

**Deuxième campagne (mai 2011):**

- Faible coefficient de variation: pH, T°C, Eh, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>.
- Moyen coefficient de variation: CE, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, Br<sup>-</sup>.
- Fort coefficient de variation: K<sup>+</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

**Troisième campagne (octobre 2011):**

- Faible coefficient de variation: pH, T°C, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>.
- Moyen coefficient de variation: CE, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>++</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>++</sup>, Na<sup>+</sup>, Br<sup>-</sup>.
- Fort coefficient de variation: Cl<sup>-</sup>, K<sup>+</sup>, Eh.

Pour la première campagne, les cations présentent un ordre d'abondance de type Na<sup>++</sup> > Ca<sup>++</sup> > Mg<sup>++</sup> > K<sup>+</sup>.

Les teneurs en sodium s'inscrivent entre 95 mg/l et 431 mg/l, la teneur moyenne est de 213.528 mg/l. On observe une très grande variabilité pour le calcium, la valeur moyenne de 76,344 mg/l. Huit analyses ont une valeur supérieure à la moyenne. Les concentrations en magnésium sont très variables et comprises entre 0.97 mg/l et 106.487 mg/l, la valeur moyenne est de 43.939 mg/l.

Les teneurs moyennes en potassium est de 17.325 mg/l, c'est en fait l'ion le moins abondant. Il montre une grande variabilité avec une valeur minimale de 2.005 mg/l et un maximum de 106.277 mg/l. Son coefficient de variation corrobore très bien cette observation. Les chlorures et les bicarbonates constituent l'essentiel de la minéralisation

des eaux, on remarque que les concentrations en sulfates et en carbonates sont relativement faibles vis-à-vis des bicarbonates et des chlorures.

Pour la deuxième campagne, le calcium avec une moyenne de 67.59 mg/l présente une forte fréquence des valeurs comprises entre 24.636 mg/l et 180.36 mg/l. Les teneurs en magnésium présentent une moyenne de 58.966 mg/l et une forte fréquence des valeurs comprises entre 12.636 mg/l et 145.8 mg/l. Les chlorures et le sodium suivent une évolution du Nord vers le Sud avec une forte fréquence des valeurs des chlorures comprises entre 106.5 et 887.5 mg/l et des valeurs comprises entre 106.5 mg/l et 401.005 mg/l pour  $\text{Na}^+$ . Les sulfates suivent pratiquement la même évolution, les fortes fréquences s'observent en Est et au Sud du lac, avec de fortes fréquences comprises entre 150.92 mg/l et 382.69 mg/l. En revanche les bicarbonates présentent une répartition spatiale assez hétérogène.

Pour la troisième campagne, les chlorures présentent une concentration moyenne de 339.842 mg/l et l'ion sodium est le cation le plus présent avec 224.778 mg/l en moyenne. Les coefficients de variation de ces deux ions montrent des valeurs importantes (56,15% pour le sodium et 98.52 % pour les chlorures).

Le sodium est généralement associé à l'ion chlorure, très soluble dans l'eau et il est affecté par le processus d'échange de base. Les argiles peuvent retenir des quantités importantes en sels (Schoeller, 1962), les eaux en contact avec les dépôts argileux peuvent se charger en ces éléments et grâce à leur solubilité élevée, ces ions peuvent atteindre des concentrations considérables.

Les concentrations en chlorures et en sodium présentent une forte similitude avec la conductivité électrique des eaux. Ceci indique que la CE des eaux analysées est déterminée principalement par les sels (NaCl) et que le faciès des eaux étudiées est en partie de type chloruré sodique.

Les sulfates présentent une grande dispersion des valeurs (coefficient de variation 64.28%). Les sulfates pourraient provenir de la dissolution d'anhydrite ou de gypse ou encore de l'oxydation de la pyrite présente dans les formations argileuses.

Les ions bicarbonates et calcium sont présents avec une concentration moyenne de 626.695 mg/l pour les bicarbonates et de 82.143 mg/l pour le calcium. Les coefficients de variation sont importants (respectivement 54.76% pour le calcium et 32.52% pour les

bicarbonates). Les bicarbonates sont des composés anioniques contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles selon leurs sources et le pH de l'eau. L'origine de cet élément est essentiellement la mise en solution du gaz carbonique qui par formation d'un acide faible attaque les roches carbonatées.

Les concentrations en magnésium sont comprises entre 29.16 mg/l et 206.55 mg/l, la moyenne est de l'ordre de 94.054 mg/l.

Les concentrations en potassium présentent une variation de 4.028 mg/l à 53.140 mg/l, avec une moyenne de 19.047 mg/l. Le potassium se trouve à de faibles concentrations par rapport aux autres éléments dans les eaux car il est adsorbé par la matrice argileuse du sol est absorbé par les plantes.

De manière générale, la composition chimique des eaux est très variable. Le coefficient de variation de la plupart des paramètres est importante, exception faite du pH et T°C. Ce résultat est relativement fréquent en milieu salé, où la salure dans la majeure partie des paramètres physico-chimiques présente une grande variabilité spatiale (Ouardi, 2006).

**Tableau 9.** Statistique descriptive pour la chimie des eaux  
(campagne janvier 2011).

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Coefficient de v %	Ecart-type
CE	0.500	3.500	1.646	45.572	0.750
pH	6.650	7.500	7.033	3.440	0.242
Eh	5.000	252.000	182.680	31.574	57.680
T°C	13.000	20.100	16.616	12.102	2.011
Cl <sup>-</sup>	71.000	710.000	332.280	<b>57.689</b>	191.689
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	85.400	707.600	367.952	52.883	194.585
Mg <sup>++</sup>	0.972	106.487	43.839	<b>68.505</b>	30.033
Ca <sup>++</sup>	12.024	176.352	76.344	61.583	47.015
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	15.416	270.991	120.188	50.026	60.126
Na <sup>+</sup>	95.000	431.000	213.528	41.941	89.557
K <sup>+</sup>	2.005	106.277	17.325	<b>136.992</b>	23.734
CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	0.000	60,010	16.323	<b>137.364</b>	22.422
Br <sup>-</sup>	0.009	0,135	0.063	45.209	0.028

**Tableau 10.** Statistique descriptive pour la chimie des eaux  
(campagne mai 2011)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Coefficient de v %	Ecart-type
CE	1.240	6.390	2.559	45.19	1.156
pH	6.400	7.470	6.868	4.33	0.298
Eh	60.000	178.000	129.440	22.63	29.303
T°C	17.100	25.700	20.600	8.58	1.768
Cl <sup>-</sup>	106.500	887.500	319.500	<b>64.86</b>	207.252
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	61.000	732.000	362.584	40.61	147.267
Mg <sup>++</sup>	12.636	145.800	58.966	54.02	31.859
Ca <sup>++</sup>	24.850	180.360	67.591	54.80	37.046
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	150.920	382.690	255.986	27.16	69.550
Na <sup>+</sup>	106.007	401.005	226.055	34.82	78.725
K <sup>+</sup>	1.989	73.008	15.439	<b>128.40</b>	19.825
CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	0.000	108.000	33.600	<b>78.51</b>	26.382
Br <sup>-</sup>	0.047	0.183	0.085	39.29	0.033

**Tableau 11.** Statistique descriptive pour la chimie des eaux  
(campagne octobre 2011)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Coefficient de v %	Ecart-type
CE	0.760	5.170	1.967	<b>64.57</b>	1.270
pH	7.220	8.590	7.763	4.14	0.322
Eh	15.000	253.000	51.684	<b>102.25</b>	52.849
T°C	19.300	24.100	21.926	5.62	1.233
Cl <sup>-</sup>	71.000	1491.000	399.842	<b>98.24</b>	392.796
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	195.200	890.600	626.695	32.52	203.829
Mg <sup>++</sup>	29.160	206.550	94.054	<b>58.28</b>	54.810
Ca <sup>++</sup>	32.866	193.186	82.143	<b>54.76</b>	44.982
SO <sub>4</sub> <sup>--</sup>	11.564	221.284	81.211	<b>64.28</b>	52.204
Na <sup>+</sup>	83.996	562.994	224.778	<b>56.15</b>	126.209
K <sup>+</sup>	4.028	53.140	19.047	<b>79.53</b>	15.147
CO <sub>3</sub> <sup>--</sup>	0.000	108.000	47.053	<b>63.94</b>	30.084
Br <sup>-</sup>	0.020	0.224	0.072	<b>62.91</b>	0.045

## 2. Matrice de corrélation

Les corrélations linéaires entre certains éléments chimiques pertinents permettent de rechercher l'origine de la minéralisation en évaluant les degrés de dépendance entre les différents paramètres concernés. L'évaluation se fait à l'aide des coefficients de corrélation déterminés par des calculs statistiques. La corrélation entre deux paramètres sera d'autant plus significative que le coefficient de corrélation R sera proche de la valeur 1. Ainsi les corrélations ont été établies entre tous les éléments majeurs pris deux à deux; ce qui nous a permis d'obtenir des diagrammes binaires de corrélation pour les interprétations.

Les tableaux 12, 13, 14 donnent la matrice de corrélation. Le pH, la T°C, le Eh et le K<sup>+</sup> paraissent sans liaison directe entre eux et avec l'ensemble des éléments. Il en est de même pour CO<sub>3</sub><sup>-</sup> et HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> qui restent isolés. Leur degré de corrélation avec les autres ions n'étant pas significatif. L'ion Cl<sup>-</sup> présente les meilleures corrélations avec CE et Na<sup>+</sup>.

La corrélation positive des chlorures et la conductivité électrique de l'eau est excellente, d'où une grande influence des chlorures sur la salinité des eaux, le coefficient de corrélation entre la conductivité électrique et les ions chlorures est égale à 0.879 pour la première campagne, 0,981 pour la deuxième campagne et 0.913 pour la troisième campagne. Le coefficient de corrélation, dans le cas du sodium est fortement significatif pour les trois campagnes.

Les corrélations entre la conductivité électrique qui reflète la salinité totale de l'eau et les variables chimiques, autres que les chlorures et sodium, sont présentées dans les tableaux 12, 13, 14. Le magnésium, les sulfates et le calcium présentent une participation importante dans la minéralisation totale des eaux pour la première et deuxième campagne. Pour la troisième campagne le magnésium et le calcium présente des corrélations significatives avec la conductivité électrique.

Ces observations nous conduisent à proposer un bilan par régression multiples de la conductivité électrique au regard des différents anions et cations. Si l'on devait estimer la conductivité électrique à partir d'un seul élément ca devrait être les chlorures, à partir de deux éléments ils s'agiraient du Chlorures et le sodium; à partir de trois éléments ce seraient les chlorures, le sodium et le calcium et à partir de quatre éléments, ce sera les chlorures, le sodium, le calcium, le magnésium, etc.....

Une forte corrélation existe entre  $\text{Cl}^-$ - $\text{Ca}^{++}$  pour les trois campagnes et entre  $\text{SO}_4^{--}$ - $\text{Na}^+$  pour la deuxième campagne, entre  $\text{Cl}^-$ - $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ - $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ - $\text{Na}^+$  pour la troisième campagne. Les relations entre ces cations indiquent l'existence des réactions d'échange ioniques entre solution et le complexe adsorbant.

Les chlorures montrent une excellente corrélation avec le sodium. On remarque que les teneurs en chlorures et sodium varient de façon similaire avec augmentation de la conductivité électrique. Ces fortes corrélations montrent que les variations des charges ioniques dissoutes sont entièrement ou en partie liées à des variations des teneurs de ces ions.

**Tableau 12.** Matrice de corrélation des différents paramètres (campagne janvier 2011).

Variables	CE	pH	Eh	T°C	$\text{Cl}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Mg}^{++}$	$\text{Ca}^{++}$	$\text{SO}_4^{--}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{CO}_3^{--}$	$\text{Br}^-$
CE	<b>1</b>												
pH	-0.066	<b>1</b>											
Eh	0.113	0.221	<b>1</b>										
T°C	-0.064	0.166	-0.325	<b>1</b>									
$\text{Cl}^-$	<b>0.879</b>	0.240	0.089	0.019	<b>1</b>								
$\text{HCO}_3^-$	0.465	<b>-0.469</b>	0.131	-0.174	0.156	<b>1</b>							
$\text{Mg}^{++}$	<b>0.651</b>	-0.437	0.089	-0.425	0.408	0.455	<b>1</b>						
$\text{Ca}^{++}$	<b>0.686</b>	0.069	0.286	-0.110	<b>0.668</b>	0.395	0.239	<b>1</b>					
$\text{SO}_4^{--}$	<b>0.713</b>	-0.072	0.167	-0.042	<b>0.579</b>	0.262	0.503	0.263	<b>1</b>				
$\text{Na}^+$	<b>0.919</b>	0.170	0.059	-0.034	<b>0.939</b>	0.217	0.463	<b>0.650</b>	<b>0.665</b>	<b>1</b>			
$\text{K}^+$	-0.302	0.104	0.015	0.091	-0.328	-0.136	-0.303	-0.322	-0.113	-0.287	<b>1</b>		
$\text{CO}_3^{--}$	-0.177	<b>-0.217</b>	-0.056	0.057	-0.364	0.352	0.165	-0.123	-0.147	-0.234	0.342	<b>1</b>	
$\text{Br}^-$	-0.278	0.073	-0.431	0.210	-0.192	-0.070	-0.168	-0.225	-0.378	-0.317	-0.176	-0.213	<b>1</b>

**Tableau 13.** Matrice de corrélation des différents paramètres (campagne mai 2011)

Variables	CE	pH	Eh	T°C	$\text{Cl}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{Mg}^{++}$	$\text{Ca}^{++}$	$\text{SO}_4^{--}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	$\text{CO}_3^{--}$	$\text{Br}^-$
CE	<b>1</b>												
pH	-0.051	<b>1</b>											
Eh	-0.002	-0.010	<b>1</b>										
T°C	0.020	0.516	0.015	<b>1</b>									
$\text{Cl}^-$	<b>0.913</b>	0.265	0.041	0.217	<b>1</b>								
$\text{HCO}_3^-$	-0.087	-0.619	-0.010	-0.465	-0.427	<b>1</b>							
$\text{Mg}^{++}$	<b>0.698</b>	-0.278	0.132	-0.240	0.446	0.455	<b>1</b>						
$\text{Ca}^{++}$	<b>0.766</b>	-0.117	0.037	-0.024	<b>0.701</b>	-0.089	0.445	<b>1</b>					
$\text{SO}_4^{--}$	<b>0.684</b>	-0.240	-0.203	-0.189	0.497	0.335	0.574	0.495	<b>1</b>				
$\text{Na}^+$	<b>0.813</b>	0.170	-0.187	0.030	<b>0.842</b>	-0.199	0.379	0.519	<b>0.702</b>	<b>1</b>			
$\text{K}^+$	-0.387	0.057	0.249	0.138	-0.402	0.182	-0.202	-0.343	-0.172	-0.417	<b>1</b>		
$\text{CO}_3^{--}$	0.129	-0.432	0.021	-0.652	-0.117	0.389	0.492	0.211	0.188	-0.025	-0.125	<b>1</b>	
$\text{Br}^-$	0.407	0.024	-0.133	-0.014	0.412	-0.211	0.044	0.227	0.191	0.499	-0.213	0.162	<b>1</b>

**Tableau 14.** Matrice de corrélation des différents paramètres (campagne octobre 2011).

Variabes	CE	pH	Eh	T°C	Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Mg <sup>++</sup>	Ca <sup>++</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>
CE	<b>1</b>												
pH	0.473	<b>1</b>											
Eh	-0.287	-0.183	<b>1</b>										
T	-0.015	-0.099	-0.286	<b>1</b>									
Cl <sup>-</sup>	<b>0.981</b>	0.571	-0.295	0.021	<b>1</b>								
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.053	-0.074	0.043	0.027	-0.090	<b>1</b>							
Mg <sup>++</sup>	<b>0.840</b>	0.447	-0.216	-0.048	<b>0.836</b>	0.337	<b>1</b>						
Ca <sup>++</sup>	<b>0.865</b>	0.302	-0.222	0.069	<b>0.791</b>	0.117	0.660	<b>1</b>					
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.247	-0.222	0.435	-0.441	0.135	-0.161	0.190	0.197	<b>1</b>				
Na <sup>+</sup>	<b>0.940</b>	0.437	-0.274	0.075	<b>0.934</b>	0.177	<b>0.875</b>	<b>0.791</b>	0.123	<b>1</b>			
K <sup>+</sup>	-0.069	0.437	-0.013	0.145	0.021	-0.177	-0.076	-0.075	-0.406	-0.194	<b>1</b>		
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.206	-0.088	-0.232	0.114	0.232	0.272	0.322	0.188	-0.374	0.369	-0.146	<b>1</b>	
Br <sup>-</sup>	-0.077	0.050	-0.193	0.363	-0.069	-0.054	-0.226	0.021	-0.155	-0.061	-0.077	0.090	<b>1</b>

### 3. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Le grand intérêt de l'ACP réside dans le fait qu'elle prend en compte toutes les variables entrées simultanément et que l'interprétation des résultats se limite le plus souvent à l'interprétation des premières composantes. Des cercles de corrélations permettent de schématiser les liens existant entre les différentes variables étudiées. De même, des projections des individus sur les plans formés par les premières composantes principales permettent de visualiser la répartition des différents individus (points d'eau échantillonnés), ce qui donne une idée sur leur ressemblance vis-à-vis des variables mesurées.

Pendant la première campagne, les trois principaux axes expliquant 65.39% de la variance totale. L'axe I exprime 36.18% de la variance totale, l'axe II exprime 16.77% et l'axe III exprime 12.43% de la variance totale. La matrice de corrélation montre que l'axe F1 est corrélé négativement au K<sup>+</sup>. Il est corrélé positivement aux éléments CE, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup> et Na<sup>+</sup> avec des valeurs dépassant les 85% pour les chlorures, le sodium et la conductivité électrique. Sa corrélation avec HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> est dans les limites de l'acceptable. En revanche, il n'est pas corrélé à CO<sub>3</sub><sup>-</sup>. L'axe F2 est corrélé positivement au pH (75%) négativement avec les carbonates et les bicarbonates. L'axe F3 est corrélé seulement avec les éléments Eh et K<sup>+</sup>.

Le facteur F1 regroupe tous les éléments chimiques dans le pôle positif à l'exception de pH, K<sup>+</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>, T°C, Br<sup>-</sup>. Le facteur F1 caractérise donc la minéralisation (influencée principalement par les évaporites) dans sa partie positive et les eaux moins minéralisées dans le pôle négatif.

Dans le plan des individus (Figure 26) l'axe F1 distingue les eaux faiblement à moyennement chargées et les eaux fortement minéralisées.

Le facteur F2, qui oppose le pH et  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{2-}$  caractérise les eaux carbonatées, expliquant leur caractère acide ou basique. Dans le plan des individus, l'axe F2 sépare les eaux acides des eaux basiques. Le facteur F3 est uniquement corrélé au Eh, explique les processus d'oxydoréduction.

Dans le plan des individus, le facteur F3 exprime donc un phénomène d'oxydoréduction

Pour la deuxième campagne, le facteur F1 avec une variance exprimée de 35.57%, est le plus important de tous, ensuite viennent les facteurs F2 et F3, avec respectivement 23.48% et 10.17% de la variance exprimée et sont représentatifs de la variance de l'ensemble des données. Les plans factoriels F1-F2 et F2-F3 représentent respectivement des variances égales 59.05% et 45.74%. Le facteur F1 présente le pôle de la salinité avec une relation de la conductivité avec les éléments chimiques (origine évaporitique de la salinité).

Dans le plan des individus (Figure 28), l'axe F1 distingue toujours les eaux moyennement minéralisées aux eaux fortement minéralisées

Le facteur F2, pôle des carbonates par une relation inverse entre l'évolution des carbonates et les bicarbonates avec le pH. Dans le plan des individus (Figure 28), l'axe F2 discrimine toujours les eaux acides des eaux basiques.

Le facteur F3, indique le pôle d'oxydoréduction par une relation avec le Eh.

Pour la troisième campagne, les trois axes factoriels F1, F2 et F3 représentent à eux seuls, 67.40% de la variance totale (respectivement 37.97%, 16.88 et 12.96%).

Le facteur F1 est caractérisé par CE(0.947), pH(0.484),  $\text{Cl}^-$ (0.945),  $\text{Mg}^{++}$ (0.881),  $\text{Ca}^{++}$ (0.763). Les variables définissant F1 sont caractéristiques de la minéralisation majeure des eaux. Dans le pôle positif l'association  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{--}$  forme un pôle extrême traduisant une minéralisation d'origine évaporitique.

L'axe F2 caractérisé par les concentrations en  $\text{SO}_4^{--}$  (0.756) et en moindre mesure par Eh (0.356). Cet axe pourrait donc représenter des phénomènes d'oxydoréduction de sulfure



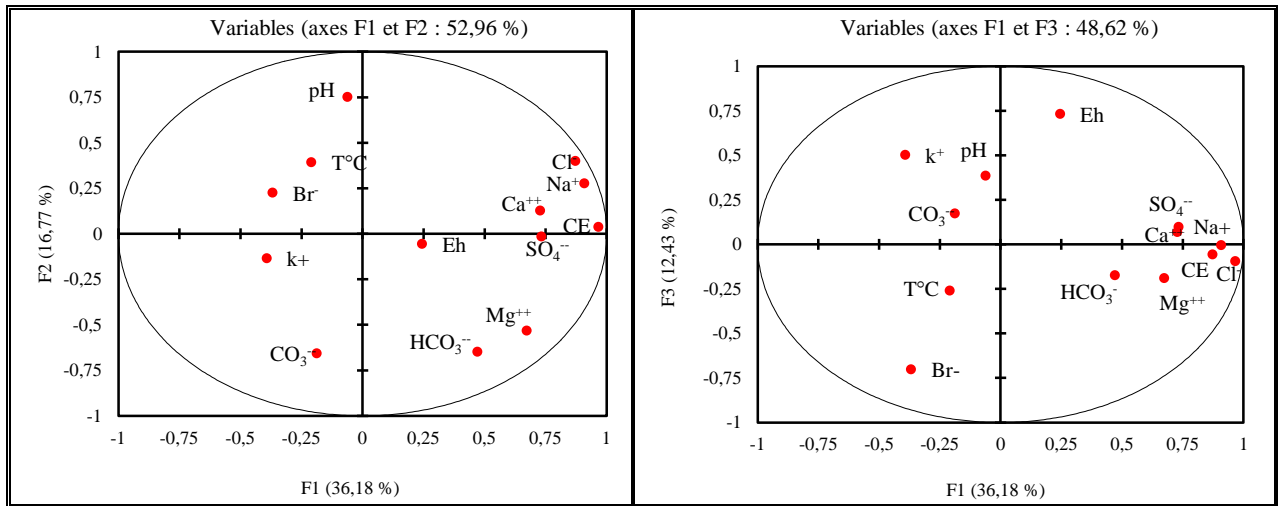


Figure 25. Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (campagne janvier 2011).

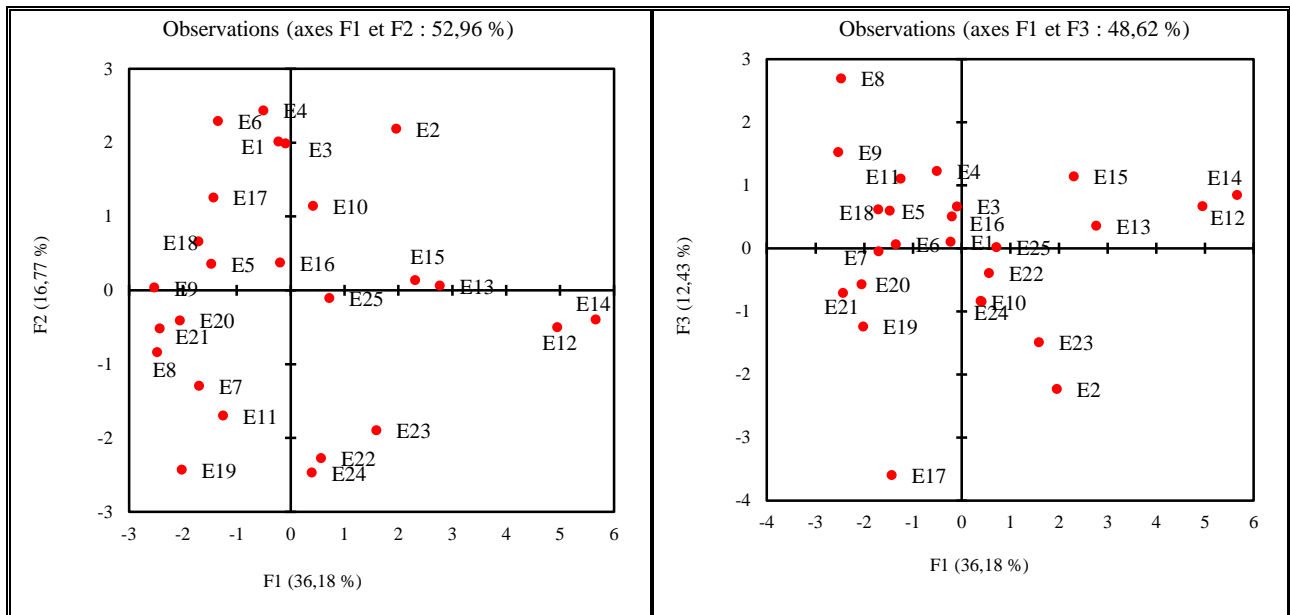


Figure 26. Répartition des échantillons sur le plan factoriel (campagne janvier 2011).  
(E=Echantillon)

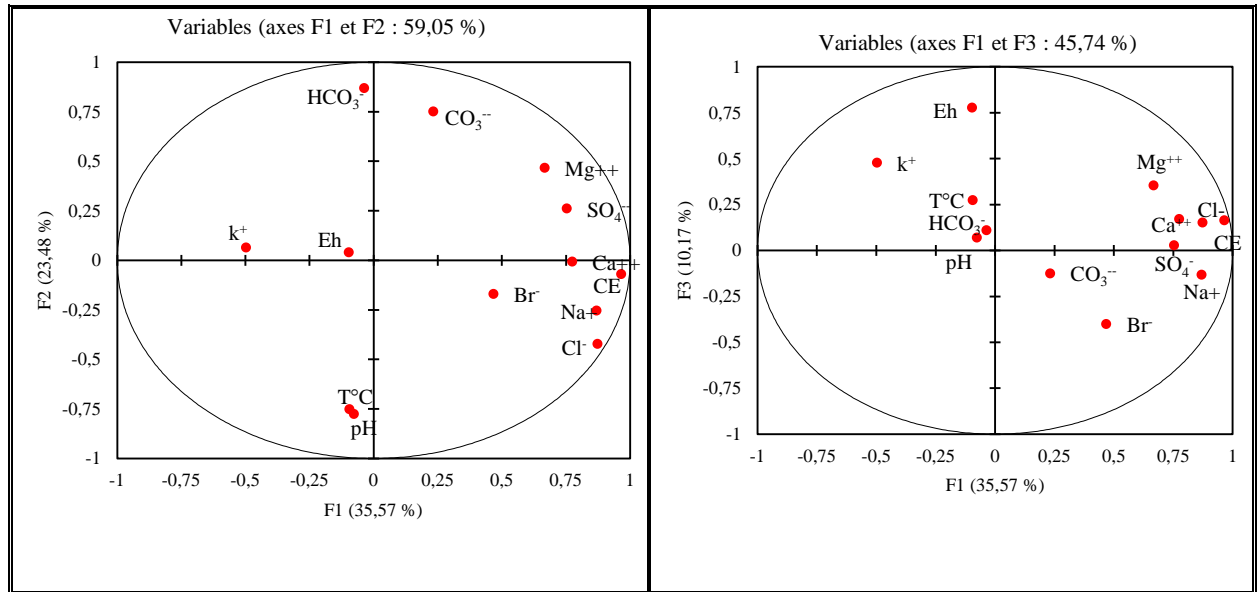


Figure 27. Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (campagne mai 2011).

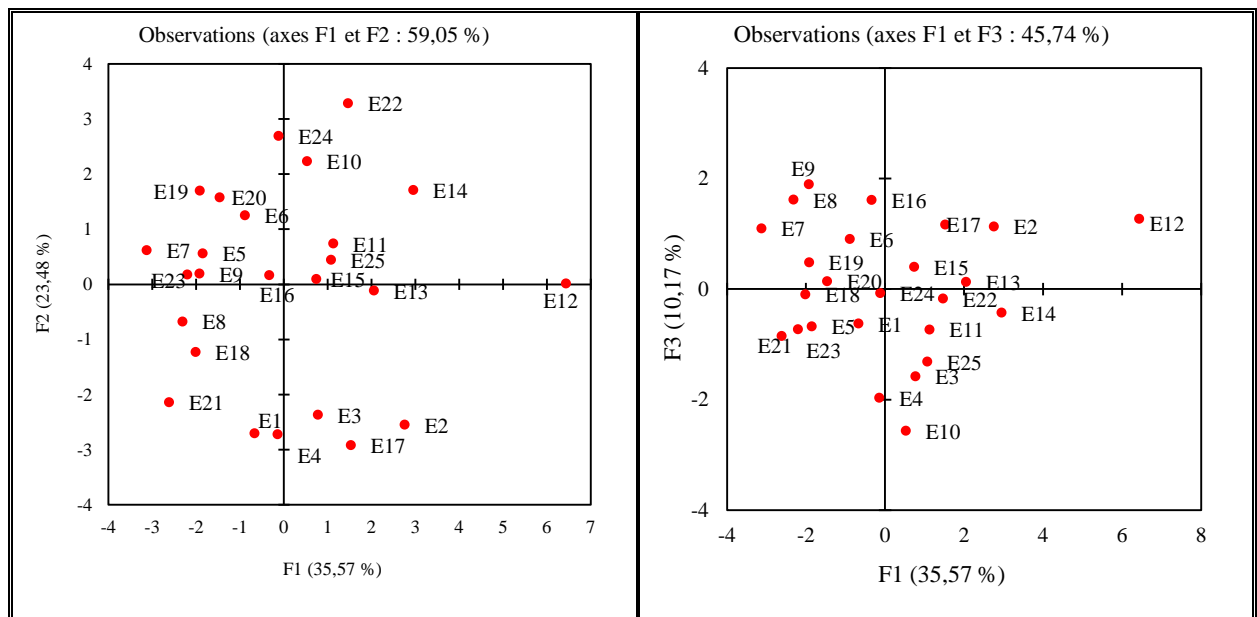


Figure 28. Répartition des échantillons sur le plan factoriel (campagne mai 2011).

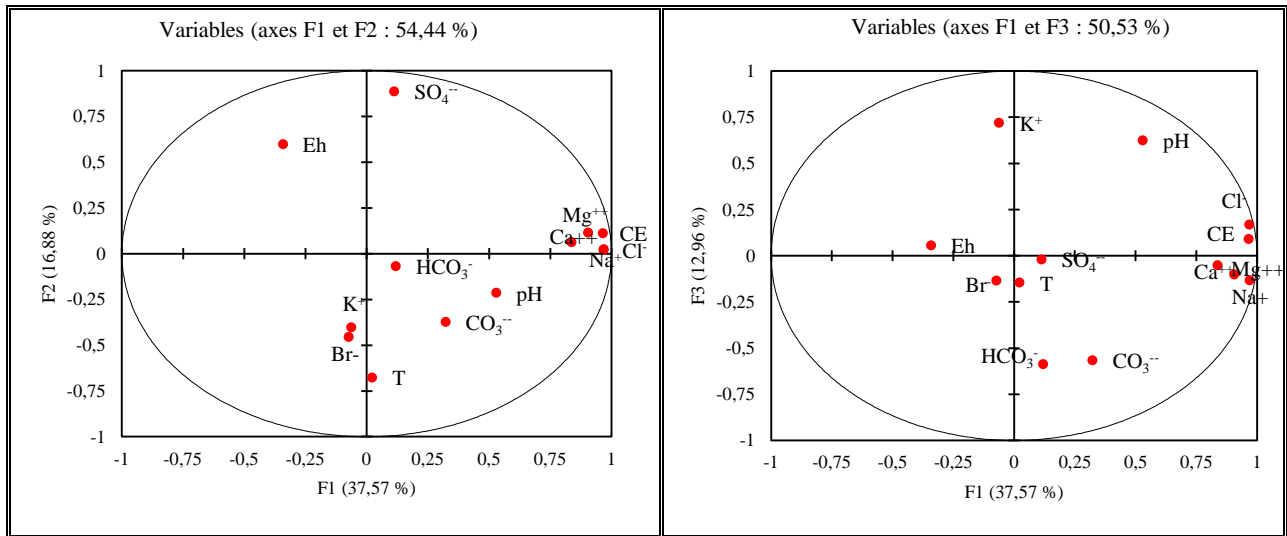


Figure 29. Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (campagne octobre 2011).

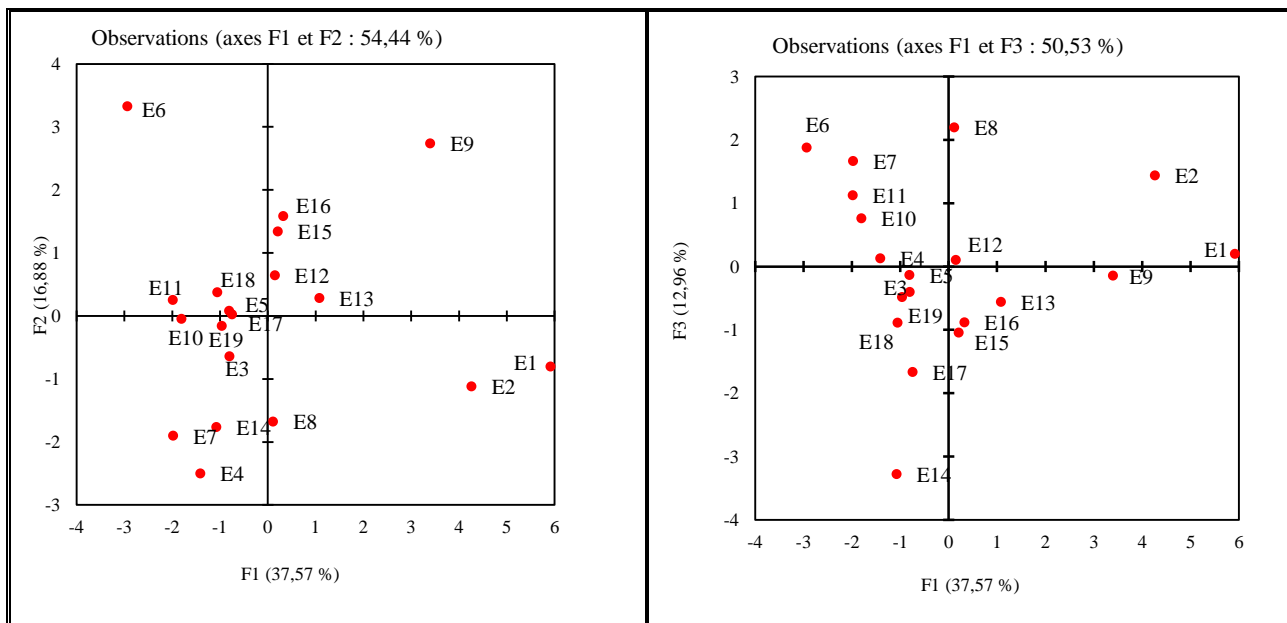


Figure 30. Répartition des échantillons sur le plan factoriel (campagne octobre 2011).

**Tableau 15.** Corrélation entre les variables et les facteurs  
(campagne janvier 2011)

	F1	F2	F3
CE	<b>0.968</b>	0.037	-0.096
pH	-0.061	<b>0.750</b>	0.383
Eh	0.246	-0.057	<b>0.730</b>
T°C	-0.208	0.491	-0.260
Cl <sup>-</sup>	<b>0.873</b>	0.399	-0.057
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.472	<b>-0.650</b>	-0.174
Mg <sup>++</sup>	<b>0.675</b>	-0.534	-0.192
Ca <sup>++</sup>	<b>0.729</b>	0.126	0.068
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	<b>0.734</b>	-0.016	0.096
Na <sup>+</sup>	<b>0.910</b>	0.275	-0.007
K <sup>+</sup>	-0.391	-0.136	<b>0.500</b>
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.186	<b>-0.658</b>	0.172
Br <sup>-</sup>	-0.367	0.224	-0.703

**Tableau 16.** Corrélation entre les variables et les facteurs  
(campagne mai 2011)

	F1	F2	F3
CE	<b>0.967</b>	-0.071	0.163
pH	-0.075	<b>-0.776</b>	0.069
Eh	-0.095	0.039	<b>0.777</b>
T°C	-0.093	<b>-0.752</b>	0.273
Cl <sup>-</sup>	<b>0.875</b>	-0.423	0.150
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.035	<b>0.868</b>	0.109
Mg <sup>++</sup>	<b>0.669</b>	<b>0.466</b>	0.353
Ca <sup>++</sup>	<b>0.776</b>	-0.008	0.171
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	<b>0.755</b>	0.260	0.028
Na <sup>+</sup>	<b>0.870</b>	-0.255	-0.132
K <sup>+</sup>	-0.496	0.063	<b>0.477</b>
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.234	<b>0.750</b>	-0.126
Br <sup>-</sup>	0.470	-0.171	-0.402

**Tableau 17.** Corrélation entre les variables et les facteurs  
(campagne octobre 2011)

	F1	F2	F3
CE	<b>0.947</b>	0.075	0.043
pH	<b>0.484</b>	-0.209	0.249
Eh	-0.283	<b>0.356</b>	0.042
T°C	0.015	-0.382	-0.073
Cl <sup>-</sup>	<b>0.945</b>	-0.011	0.079
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.100	-0.052	-0.204
Mg <sup>++</sup>	<b>0.881</b>	0.063	-0.054
Ca <sup>++</sup>	<b>0.763</b>	0.040	-0.025
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	0.123	<b>0.756</b>	0.029
Na <sup>+</sup>	<b>0.946</b>	0.003	-0.075
K <sup>+</sup>	-0.057	-0.315	0.258
CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.274	-0.234	-0.210
Br <sup>-</sup>	-0.065	-0.217	-0.049

## **Conclusion**

Ce travail qui a consisté à rechercher l'origine de la minéralisation des eaux à partir de la combinaison de deux méthodes (étude géochimique et l'étude statistique multivariées) et a permis d'apporter des réponses à notre problématique.

L'analyse statistique multivariée des données hydrochimiques, a permis d'identifier trois principaux mécanismes qui sont responsables de l'évolution de la minéralisation des eaux de la zone. Le processus de salinisation est de loin le processus principal. Le mécanisme à la base de la minéralisation en éléments majeurs des eaux est le phénomène de dissolution/précipitation des formations évaporitiques et carbonatées concentrées par évaporation. Les processus de second ordre seraient le phénomène d'échange ionique et les processus d'oxydoréduction, indique que des processus de sulfato-réduction ont lieu. L'enrichissement en bicarbonates est lié à l'augmentation du pH suite au dégazage du CO<sub>2</sub>.

## CHAPITRE VI. APPROCHE GEOCHIMIQUE DES EAUX

Ce chapitre aborde la géochimie des eaux superficielles et souterraines du lac Fetzara, afin d'identifier à partir de l'étude des éléments majeurs et les bromures, les faciès chimiques des eaux ainsi que les principaux processus intervenant dans la minéralisation et de déterminer leurs origines.

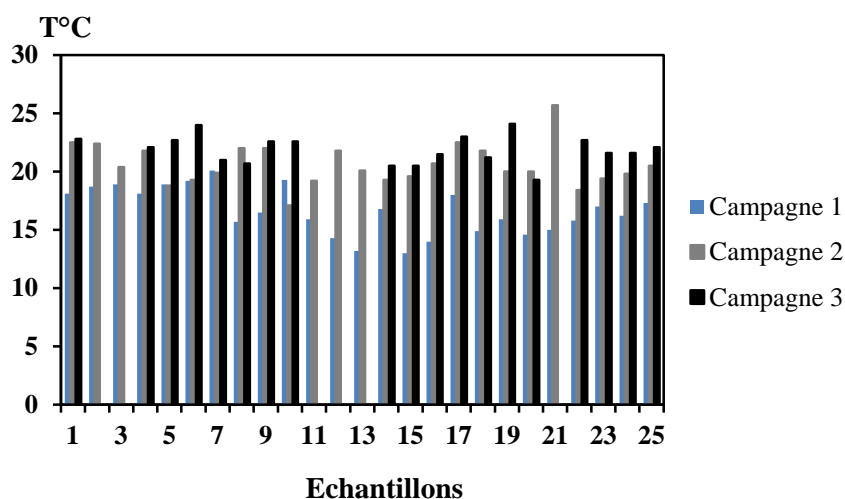
### 1. Les paramètres physico-chimiques

Ces paramètres sont au nombre de quatre et sont mesurés sur le terrain, il s'agit de la température ( $T$  °C), du potentiel d'hydrogène (pH), de la conductivité électrique (CE) et du potentiel d'oxydo-réduction (Eh).

#### 1.1. La température ( $T$ °C)

La température moyenne des eaux du lac Fetzara est de 16.61°C (janvier 2011) et 20.60°C (mai 2011) correspondant respectivement à une période fraîche et humide et fin de saison des pluies. En octobre 2011, considérée comme saison chaude et début des pluies, la température des eaux prélevées varie entre 17.1°C et 25.7°C avec une moyenne de 20.60 °C.

Les températures moyennes mesurées reflètent l'influence du climat sur la zone au moment de des prélèvements des échantillons, mais également l'influence de la saison indiquant un équilibre thermique entre l'eau et l'atmosphère.

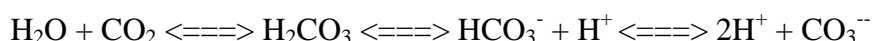


**Figure 31.** Variations de la température des eaux durant les trois campagnes

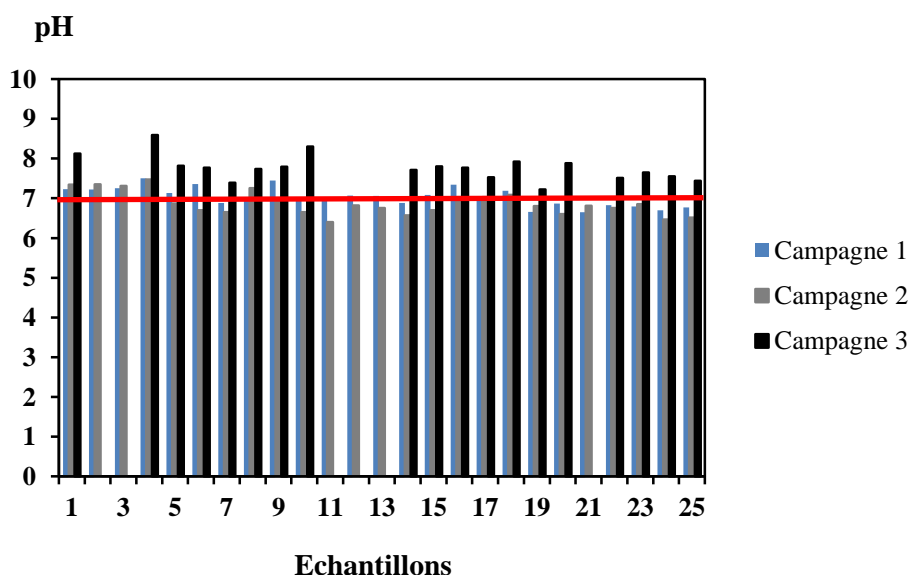
## 1.2. Le potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH de l'eau mesure la concentration des protons  $H^+$  contenus dans l'eau. Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acide carbonique ; il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates (Azzaoui, 1999; El Bliidi et al., 2003). Le système carbonate ( $CO_2$ ,  $H_2CO_3/HCO_3^-/CO_3^{--}$ ) doit théoriquement jouer un rôle dominant dans la fixation du pH de l'eau (Groleau et al. 2008).

Les valeurs élevées du pH peuvent résulter d'une consommation du  $CO_2$  ou un dégazage qui entraînent une augmentation relative de l'ion  $CO_3^{--}$ . En effet, la réaction d'hydratation du  $CO_2$  libère de l'acide carbonique qui attaque les roches. L'altération des minéraux conduit à une consommation de  $CO_2$  et induit par conséquent une augmentation du pH (Ahmed Salem, 2012).



La variation des valeurs du pH sont très faibles pour les trois mesures de janvier, mai et octobre 2011. Elles sont comprises entre 6.65 et 7.5 en janvier et 6.4 et 7.47 en mai. Les valeurs observées en octobre 2011 sont légèrement basiques et varient entre 7.22 et 8.59, Ceci est dû à la présence des carbonates. L'acidité de l'eau est liée à la dissociation de l'acide carbonique issu du  $CO_2$  atmosphérique solubilisé dans l'eau et le renouvellement de ce gaz présent dans l'eau.

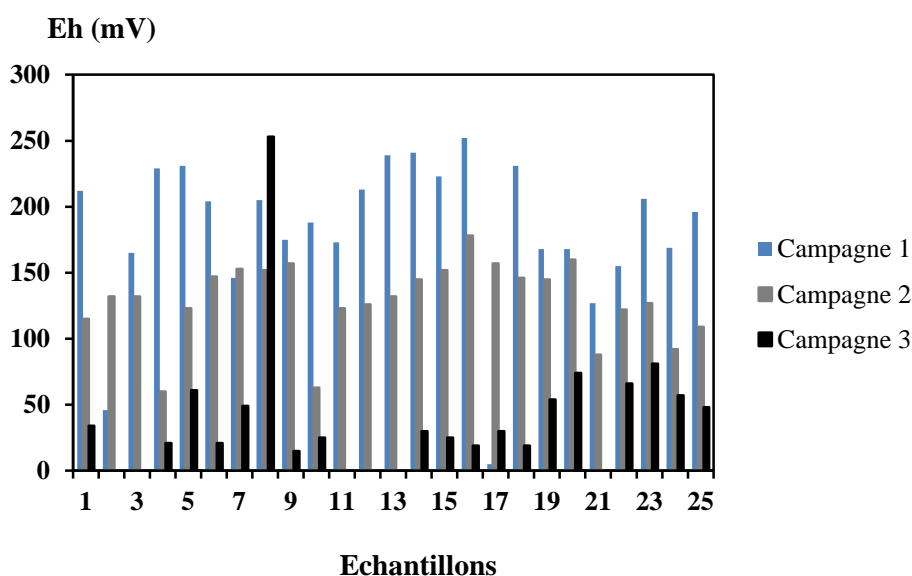


**Figure 32.** Variations du pH des eaux durant les trois campagnes.

### 1.3. Le potentiel d'oxydo-réduction (Eh)

Dans une eau bien oxygénée, les conditions d'oxydation dominent. Quand les concentrations d'oxygène déminent, le milieu devient plus réducteur ce qui se traduit par une réduction du potentiel redox.

Les valeurs faibles du potentiel d'oxydo-réduction correspondent aux périodes de basses eaux et atteignent 15 mV en octobre 2011. Les valeurs élevées s'observent en période des hautes eaux, les plus fortes valeurs atteignent 252 mV. Ceci est dû aux apports des précipitations qui régénèrent l'eau.



**Figure 33.** Variations de Eh des eaux durant les trois campagnes.

### 1.4. La conductivité électrique (CE)

La mesure de la conductivité électrique donne un aperçu sur la minéralisation. Elle accroît avec l'augmentation de la teneur de l'eau en sels dissous.

L'évolution de la conductivité électrique dans les eaux du lac Fetzara est bien visible à l'échelle des saisons où les fortes valeurs s'observent en période d'été, elles atteignent 6.7 mS/cm en mai 2011 et 5.17 mS/cm en octobre 2011 alors que les valeurs les plus faibles se manifestent en janvier 2011, elles sont de l'ordre de 3.5 mS/cm au niveau du point E14.

Par ailleurs, l'évolution de la minéralisation des eaux superficielles et souterraines dans l'espace, montre une très grande variation dans le secteur Est où l'on remarque une valeur de la conductivité électrique de l'ordre de 2.53 mS/cm au niveau du point E2 en



janvier 2011, elle augmente à 3.77 mS/cm au même point en mai, et augmente à 5.17 mS/cm au niveau du point E2.

Au Nord l'évolution de la minéralisation est décroissante, elle varie entre 0.5 et 2.12 mS/cm en janvier et entre 1.24 et 3.07 mS/cm, puis diminue jusqu'à 0.18 mS/cm en octobre 2011.

Au Sud de la zone d'étude, la conductivité électrique étant initialement de 3,5 mS/cm au niveau du point E22 en janvier 2011, puis s'élève à 6.39 mS/cm au point E20 durant la campagne de mai 2011, et atteint 4.23 mS/cm en octobre 2011.

Ainsi, on conclure que les fortes minéralisations se manifestent surtout dans le secteur Est et Sud-Est du lac.

La conductivité électrique est minimale en saison des pluies et maximale en période sèche, ce qui pourrait être expliqué par un phénomène de dilution des eaux par l'augmentation de son volume en saison de pluie.

La minéralisation, concentration des solides totaux dissous (Total Dissolved Solids), synonyme de minéralisation, salinité ou charge totale dissoute (Banton et Bangoy, 1999). Elle est plus importante à l'Est et au Sud du lac. Les figures 34, 35, 36 illustrent les variations des sels dissous (TDS, ou concentration totale de sels dissous) des trois campagnes.

Dans les zones de minéralisation élevée, les concentrations de sodium, de chlorures et des bicarbonates sont aussi importantes.

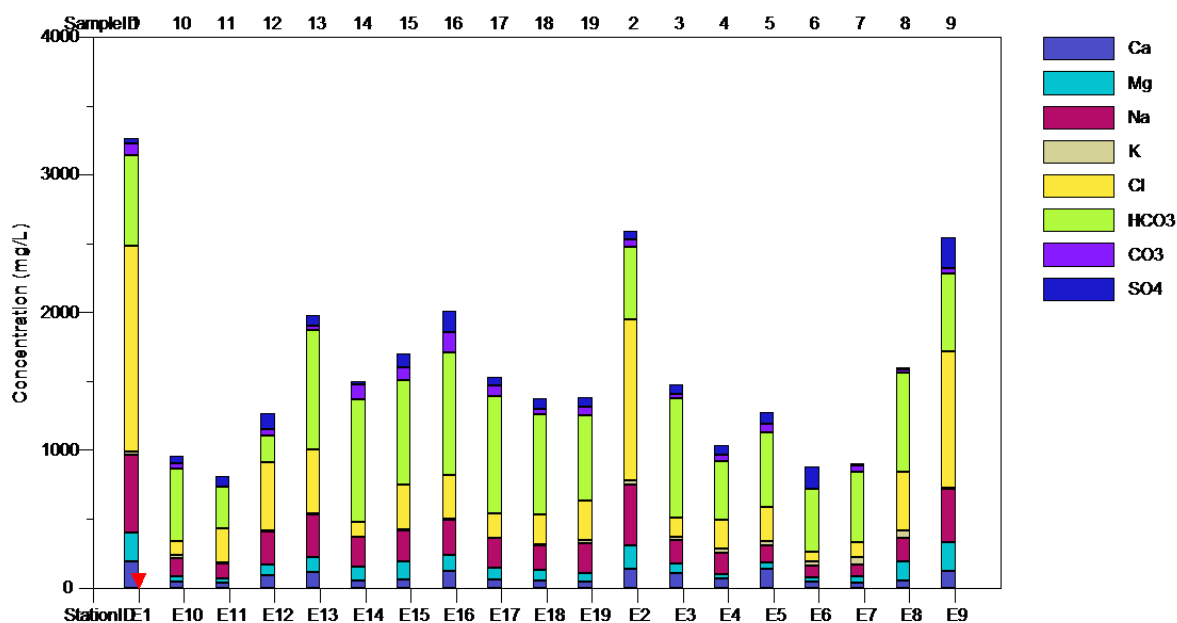


Figure 34. Minéralisation totale des eaux prélevées en janvier 2011

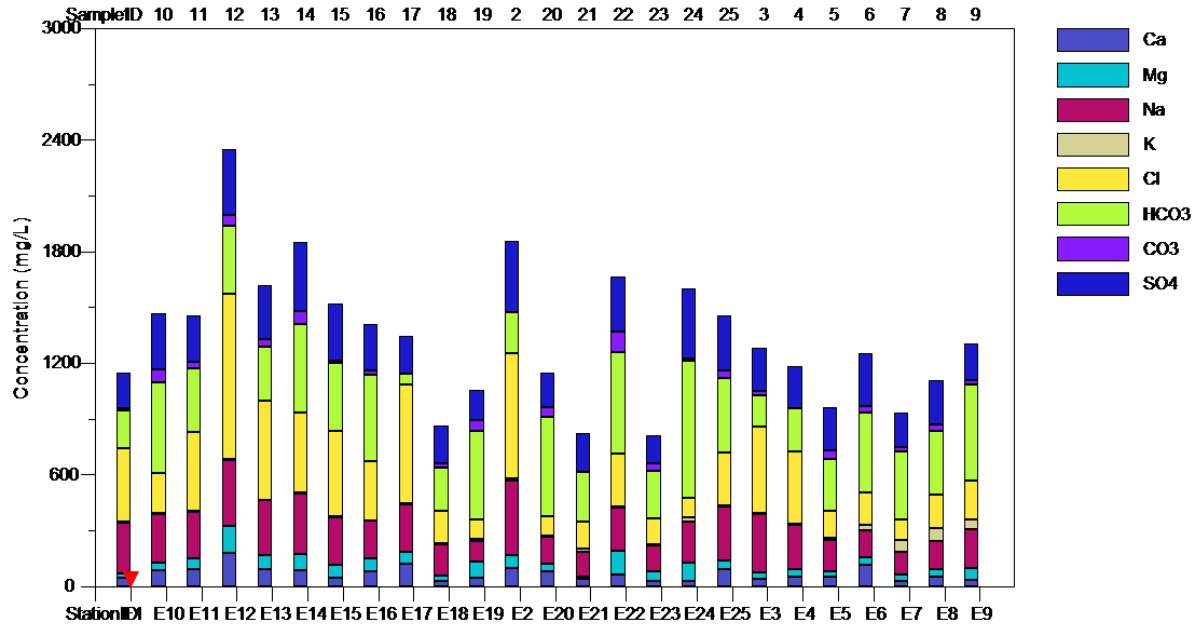


Figure 35. Minéralisation totale des eaux prélevées en mai 2011

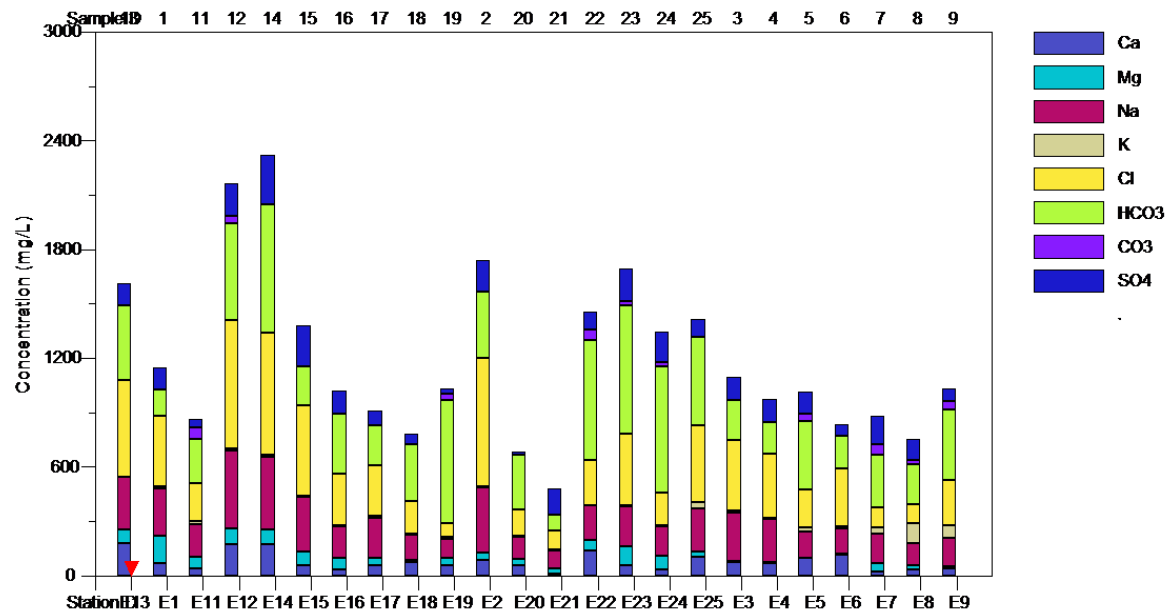


Figure 36. Minéralisation totale des eaux prélevées en octobre 2011.

## 2. Diagrammes interprétatifs

### 2.1. Diagramme de Piper

Afin de mieux comprendre le chimisme des eaux souterraines et superficielles du bassin versant du lac Fetzara, nous avons fait appel à différentes représentations graphiques.

Le diagramme de Piper (1944) est une composante graphique qui permet de visualiser, quantitativement et qualitativement, la composition chimique des eaux. Le procédé consiste à porter les concentrations sur deux triangles (anions et cations) puis à projeter les points représentatifs des échantillons dans un diagramme sous forme de losange qui donne les compositions totales en éléments majeurs et les faciès chimiques des eaux.

Des diagrammes de Piper ont été réalisés pour chacune des trois campagnes afin de déterminer le faciès géochimiques des eaux. En comparant les trois diagrammes de Piper, on s'aperçoit que le faciès géochimique des eaux est bien conservé entre les trois campagnes de prélèvements. La représentation des concentrations en éléments majeurs sur le diagramme de Piper, montre que les eaux échantillonnées sont généralement du type chloruré-sodique à bicarbonaté-sodique.

Le faciès chloruré-sodique, fréquent dans les milieux riches en évaporites (exemple: halite [NaCl]) et le faciès bicarbonaté-sodique se trouvent dans certains aquifères des bassins sédimentaires et témoignent d'interaction eau-roche (échange  $\text{Ca}^{++}$  contre  $\text{Na}^+$  sur des argiles) (Bourhane, 2010).

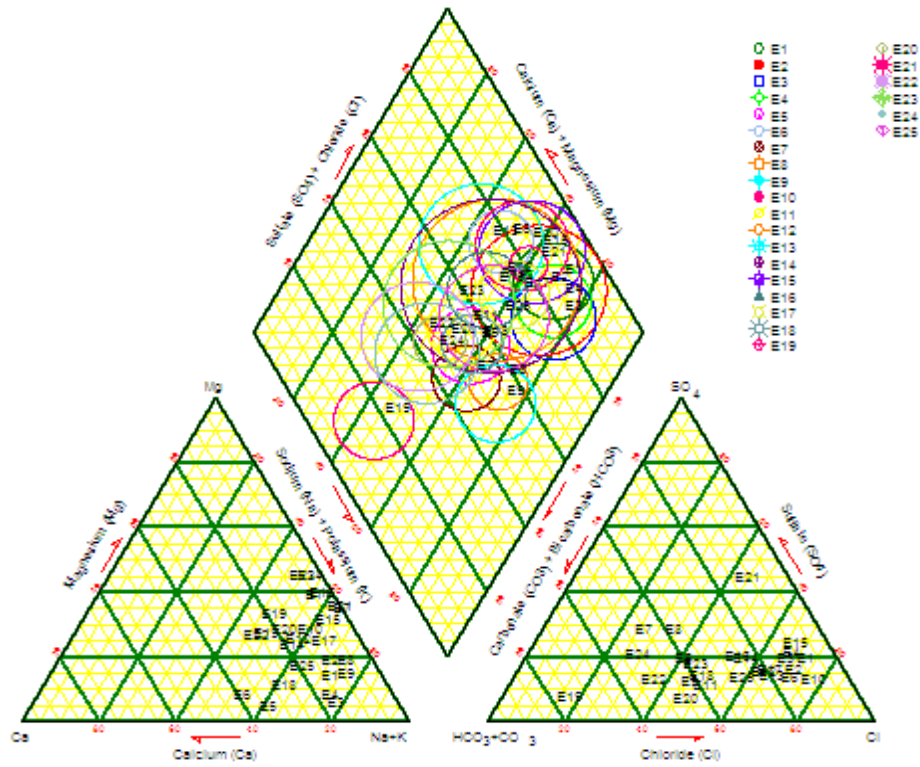


Figure 37. Diagramme de Piper des eaux prélevées en janvier 2011.

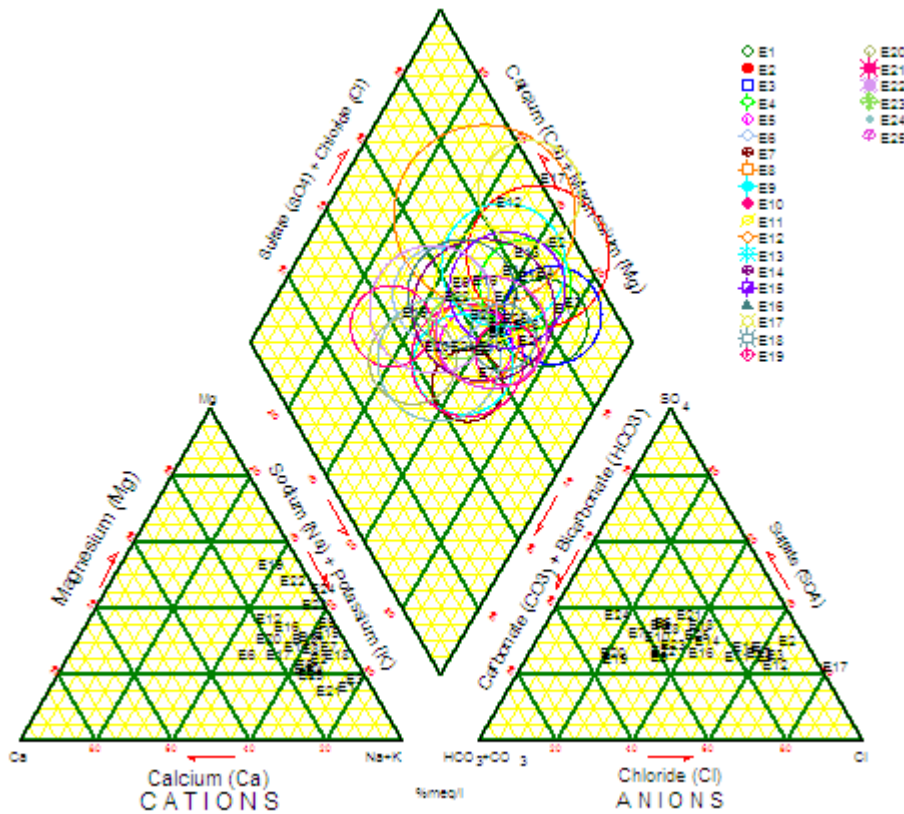
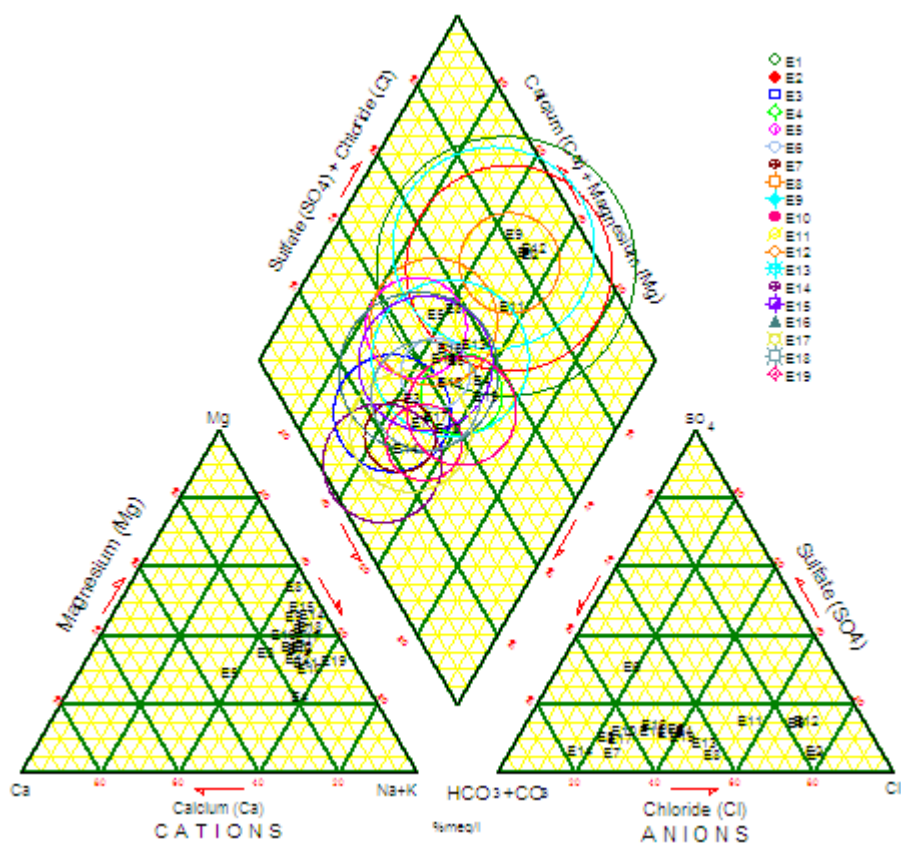


Figure 38. Diagramme de Piper des eaux prélevées en mai 2011.



**Figure 39.** Diagramme de Piper des eaux prélevées en octobre 2011.

## 2.2. Diagramme de Durov

Le diagramme de Durov (1948), construit sur la base des teneurs relatives (en meq/l) des ions majeurs en solution permet de visualiser la distribution des compositions des échantillons. Ce graphique permet de distinguer facilement les échantillons de  $(\text{Na}^+ - \text{Ca}^{++}) - \text{HCO}_3^-$  de ceux de type  $(\text{Na}^+ - \text{Ca}^{++}) - \text{Cl}^-$ , respectivement nommés le type bicarbonaté et chloruré (Gasscoyne et Kamineni, 1994; Toth, 1999).

Le pourcentage des cations majeurs ( $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Na}^{++}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Mg}^{++}$ ) et des anions majeurs ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{CO}_3^{--}$ ) sont tracés respectivement sur deux triangles distincts, puis projetés sur une grille carrée unique à la base de chaque triangle et la minéralisation de chaque échantillon.

Des diagrammes de Durov ont été réalisés pour chacune des trois campagnes afin de déterminer le faciès géochimique des eaux. En comparant les trois diagrammes de Durov, on s'aperçoit que le faciès géochimique des eaux est bien conservé entre les trois campagnes. Les eaux du bassin versant du lac Fetzara ont deux faciès chimiques: chloruré-sodique ( $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ ) et bicarbonaté-sodique ( $\text{HCO}_3^- - \text{Na}^+$ ).

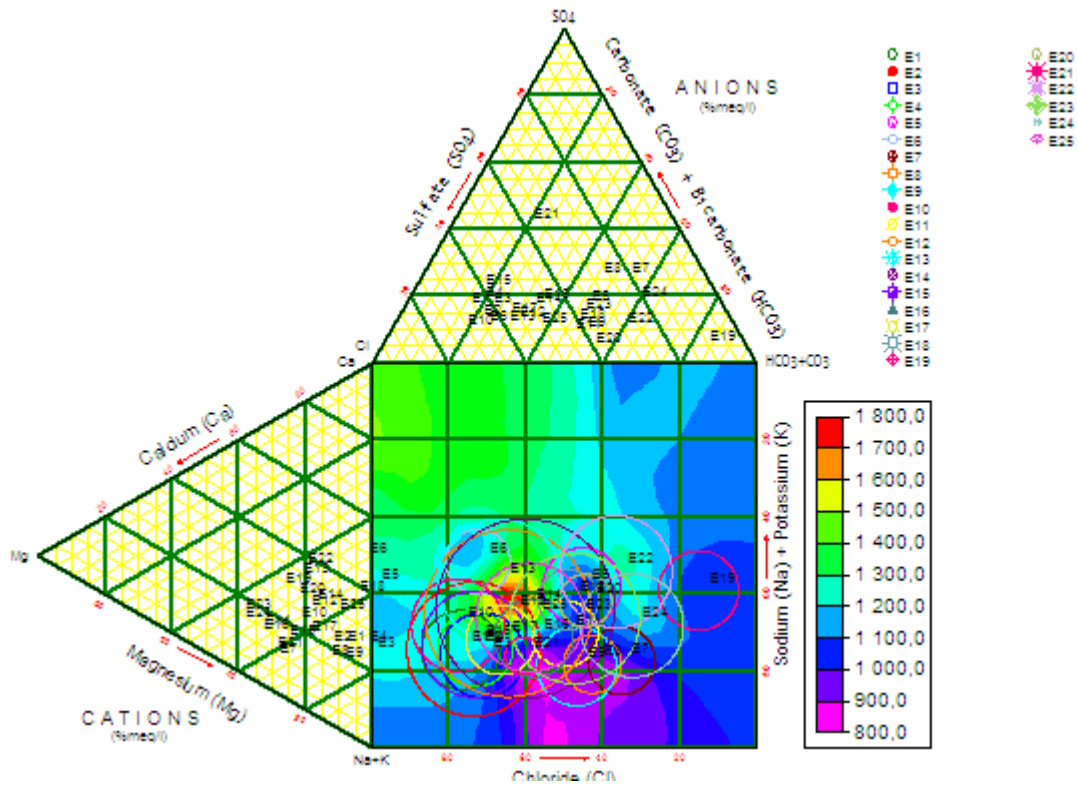


Figure 40. Diagramme de Durov des eaux prélevées en janvier 2011.

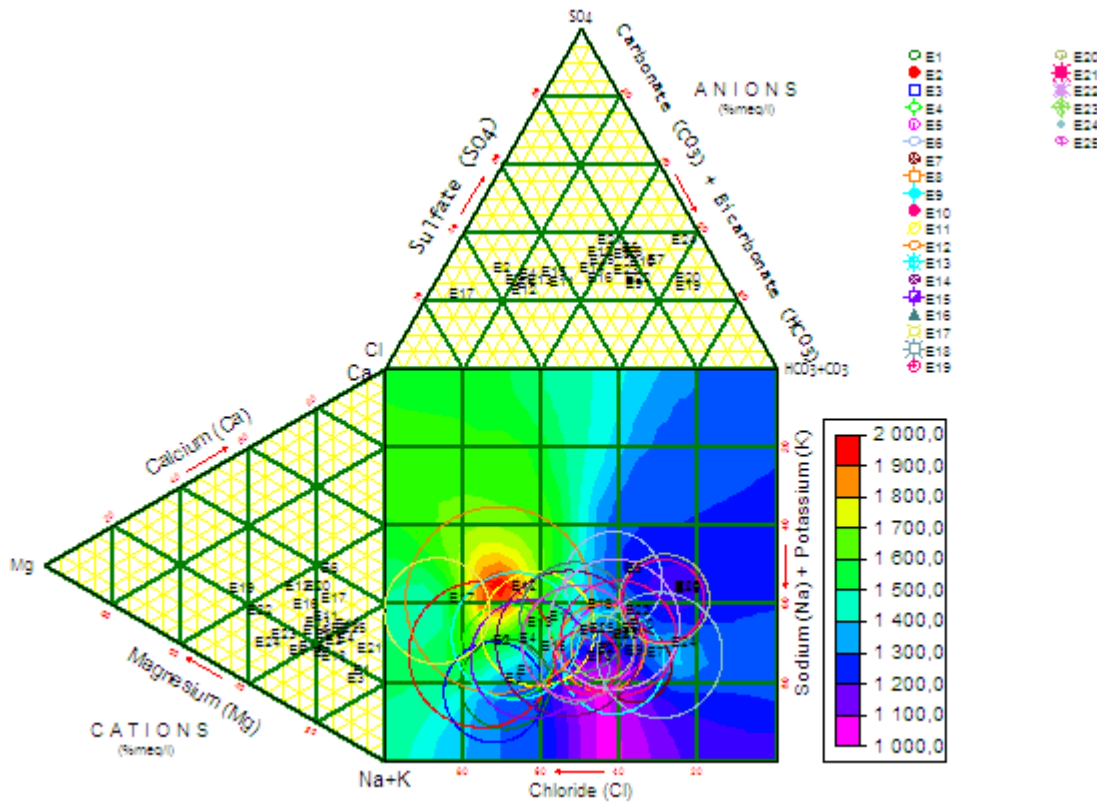


Figure 41. Diagramme de Durov des eaux prélevées en mai 2011.

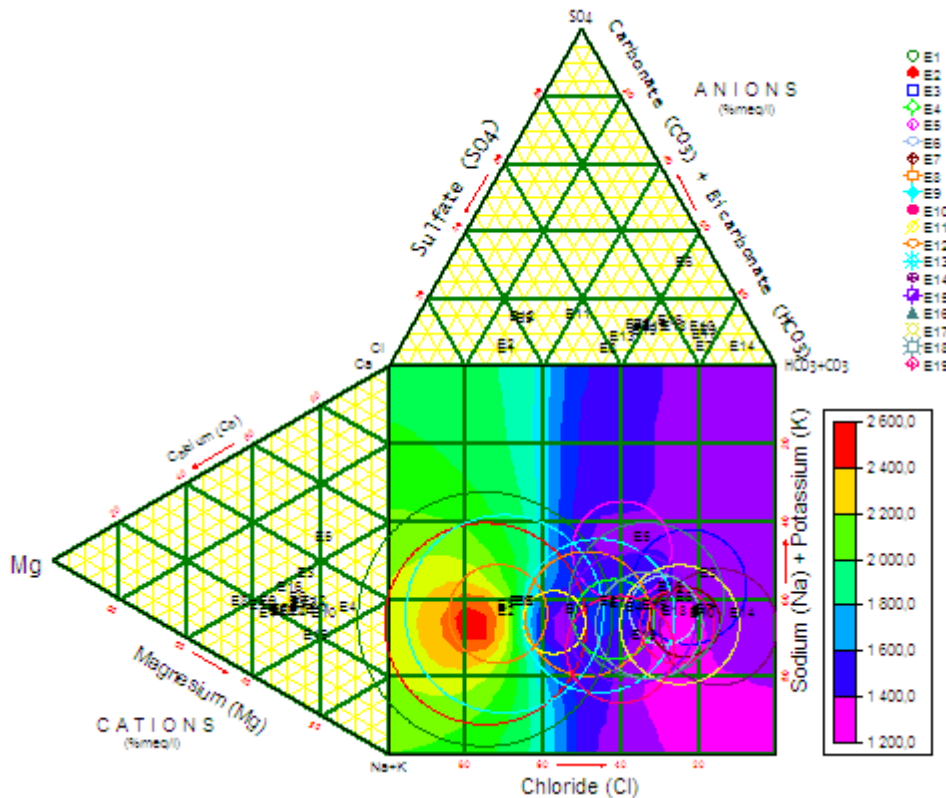


Figure 42. Diagramme de Durov des eaux prélevées en octobre 2011.

### 3. Indice de saturation (IS)

Dans le but d'expliquer les mécanismes d'acquisition de la minéralisation, nous avons utilisé le logiciel « Diagramme » pour déterminer les indices de saturation de quelques minéraux spécifiques. Les trois campagnes de l'année 2011 ont fait l'objet de cette application.

Les indices de saturation sont utilisés pour évaluer le degré d'équilibre entre l'eau et le minéral afin de mettre en évidence les différents stades de l'évolution géochimique des eaux qui se traduisent par une variation de ces indices.

La connaissance des saturations des eaux vis-à-vis de certains minéraux permet de dire sous quelles formes chimiques certains éléments sont transportés dans les solutions.

L'utilisation de ces indices (précipitation/dissolution) est utile pour déterminer l'environnement géologique dans lequel percolent des eaux. Les IS sont définies par (Chapelle, 1993):

$$IS = \log\left(\frac{PAI}{KI}\right)$$

Avec:

PAI: Produit d'Activité Ionique.

KI: Produit de solubilité de l'espèce minérale considérée.

Le degré de saturation, de sous-saturation ou l'état d'équilibre d'une solution vis-à-vis d'un minéral n'est apprécié que si l'on peut comparer le produit de solubilité au produit d'activité ionique des ions de référence dans la solution (Droubi, 1976; Droubi et al., 1978).

La valeur  $IS = 0$  indique un état d'équilibre entre l'eau et le minéral (saturation). Une valeur négative signifie une sous-saturation et positive la sursaturation. Quand une solution est sous-saturée à l'égard d'un minéral, cela signifie que le minéral a tendance à la dissolution (Ait Brahim, 2012).

Durant la première campagne (janvier 2011) et la deuxième campagne (mai 2011) tous les échantillons présentent une sous-saturation vis-à-vis de la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), aragonite ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomite  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , gypse ( $\text{CaCO}_3, 2\text{H}_2\text{O}$ ), et une légère sous-saturation vis-à-vis de l'halite ( $\text{NaCl}$ ) et par conséquent, une éventuelle dissolution de ces minéraux peut contribuer à l'acquisition de la charge saline des eaux. La dissolution de l'halite est confirmée à travers la relation proportionnelle entre les ions chlorures et sodium.

Les résultats ainsi obtenus pendant la troisième campagne (octobre 2011) indiquent, une sous-saturation par rapport au gypse à l'halite et à l'anhydrite et une sursaturation par rapport à la dolomite, à l'aragonite et à la calcite et par conséquent une éventuelle précipitation de ces minéraux.

La dissolution de l'halite a pour conséquence l'augmentation de la concentration des ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  et la dissolution du gypse a pour conséquence une élévation des concentrations des ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{SO}_4^{--}$ .

Il ressort de cette analyse que la plupart des eaux dans la zone d'étude, sont sous-saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques (halite, gypse et anhydrite) en toutes saisons et sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés (calcite, aragonite et dolomite) en saison sèche et sous-saturées après la saison pluvieuse.

Cette saturation est accentuée par la concentration et le processus d'évaporation durant la saison sèche. Il faut également signaler que durant cette période, l'eau est soumise à une



forte insolation et les solutions se concentrent par évaporation. Lorsque les produits de solubilités des ions carbonatés et alcalino-terreux sont atteints; ces ions précipitent les premiers. Ces phénomènes seraient pour la plupart responsables de la diminution des concentrations en ions alcalino-terreux observées durant la saison sèche.

Ainsi, après la saison pluvieuse, les indices de saturation deviennent négatifs; ils sont très probablement dus aux mélanges entre les eaux de recharge (pluie, eaux d'engorgement et d'infiltration) sous-saturées et les eaux du lac à l'équilibre ou légèrement sursaturées.

Les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation, même avec des ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$  à fortes concentrations dans l'eau. La constante d'équilibre des minéraux évaporitiques [ $\text{NaCl}$  (1.58);  $\text{CaSO}_4$  (-4.85)], d'où une tendance à la dissolution de ces minéraux. Ce qui permet aux éléments évaporitiques de se présenter dans l'eau à des concentrations élevées. Par contre pour les minéraux carbonatés, la constante d'équilibre est plus faible [dolomite (-17.09), calcite (-8.48)], ce qui produit une précipitation rapide des éléments chimiques.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seuls les minéraux carbonatés tendent à précipiter, surtout sous la forme de dolomite, de calcite et aragonite. Alors que les minéraux évaporitiques, en l'occurrence, l'halite, le gypse et l'anhydrite, tendent à la dissolution.

En définitive, les processus de concentration par évaporation, de dissolution/précipitation des minérales calcites et évaporitiques et de dilution après la saison pluvieuse, sont responsables des variations saisonnières de la chimie des eaux.

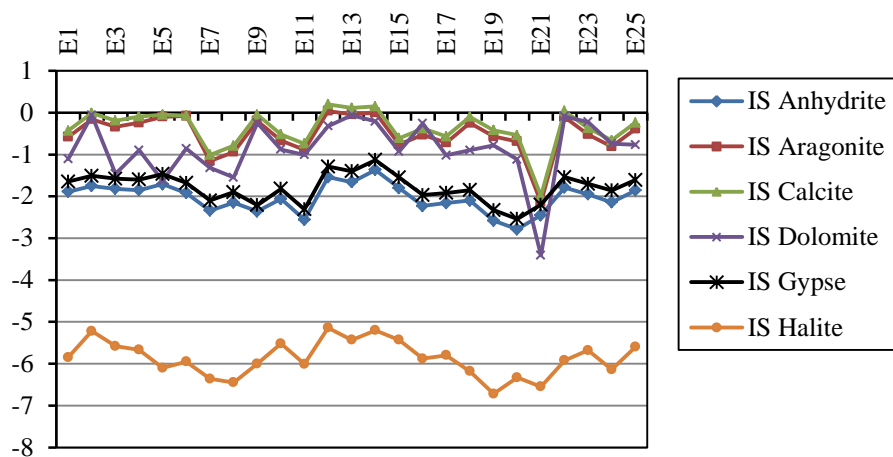


Figure 43. Indice de saturation (IS) (campagne janvier 2011).

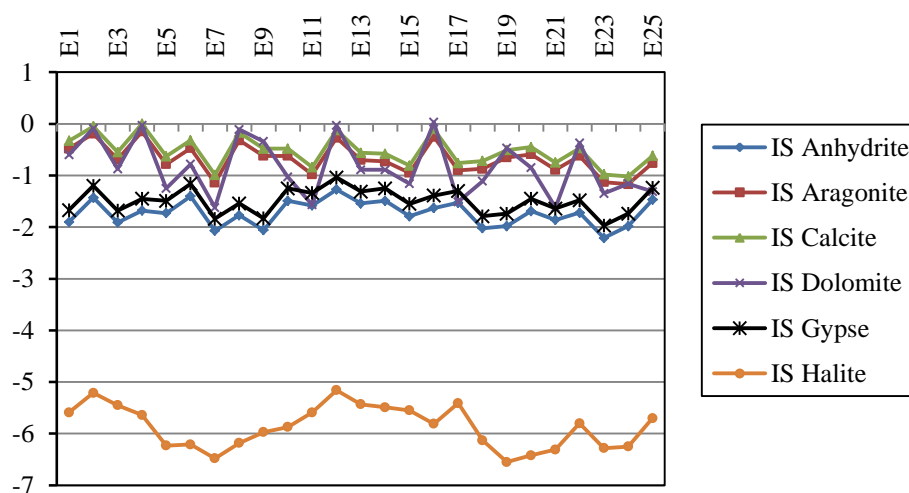


Figure 44. Indice de saturation (IS) (campagne mai 2011)

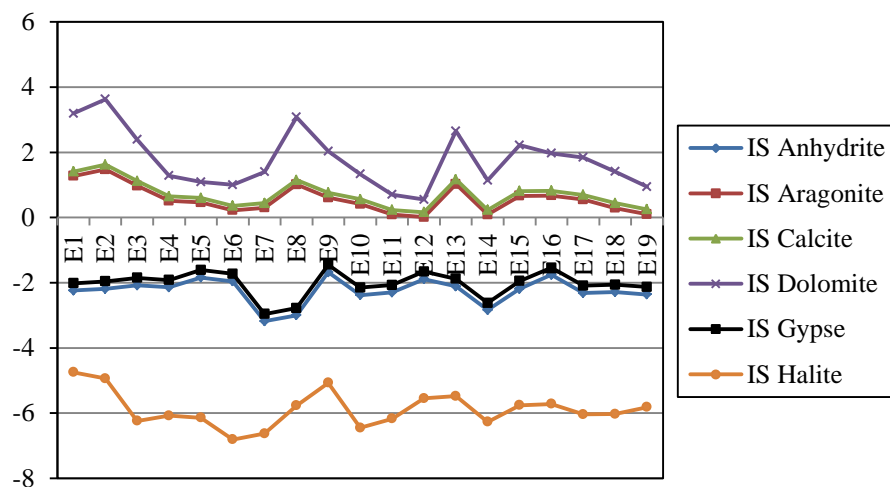


Figure 45. Indice de saturation (IS) (campagne octobre 2011).

## 4. Relations ions-chlorures

### 4.1. Relation $\text{Na}^+$ - $\text{Cl}^-$

Ces deux éléments chimiques dans les eaux naturelles sont souvent liés à la dissolution de l'halite ( $\text{NaCl}$ ) (Maouni, 2007). L'évolution de  $\text{Na}^+$  est étudiée en fonction des teneurs en chlorure, car ce dernier est considéré comme un traceur stable et conservatif des évaporites, très soluble, entrant rarement dans les précipitations salines, n'intervenant pas dans les phénomènes d'oxydo-réduction et peu influencé par l'intervention des bactéries (Debièche, 2002).

Le sodium et les chlorures présentent un coefficient de corrélation élevé et l'alignement des points suivant la droite de corrélation montre que le  $\text{Na}^+$  est majoritairement lié aux  $\text{Cl}^-$ . Ceci implique la même origine des deux éléments chimiques qui est la dissolution de l'halite. Cette relation se confirme par l'existence du faciès chloruré-sodique.

En analysant la relation entre  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$ , il apparaît que certains points d'eau se trouvent sur la droite 1 indiquant un simple processus de dissolution de l'halite sans réaction d'échanges ioniques. Par contre, les points d'eau qui se situent au-dessous de la droite de la dissolution de l'halite indiquent un appauvrissement en sodium, ces eaux sont contrôlées surtout par des réactions d'échange cationique. Etant donné que la teneur en sodium devrait équilibrer la teneur en chlorures, le déficit en  $\text{Na}^+$  est expliqué par le phénomène d'échange ionique traduit par une adsorption de  $\text{Na}^+$  et une libération de  $\text{Ca}^{++}$ .

On observe un excès des teneurs en sodium par rapport à la pente 1, cela s'explique par l'existence d'une autre origine pour les ions sodiques qui a fait accroître la concentration du sodium par rapport à celle des chlorures. Cet apport supplémentaire pourrait provenir de l'altération des silicates sodiques. Mais, vu que cet excès en  $\text{Na}^+$  est accompagné par un déficit en  $\text{Ca}^{++}$  par rapport à  $\text{HCO}_3^-$  et  $\text{SO}_4^{--}$ , l'augmentation des teneurs en  $\text{Na}^+$  peut s'expliquer par un échange de base lié aux minéraux argileux qui fixent un ion  $\text{Ca}^{++}$  après libération de deux ions  $\text{Na}^+$ .

L'alignement des points suivant la droite de corrélation montre que le  $\text{Na}^+$  est majoritairement lié aux  $\text{Cl}^-$ . Ceci implique la même origine des deux éléments chimiques. Quelques points présentent un excès de sodium, d'autres un excès des chlorures.

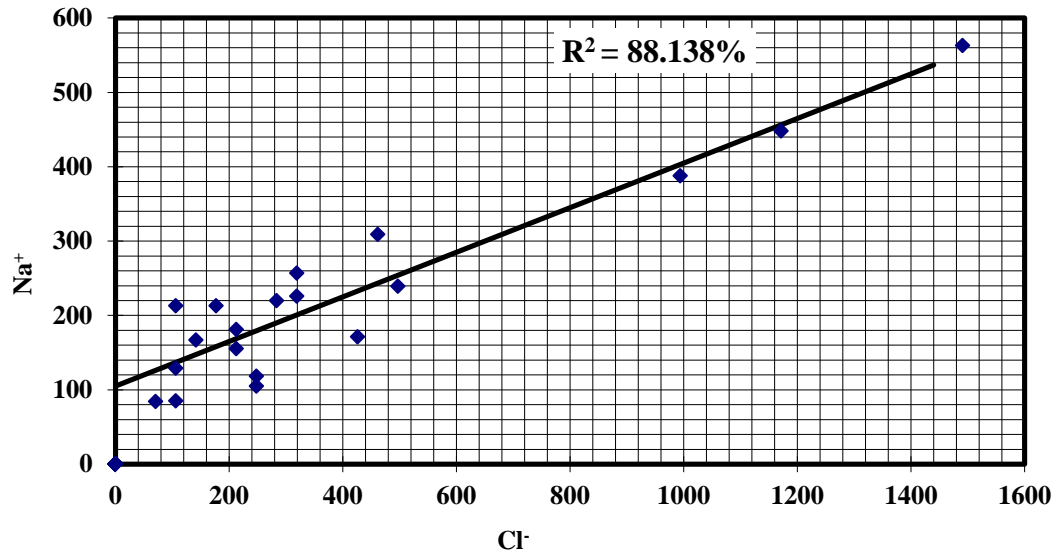


Figure 46. Relation sodium-chlorures (campagne janvier 2011).

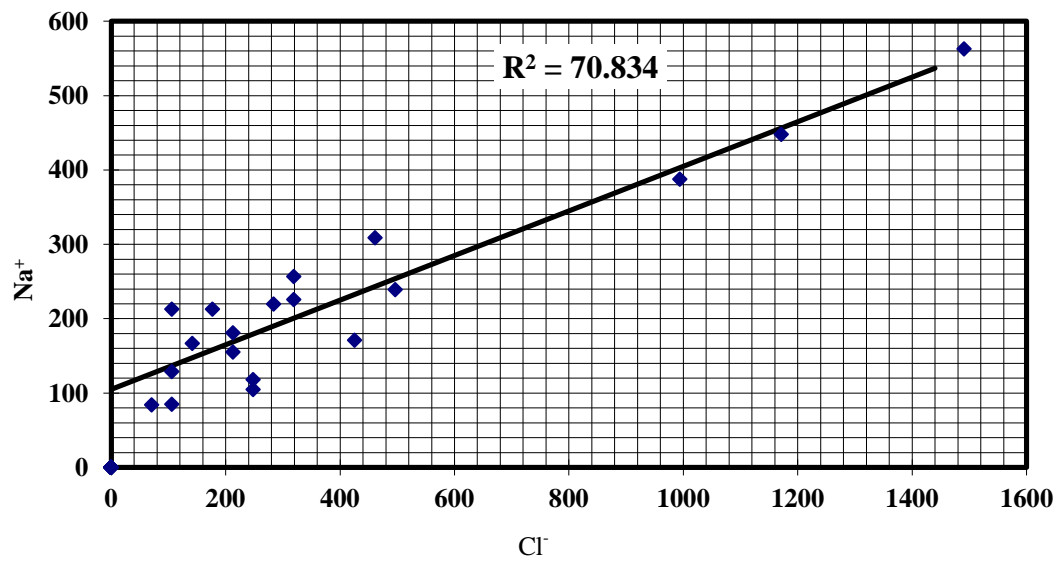


Figure 47. Relation sodium-chlorures (campagne mai 2011).

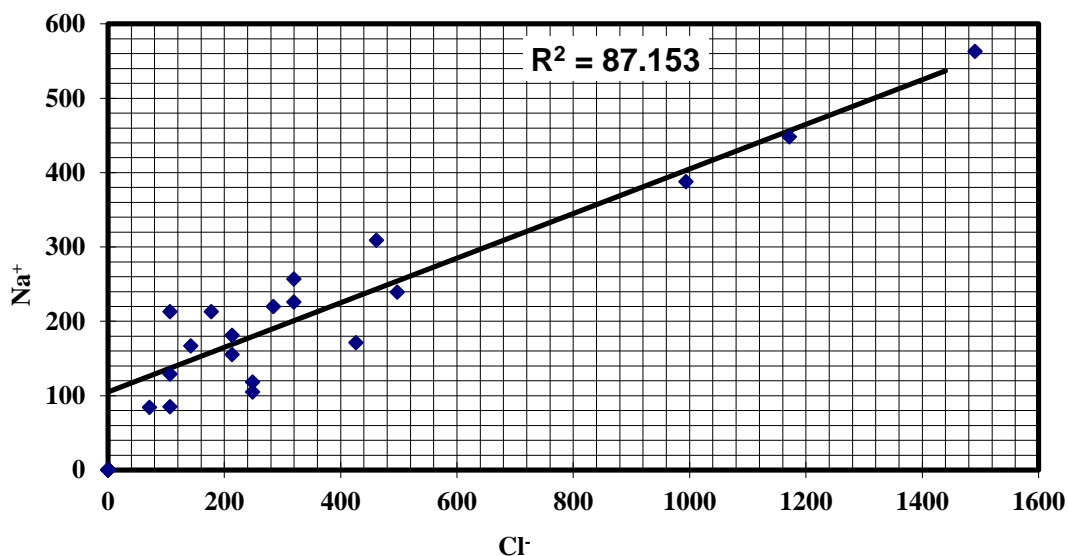


Figure 48. Relation sodium-chlorures (campagne octobre 2011).

Tableau 18. Rapport  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  des eaux du lac Fetzara (résultats en meq/l).

E= Echantillon	$\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ (janvier 2011)	$\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ (mai 2011)	$\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ (octobre 2011)
E1	1.043	1.071	0.978
E2	0.972	0.918	Point sec
E3	1.063	1.057	Point sec
E4	1.017	0.957	0.982
E5	1.051	1.772	1.176
E6	0.962	1.235	0.928
E7	2.319	1.768	0.975
E8	1.892	1.313	1.183
E9	0.950	1.482	0.998
E10	0.964	1.870	0.901
E11	1.283	0.913	Point sec
E12	0.937	0.914	Point sec
E13	0.899	0.898	Point sec
E14	0.918	1.181	0.990
E15	0.929	0.956	1.211
E16	0.967	0.976	0.923
E17	1.190	0.918	0.981
E18	1.209	1.435	0.970
E19	2.239	1.536	2.000
E20	1.337	2.058	0.907
E21	1.377	1.489	Point sec
E22	1.205	1.272	0.904
E23	0.970	1.544	1.200
E24	1.417	3.203	0.950
E25	0.917	1.071	0.975

#### 4.2. Relation Br<sup>-</sup>-Cl<sup>-</sup>

Le brome et le chlore sont des traceurs conservatifs dans les environnements aqueux naturels : ils ne participent pas aux réactions d'oxydo-réduction et ils ne forment pas de précipités insolubles (Fetter, 1993).

L'hydrogéochimie des bromures a été utilisée sur les eaux salées et les saumures qui s'enrichissent en brome pendant la précipitation de l'halite (Poutoukis 1991; Collins, 1975). L'appauvrissement ou l'enrichissement en bromures est alors utilisé comme indicateur d'une contribution des évaporites pauvres en brome (Rittenhouse, 1967; Rittenhouse et al., 1969).

Quand les deux ions proviennent exclusivement de l'intrusion de l'eau de mer, le rapport des concentrations molaires Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> reste similaire à celui de l'eau de mer: 1.5 à 1.7‰ (Morell et al., 1986).

Certains travaux (Richter et Kreiter, 1993; Edmunds, 1996; Andreasen et Fleck, 1997; Fisher et Mullican, 1997) montrent que l'eau de pluie présente un rapport Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> similaire ou même élevé par rapport à celui de l'eau de mer, cette dernière et l'eau de pluie côtière ont un rapport semblable autour 0.0015 dans des pays méditerranéens (Jones et al., 1999; Vengosh et al., 1999).

Pour des eaux à salinité élevée, un rapport Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> faible (inférieur à celui de l'eau de mer) met en évidence une source de salinité riche en chlorures et pauvre en bromures (évaporites, fertilisants agricoles, eaux usées, etc...).

Une contribution de dissolution évaporite mène à un rapport molaire Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> bas (Cartwright et al., 2006; Ghabayen et al., 2006), tandis que les sources d'anthropogénique donnent un rapport molaire autour de 0.0005 pour des suintements d'eaux usées ou autour de 0.02 pour des flux de retour d'agriculture (Andreasen et Fleck, 1997; Vengosh et al., 1999; Ghabayen et al., 2006).

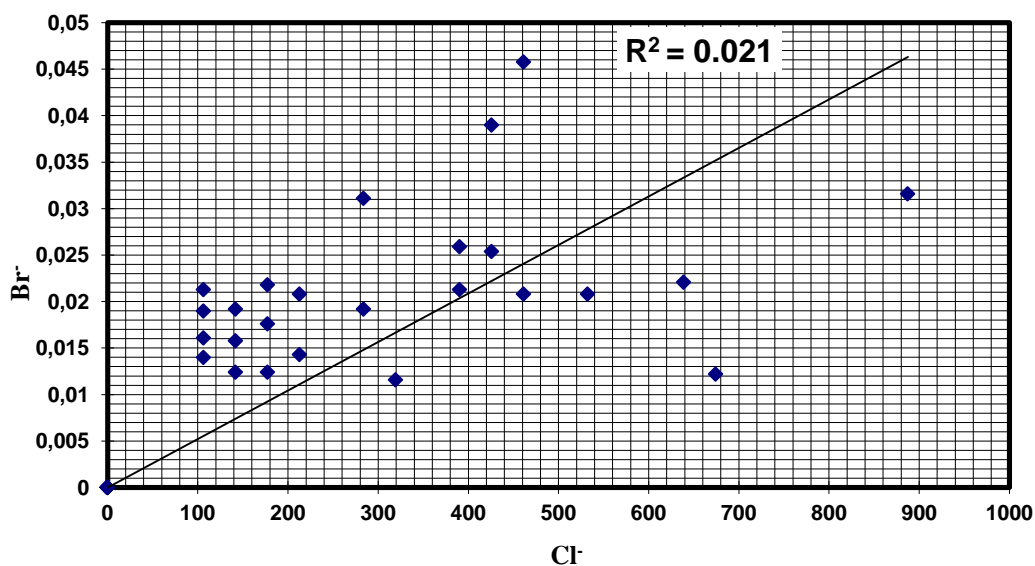
Les eaux analysées présentent des teneurs en bromures très faibles par rapport à l'eau de mer. Les concentrations en Br<sup>-</sup> varient entre 0.012 et 0.097 mg/l pour la première campagne et entre 0.015 et 0.088 mg/l pour la deuxième campagne et comprises entre 0.012 et 0.094 mg/l pour la troisième campagne.

La représentation de la relation entre chlorures et bromures pour les échantillons d'eau prélevée dans les différents secteurs de la région d'étude (variation des bromures en fonction des chlorures) montrent une dispersion des points, indiquant que les deux éléments chimiques ont des origines différentes.

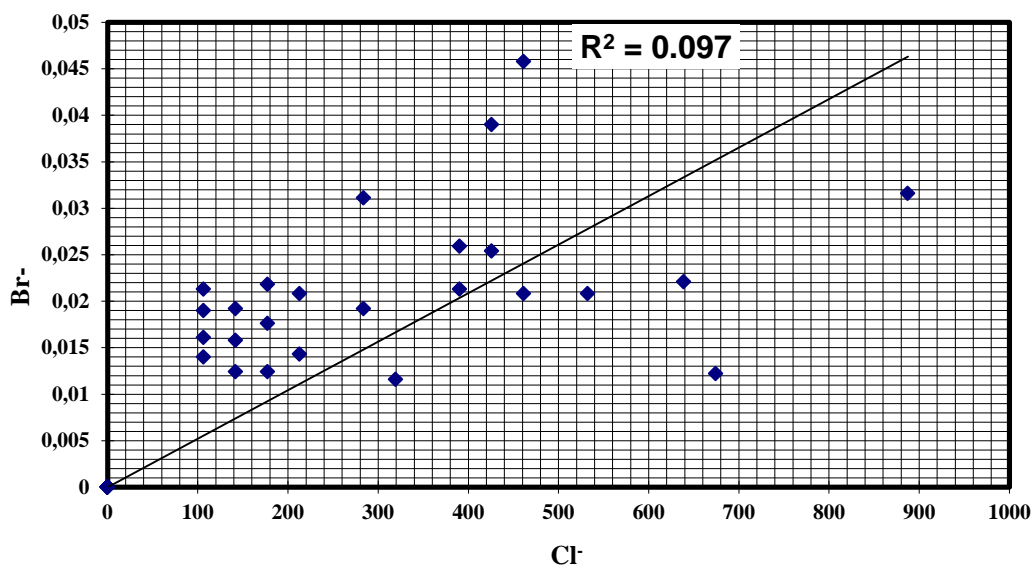
L'ensemble des eaux qui ont été analysées présentent un rapport  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$  variable et de distribution aléatoire. Aucune relation n'est mise en évidence entre les valeurs des bromures et des chlorures.

Les rapports molaires  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$  dans les eaux du lac Fetzara sont tous inférieurs à celui de l'eau de mer, indiquant un excès des chlorures, ce qui met en évidence une source des chlorures autre que la mer (forte évaporation, dissolutions des évaporites).

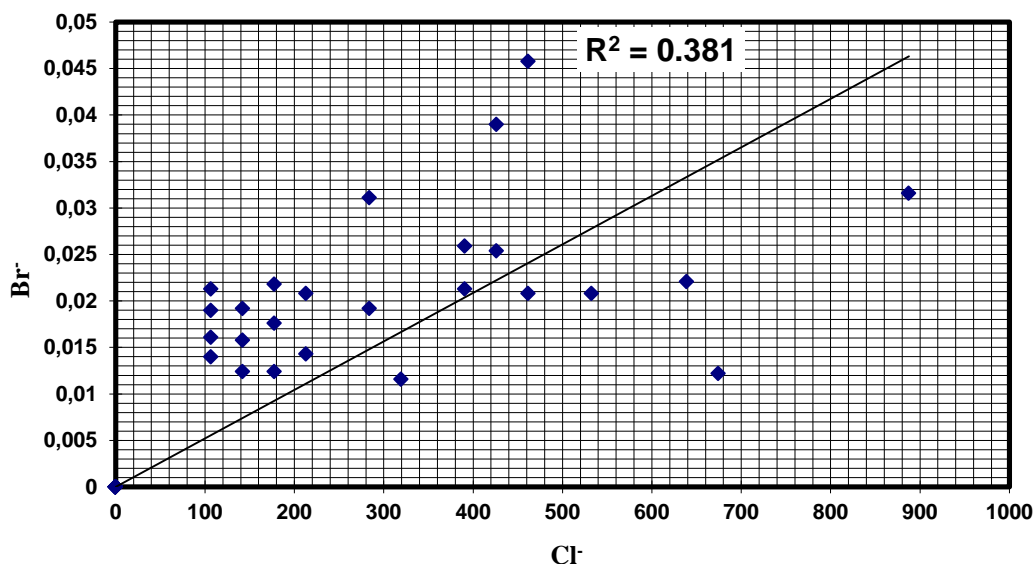
Un faible rapport  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$  inférieur par rapport à celui de l'eau de mer suggère une présence de dissolution des sels chlorurés, l'halite par exemple, qui est le seul sel chloruré à posséder un rapport  $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$  plus faible que celui de l'eau de mer.



**Figure 49.** Relation chlorures-Bromures (campagne janvier 2011).



**Figure 50.** Relation chlorures-bromures (campagne mai 2011).



**Figure 51.** Relation chlorures-bromures (campagne octobre 2011).

## 6. Aptitude des eaux à l'irrigation

L'évaluation de la qualité des eaux utilisées pour l'irrigation à l'échelle proposée par Durand, (1950) et FAO (1971) pour les sols irrigués en Algérie, montre que la plupart des eaux sont très salées. Pour que cette eau soit utilisable, il faut que le taux de  $\text{Na}^+$  soit inférieur à 60%. Cette valeur représente le seuil maximum admissible pour l'usage agricole (Benziane et al., 2012).

Les eaux souterraines du bassin versant du lac Fetzara représentent l'une des principales ressources pour l'irrigation des terres agricoles à la périphérie du lac.



Dans la zone située à l'Est du lac Fetzara, les terres cultivées alternent principalement entre la céréaliculture en sec et la tomate industrielle. Au Nord du lac Fetzara, zone généralement inondée pendant l'hiver, les terres sont laissées comme pâturage, toutefois dans certaines parcelles on y cultive du maraîchage à cycle court.

Au Sud et à l'Ouest du lac, les terres sont cultivées en céréales ou fourrages; alors qu'autour des quelques points d'eau (puits et retenues), ce sont la tomate industrielle et la pastèque qui sont cultivées; il est difficile de prévoir une culture en saison sèche et d'améliorer la productivité en l'absence d'irrigation.

L'eau destinée à l'irrigation doit présenter des caractéristiques physico-chimiques tolérables par les plantes.

Une grande quantité d'ions sodium dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration (Chen et Banin, 1975; Ayers et Westcot, 1976; Frenkel et al., 1978; Hardy et al., 1983; Miller et Donahue, 1995; Hanson et al., 1999; Falstad, 2000; Bauder et Brock, 2001). Ceci est dû au fait que le sodium présent dans le sol en forme échangeable remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les argiles de sol et provoque la dispersion des particules dans le sol, c'est-à-dire si le calcium et le magnésium sont les cations prédominants adsorbés sur le complexe d'échange du sol, ce dernier tend à être facilement cultivé et avec une structure perméable et granulaire. Cette dispersion a comme conséquence l'altération des agrégats des sols. Le sol devient alors dur et compact (lorsqu'il est sec) réduisant les vitesses d'infiltration de l'eau et d'air, affectant ainsi sa structure. Ce problème est également relié avec plusieurs facteurs tels que le taux de salinité et le type de sol. Par exemple, les sols sableux ne subiront pas de dommage si facilement en comparaison aux sols lourds quand ils sont irrigués avec une eau à SAR élevé. L'index utilisé est le rapport de sodium adsorbé (SAR) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et magnésium.

Dans le but d'étudier la qualité des eaux pour l'irrigation, nous avons fait recours à la méthode de Richards (1954). Il met en évidence différentes classes d'eaux définies sur la base du taux de sodium adsorbé (S.A.R) et sur la concentration en sels solubles de l'eau représentée par la conductivité électrique (en  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ou  $\text{mS}/\text{cm}$  à  $25^\circ\text{C}$ ). Le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR qui est défini par la relation:

$$\text{Sodium Adsorption Ratio, SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}} \quad (\text{Résultats en meq/l})$$

La méthode la plus utilisée pour qualifier les eaux d'irrigation est une représentation graphique de la conductivité électrique en fonction du SAR.

Après avoir reporté tous les points d'eau des différentes campagnes sur le diagramme de Richards (figures: 52, 53, 54), selon la conductivité électrique et la valeur du SAR, on a pu dégager la présence des six classes d'eaux qui sont les suivantes:

- **C2S1:** Elle caractérise une eau bonne pour l'irrigation et pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour les plantes moyennement tolérantes aux sels. Cette classe représente les eaux de faible minéralisation que l'on rencontre au Nord du lac. Cette classe n'existe que dans la première campagne (année 2011) et avec un faible pourcentage.
- **C3S1, C3S2:** En général, eaux convenant à l'irrigation de cultures tolérantes aux sels sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. La majorité des puits appartenant à la classe C3S1 se situent au Sud du lac.
- **C4S1, C4S2:** Représentent des eaux médiocres fortement minéralisées, susceptibles de convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés. Les eaux des deux premières campagnes présentent, en générale, les mêmes classes.
- **C4S3:** Eau de qualité mauvaise, ne convient généralement pas à l'irrigation, mais peut être utilisée sous certaines conditions pour des sols très perméables avec un bon lessivage et aux plantes très tolérantes aux sels (choux, betterave...).

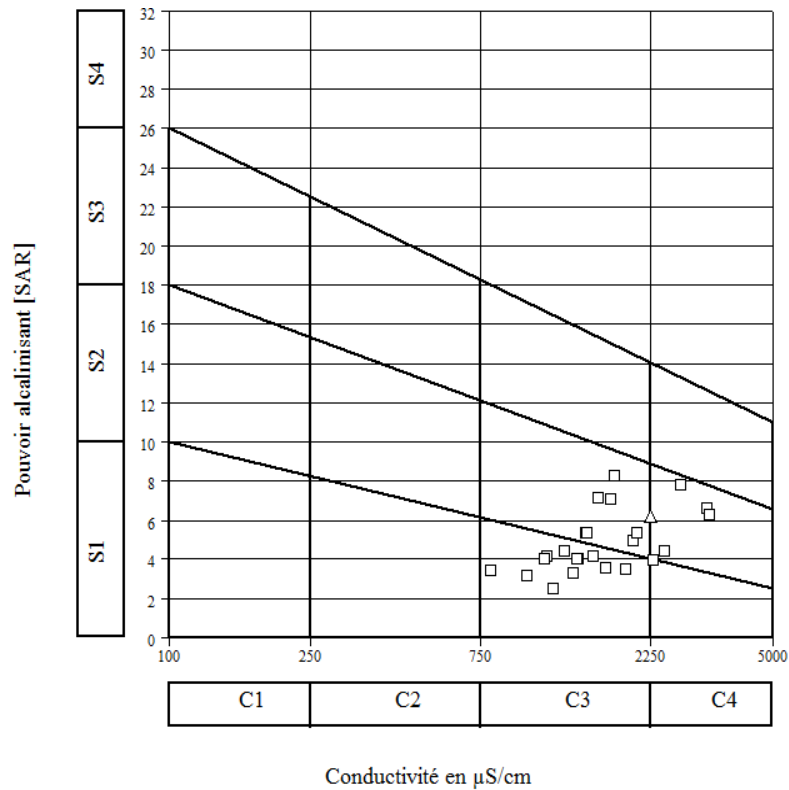
L'utilisation de ces eaux pour l'irrigation sur de longues périodes peut avoir des conséquences négatives non seulement sur les sols et leur productivité, mais aussi sur la qualité de l'eau de la nappe suite au recyclage des sels accumulés dans les sols sous l'effet de forte évaporation par les eaux d'irrigation et par les eaux pluviales s'infiltrant pendant les grands évènements pluvieux.

On remarque pour la première campagne que l'ensemble des points d'eau se situe dans les trois dernières classes dont le risque de salinisation est moyen à fort.

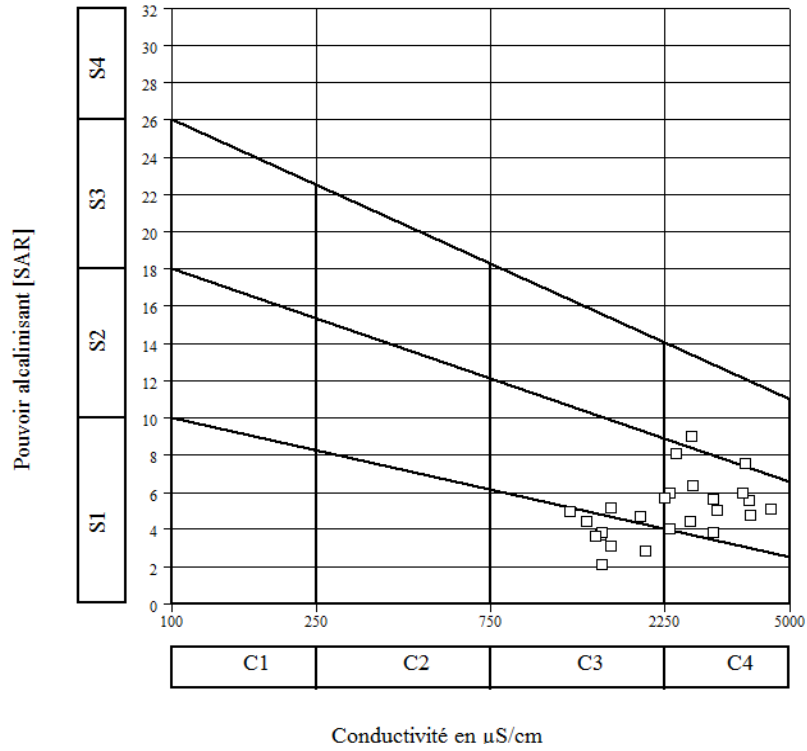
La variation des classes par rapport à la première campagne traduit l'effet de l'évaporation des eaux (augmentation des concentrations).

**Tableau 19.** Evolution des classes d'irrigation selon Richards (1954).

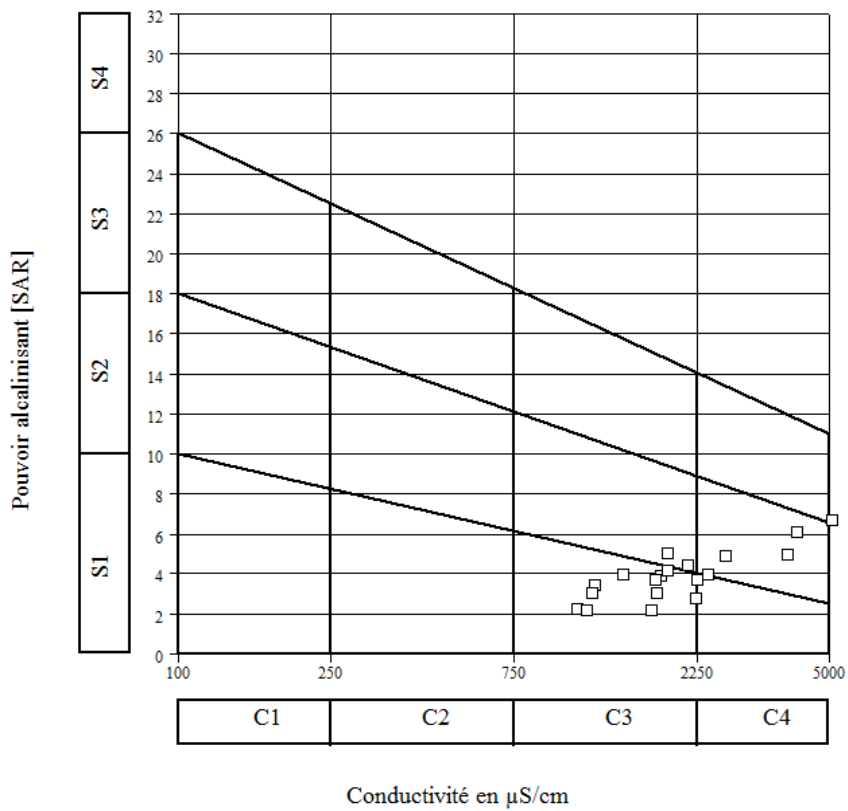
	Janvier 2011	Mai 2011	Octobre 2011	Etat d'utilisation
C2S1	16%	0%	0%	Convenable aux plantes qui ont une tolérance aux sels, cependant son utilisation peut générer des problèmes pour les argiles.
C3S1	80%	24%	68.42%	La salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainés.
C3S2	0%	12%	10.53	
C4S1	4%	0%		Eau fortement minéralisée, utilisée uniquement pour des plantes très résistantes aux sels dont le sol présente une bonne perméabilité.
C4S2	0%	48%	21.05%	
C4S3	0%	8%		Inutilisable.



**Figure 52.** Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme de Richards (1954) (campagne janvier 2011).



**Figure 53.** Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme de Richards (1954) (campagne mai 2011).



**Figure 54.** Classification des eaux d'irrigation d'après le diagramme de Richards (1954) (campagne octobre 2011).

## **Conclusion**

Les caractéristiques hydrochimiques basées sur les ions majeurs ont montré que les variations chimiques des eaux sont influencées par la combinaison de plusieurs processus géochimiques en occurrence:

Les processus de dissolution/précipitation des minéraux carbonatés et évaporitiques.

Les réactions d'échanges de bases.

Les phénomènes de concentration par évaporation et de dilution par mélange avec les eaux de pluie.

## CHAPITRE VII. SYNTHÈSE ET DISCUSSION

Dans les chapitres précédents, les données disponibles ont été décrites et analysées de manière élémentaire. Ce dernier chapitre propose de reprendre ces différents éléments de manière plus intégrée et distanciée, afin de synthétiser ce que les diverses approches géochimiques nous permettent de comprendre sur l'état actuel et l'origine de la salinité des eaux du lac Fetzara.

Le lac s'assèche régulièrement en saison estivale, seules les eaux de l'oued El-Hout continuant à alimenter le site. Le fond du lac est actuellement transformé en pâturage de maigre qualité, sans grand rendement, sauf sur sa périphérie. Durant les saisons pluvieuses, la terre est détrempée pour de longues périodes.

La description des formations géologiques a montré la présence de deux types de formations:

- Les formations métamorphiques présentent essentiellement au niveau du massif de l'Edough et ses environs, constituant ainsi la limite Nord du lac,
- Les formations sédimentaires occupant le reste de la zone d'étude.

Les descriptions lithologiques montrent une matrice généralement composée en grande partie par des sables et des argiles.

Les variations climatiques à courte ou à longue échelle de temps peuvent avoir des impacts non négligeables sur le taux de recharge des nappes souterraines (Edmunds et Gaye, 1994; Scanlon et al., 2006 ; Jyrkama et Sykes, 2007).

Du fait de l'aridité, les eaux de surface ont beaucoup diminué et la recharge des aquifères est actuellement faible. Cependant durant les périodes humides, la couverture végétale est abondante et joue un rôle important dans la reprise évapotranspiratoire et donc une décharge de la nappe dans la zone racinaire (Walvoord et al., 2002). Par contre, si la couverture végétale est réduite (périodes arides) les fortes pluies, même très occasionnelles, peuvent créer des ruissellements en surface qui alimentent les mares temporaires et par conséquent une augmentation de la recharge des nappes souterraines (Favreau et al., 2002).

Le climat de la région du lac Fetzara est de type méditerranéen, il est tempéré et caractérisé par un hiver humide et doux et un été chaud et sec. La température moyenne est de 11°C en hiver et 25°C en été. La pluviométrie se situe entre 600 et 700 mm par an,

dont 80% sont concentrés durant la saison pluvieuse entre les mois d'octobre et mars. L'humidité moyenne mensuelle varie de 70 à 79 %.

Le bilan d'eau établi par la formule de Thornthwaite montre que l'ETP atteint son maximum au mois de juillet (150.9 mm) et son minimum au mois de janvier (22.5 mm).

La reconstitution de la RFU s'effectue au mois de novembre (46 mm) et atteint son maximum (100 mm) à partir du mois de décembre jusqu'au mois d'avril, à partir duquel on assiste à un épuisement du stock.

L'écoulement commence après le remplissage de la RFU (100 mm) c'est-à-dire au mois de décembre et se termine en avril, avec un maximum au mois de Janvier (85.8 mm) et un minimum au mois d'avril (4 mm).

L'excédent égal à (210.5 mm) représentant 30.67 % des précipitations annuelles, alors que l'ETR est de l'ordre de (475.8 mm) représentant 69.32 % des précipitations annuelles.

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

Du point de vue chimique, les concentrations en ions majeurs doivent augmenter dans les mêmes proportions que les concentrations en chlorures lors de l'évaporation.

L'origine des sels dissous dans les eaux est généralement liée aux minéraux contenus dans les roches et des formations traversées. Ainsi, la richesse des eaux en éléments  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{SO}_4^{--}$  est liée à la dissolution des minéraux susceptibles de se former par évaporation des eaux chargées de sels et par dissolution des formations évaporitiques. Par contre, les éléments  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  et  $\text{HCO}_3^-$  sont liés à la dissolution des carbonates.

Les éléments les plus importants des eaux sont les chlorures, les bicarbonates et le sodium. Comme souvent observe dans les eaux naturelles la teneur en chlorures augmente généralement avec le degré de minéralisation. Les ions chlorures sont présents avec des teneurs très variables dans l'eau dans le secteur étudié. La forte contribution de la teneur en chlorures sur la minéralisation des eaux a été mise en évidence à partir de la précédente analyse des données. Il a été montré par la détermination des différents types d'eau, l'existence d'un faciès chloruré sodique pour les eaux marquées par une nette dominance des chlorures. L'origine de ces chlorures pose un problème. Les chlorures, c'est l'élément le plus important en quantité, particulièrement dans l'eau. Les teneurs élevées de cet élément sont dues à sa forte solubilité d'une part, et d'autre part il n'intervient pas dans les phénomènes de précipitation chimiques et ne se fixe pas sur le complexe argilo-

humique (Barbiéro et Valles, 1992). On assiste à une concentration pendant la période de basses eaux et une dilution pendant la période des hautes eaux.

La forte corrélation entre les conductivités électriques des eaux et les ions chlorures suppose que ces derniers contrôlent la minéralisation des eaux.

Le sodium est fortement conservé dans les processus hydrochimiques dans les quels il est fortement associé avec le chlore (Duce et Hoffman, 1976). Le sodium et le chlore sont les ions dominants dans les eaux, et dans plusieurs cas ils peuvent avoir la même source (Nordstrom et al., 1990). Le sodium provient du lessivage des formations riches en NaCl et des formations argileuses.

Le tracé de la concentration du sodium en fonction des chlorures pour les eaux du lac Fetzara montre un groupement de données fortement linéaire. La corrélation entre  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  est toujours élevée et la même dans les eaux à faible concentration et salines. Par contre les points d'eau qui se situent au-dessous de la droite de pente 1 indiquent un appauvrissement en sodium, ces eaux sont contrôlées surtout par des réactions d'échange cationique. Etant donné que la teneur en sodium devrait équilibrer la teneur en chlore, le déficit en  $\text{Na}^+$  est expliqué par le phénomène d'échange ionique entre l'eau et le complexe argilo-humique et se traduit par une adsorption de  $\text{Na}^+$  et une libération de  $\text{Ca}^{++}$ .

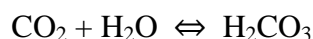
Concernant les ions sulfates, l'enrichissement des eaux en ions sulfates doit être lié à l'oxydation des sulfures dans l'eau ou la dissolution des minéraux sulfatés (gypse, anhydrite).

Les ions bicarbonates sont les ions dominants dans le système carbonique. L'enrichissement en bicarbonates est lié à l'augmentation du pH suite au dégazage du  $\text{CO}_2$ .

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (calcite) par des eaux chargées en gaz carbonique. La somme des équations de dissolution est donnée comme suit:



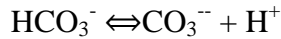
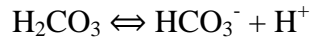
Le système  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{CO}_3/\text{HCO}_3^-/\text{CO}_3^{--}$  est un système essentiel dans le cycle naturel de l'eau. Une eau en contact avec l'atmosphère va dissoudre du gaz carbonique:



Où  $p\text{CO}_2$  est la pression partielle de  $\text{CO}_2$  (dans l'atmosphère  $p\text{CO}_2 = 10^{-3.5}$  atm).



La dissolution du  $\text{CO}_2$  entraîne la formation des ions bicarbonates  $\text{HCO}_3^-$  et carbonates  $\text{CO}_3^{--}$  suivant les réactions :



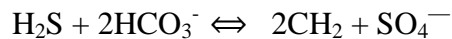
Les teneurs en potassium sont très faibles par rapport à celles des cations. Cette prédominance du sodium sur le potassium est un fait général sur l'ensemble de ces eaux. Elle peut être expliquée par une fixation du potassium dans les minéraux. Ainsi, lors d'une échange de base, la faible valeur du rapport  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  suppose que les sodiums sont plus facilement échangeables que les ions potassium.

Le magnésium est présent dans les carbonates et la dissolution des minéraux carbonatés (dolomite) conduisent à la mise en solution des ions magnésium dans les eaux, la sousaturation des eaux vis-à-vis de la dolomite sont en accord avec les fortes teneurs en magnésium observées dans les eaux.

Le calcium participe dans la composition de divers minéraux: carbonatés (calcite, dolomite), présents dans les roches dans cette région. Sa présence dans l'eau peut provenir essentiellement de l'altération de ces roches.

Par ailleurs, la corrélation montre que les teneurs en sulfates et en calcium ne montrent un coefficient de corrélation significatif pour une grande partie des points d'eau étudiés. Ce résultat n'exclut pas les évaporites sulfatées (gypse) comme la seule origine des deux éléments considérés, mais indique l'existence d'une autre origine qui a provoqué l'excès en calcium par rapport à la dissolution du gypse dans plusieurs points et l'excès en sulfates en d'autres points moins nombreux.

L'excès en calcium est être attribué à la dissolution des roches carbonatées et le phénomène d'échange de base, alors que l'excès en sulfates est attribué à l'oxydation des minéraux sulfurés ou à l'oxydation du sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ).



L'augmentation des teneurs en sulfates est attribuée au sulfure d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{S}$ ): lorsqu'il est en contact avec l'air, l'eau cherche son équilibre avec l'atmosphère; par conséquent, une partie du sulfure d'hydrogène aura tendance à se volatiliser et l'autre partie va s'oxyder en sulfates.

Pour identifier sommairement les différentes corrélations entre éléments chimiques, une analyse en composante principales (ACP) a été effectuée sur les échantillons des eaux du

lac Fetzara. Les variables utilisées sont: CE, T, pH, Eh, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>, mais également Br<sup>-</sup>.

On remarque que plusieurs paramètres sont fortement corrélés avec l'axe factoriel 1: Cl, Na<sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>++</sup>, Ca<sup>++</sup>, conductivité électrique (CE). L'axe 1 représente la part principale de la minéralisation due à la dissolution/précipitation des éléments calcites et évaporitiques concentrées par évaporation.

Les eaux présentent généralement deux types de faciès chimiques : chloruré sodique pour les eaux les plus minéralisées et bicarbonaté sodique pour les eaux les moins minéralisées. Cette transition d'un faciès à un autre souligne la complexité des processus hydrogéochimiques qui gouvernent la salinité des eaux.

Un faciès bicarbonaté sodique se trouve dans certains aquifères des bassins sédimentaires et témoigne d'interactions eau-roche (échange Ca<sup>++</sup> contre Na<sup>+</sup> sur des argiles).

Un faciès Chloruré-sodique fréquents dans les milieux riches en évaporites (exemple : halite [NaCl]).

Nous allons étudier le comportement des rapports ioniques Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> et Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup>. Un rapport Na<sup>+</sup>/Cl<sup>-</sup> élevé (= 1) est typique des eaux dominées par une dissolution de la halite.

A partir du rapport Br/Cl, il est possible d'identifier les anomalies de salinité dans l'eau, d'évaluer les sources salées (sources marines, dissolution/précipitation...), les processus de salinisation.

- Un rapport Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> similaire à celui de l'eau de mer ( $3.5 \times 10^{-3}$ ) indique une origine marine.
- Un rapport Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> plus faible (< à celui de l'eau de mer) met en évidence une source de salinité à partir des eaux usées et une dissolution des évaporites.

L'utilisation de l'approche géochimique (Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>) pour les du lac Fetzara nous a permis d'exclure l'hypothèse d'une augmentation de la salinité des eaux par intrusion marine. Cette augmentation de la salinité des eaux ne semble pas provenir d'une contamination marine, la salinité élevée liée essentiellement à la dissolution de l'halite.

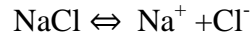
Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seul les minéraux carbonaté tendent à précipité surtout sous la forme de calcite.

Par contre les minéraux évaporitiques sont toujours à l'état de sous-saturation, cela est expliqué par l'effet des valeurs élevées de la constante d'équilibre des minéraux évaporitiques [halite (1.58) ; gypse (-4.58)], ce qui permet aux éléments évaporitiques de se présenter dans l'eau à des constantes élevés. Par contre pour les minéraux carbonatés,

la constante d'équilibre est plus faible [dolomite ((-17.02) ; calcite (-8.37)], ce qui produit une précipitation rapide des éléments chimiques.

Halite: chlorure de sodium (NaCl), de structure cubique, dit aussi sel gemme. Minéral des roches sédimentaires, à structure cristalline cubique. Incolore, soluble dans l'eau.

La réaction de dissolution de l'halite s'écrit:



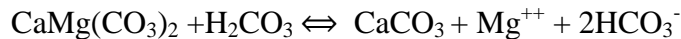
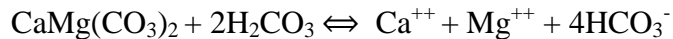
Dans la nature, l'aragonite et la calcite ont la même composition chimique  $\text{CaCO}_3$  mais par contre, leur organisation géométrique cristalline est différente. L'aragonite précipite en premier puis change de symétrie et se transforme dans le temps en calcite, l'aragonite est dite métastable.

La réaction de dissolution de la calcite s'écrit simplement:



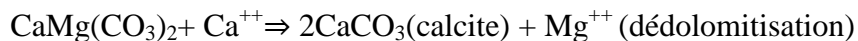
La dolomite est une espèce minérale formée de carbonate de calcium et de magnésium de formule chimique  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ .

Les réactions de dissolution de dolomite s'écrivent:

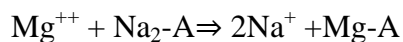
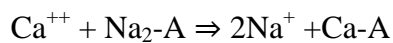


La forte minéralisation de l'eau, est démontrée par la dissolution des formations évaporitiques chlorurées et gypsifères, et en partie par le processus de dedolomitization selon les réactions chimiques suivantes:

- Forte dissolution des chlorures de sodium (halite):  $\text{NaCl} \Rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$
- Dissolution du gypse et anhydrite  $\Rightarrow \text{Ca}^{++} + \text{SO}_4^{--}$
- Précipitation de la calcite :  $\text{Ca}^{++} + 2\text{HCO}_3^- \Rightarrow \text{Ca}(\text{CO}_3)_2 + 2\text{H}^+$
- Dédolomitisation: dissolution de la dolomite et la précipitation de calcite.



- Echange ionique: ce phénomène se produit souvent sur les argiles par fixation des ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{Mg}^{++}$  et libération de sodium  $\text{Na}^+$  :



A, étant un échangeur ionique, généralement une argile.

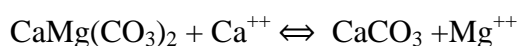
L'interprétation géochimique de l'eau de la région d'étude a permis de mettre en évidence trois principales réactions qui caractérisent son évolution chimique. Il s'agit d'une forte dissolution des chlorures notamment la halite (NaCl), le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), et d'une dédolomitisation et l'échange des ions entre l'eau et l'argile.

La salinité peut entraîner des effets nocifs conséquents en raison de la fixation du sodium par les colloïdes du sol. Le sodium exerce alors une action néfaste sur la végétation de façon indirecte, en dégradant les propriétés physiques du sol. Sous cette action, les sols deviennent compacts et asphyxiants pour les plantes. Lorsque la concentration des ions Na à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent le plus fréquemment les cations  $\text{Ca}^{++}$  dans le complexe absorbant. Une eau chargée en sels, peut provoquer cette action. Le risque est déterminé à partir de la valeur du Sodium absorbable (Sodium Absorption Ratio, SAR). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. La méthode de Richards, qui est la plus fréquemment utilisée, sera développée pour examiner l'utilisation des eaux destinées à l'irrigation dans la région d'étude. La classification de Richards a permis de classer les eaux de la région. Ces eaux sont en général acceptables pour l'utilisation agricole, mais nécessitent un contrôle préalable.

### Conclusion

Trois sources de minéralisation peuvent être mises en évidence:

- La première concerne la dissolution des minéraux calcites et évaporites concentrées par évaporation.
- La seconde, en revanche, est liée au phénomène de dédolomitization comme en témoignent la sous-saturation des eaux en gypse, leur sur-saturation en calcite et dolomite et l'augmentation des teneurs en magnésium. La dissolution du gypse a pour conséquence l'augmentation des ions  $\text{Ca}^{++}$  et celle du rapport  $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$ ; Lorsque ce dernier a une valeur supérieure à 0.5 qui est le cas de l'ensemble des points, le phénomène de dédolomitisation est favorisé:



Cette réaction explique la saturation en calcite et dolomite et sous-saturation par rapport au gypse.

- La troisième est la réaction d'échange de base entre l'eau et le complexe argilo-humique.

## CONCLUSION GENERALE

Le but de ce travail touche l'évolution de la salinité des eaux du lac Fetzara à partir d'une approche géochimique. Ce site situé dans la région d'Annaba, couvre une superficie estimée à 18600 ha dont une très grande partie affectée par le phénomène de salinisation. Depuis plusieurs décennies, les pouvoirs publics ont engagé de nombreux programmes d'aménagement et de mise en valeur des terres, mais les résultats n'ont jamais abouti.

Dans cette étude, il apparaît que la concentration des eaux sous l'effet du climat, qui est caractérisé par un déficit hydrique très important en période estivale (pluviométrie < Evaporation), provoque une concentration des sels induisant la précipitation de certains minéraux.

Trois campagnes de mesures et de prélèvements d'échantillons ont été successivement effectuées en janvier, mai et octobre 2011 qui correspondent respectivement à la saison pluvieuse, fin de la saison pluvieuse et en fin de la saison sèche.

Les échantillons d'eau ont été récoltés au niveau de 25 points, sélectionnés suivant une répartition spatiale homogène sur toute la zone d'étude. Température, pH, Eh et conductivité électrique (CE) ont été mesurés sur le terrain. Les analyses chimiques du  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{CO}_3^{--}$  et  $\text{Br}^-$  ont été effectuées au laboratoire.

L'étude de la chimie des eaux est basée principalement sur les informations tirées de la base de données analytiques, sur laquelle une description a été effectuée en utilisant les méthodes suivantes:

- Les diagrammes décrivant la composition chimique des eaux parmi lesquels le diagramme de Piper permet de déterminer la typologie des faciès chimiques et leurs évolutions et le diagramme de Durov qui permet en même temps de définir les faciès chimiques et la minéralisation des eaux (TDS).
- Les diagrammes binaires associés aux rapports caractéristiques qui permettent d'établir les corrélations et d'estimer la prépondérance d'un processus par rapport à un autre.
- Les analyses factorielles avec en particulier les ACP (Analyse en Composantes Principales) utilisées ici, qui permettent d'observer les relations entre les différentes variables et échantillons.

- Les indices de saturation qui permettent d'évaluer la saturation de l'eau vis-à-vis des différents minéraux.

Les températures moyennes mesurées reflètent l'influence du climat dans la zone au moment de la collecte des échantillons mais également l'influence de la saison. Les pH sont neutres à faiblement basiques; tandis que les variations de la conductivité électrique (CE) des eaux ne sont pas homogènes sur l'ensemble des points étudiés. Un effet de dilution impliquant une diminution de la minéralisation des eaux a été constaté sur la plupart des échantillons après la saison des pluies.

Les diagrammes de Piper et Durov réalisés à partir de l'ensemble des analyses chimiques, montrent que les eaux étudiées présentent deux faciès chimiques l'un chloruré-sodique et l'autre bicarbonaté-sodique.

L'analyse statistique multivariée des données hydrochimiques, a permis d'identifier trois principaux mécanismes qui sont responsables de l'évolution de la minéralisation des eaux de la zone. Le phénomène de salinisation est de loin le processus principal. Le mécanisme à la base de la minéralisation en éléments majeurs des eaux est le phénomène de dissolution/précipitation des formations évaporitiques et carbonatées concentrés par évaporation. Les processus de second ordre seraient le phénomène d'échange ionique et les processus d'oxydo-réduction, indiquant que des processus de sulfato-réduction ont lieu. L'enrichissement en bicarbonates est lié à l'augmentation du pH suite au dégazage du CO<sub>2</sub>.

Il ressort de cette analyse que la plupart des eaux dans la zone du lac Fetzara sont sous saturées vis-à-vis des minéraux évaporitiques (halite, gypse et anhydrite) en toute saison et saturées vis-à-vis des minéraux carbonatés (calcite, aragonite et dolomite) en saison sèche et sous-saturées durant et après la saison pluvieuse. Cette saturation est accentuée par la concentration par processus d'évaporation durant la saison sèche. Il faut également signaler que durant cette période, la nappe est soumise à une forte insolation et les solutions se concentrent par évaporation. Lorsque les produits de solubilité des ions carbonates et alcalino-terreux sont atteints, ces ions précipitent les premiers. Ces phénomènes seraient pour la plupart responsables de la diminution des concentrations en ions alcalino-terreux observées durant la saison sèche.

Ainsi, après la saison pluvieuse, les indices de saturation deviennent négatifs; ils sont très probablement dus aux mélanges entre les eaux de recharge (pluie, eaux d'engorgement et d'infiltration) sous-saturées et les eaux de la nappe à l'équilibre ou légèrement sursaturées.

Les points d'eaux analysées présentent des teneurs en bromures très faibles par rapport à l'eau de mer ( $1.5 \times 10^{-3}$ ).

L'étude de l'aptitude des eaux à l'irrigation, a révélé que les eaux de la majorité des échantillons prélevés ont une qualité admissible, 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.

En définitive, les processus de concentration par évaporation, de dissolution/précipitation des minéraux calcite et évaporitiques et de dilution après la saison pluvieuse, sont responsables des variations saisonnières de la chimie des eaux.

Cependant plusieurs points restent à approfondir et à développer, voici donc une liste non exhaustive des travaux qui seraient susceptibles d'être entrepris dans la continuité de cette étude:

- Il faudra donc poursuivre l'échantillonnage chimique en multipliant les points de mesure pour mieux comprendre les facteurs responsables de l'hétérogénéité géochimiques à grande et à petite échelle.
- Faire une analyse chimique et isotopique complète des eaux afin d'évaluer avec précision la minéralisation des eaux.
- Il n'existe pas, enfin, de relevés piézométriques fiables et suivis permettant d'avoir une idée des directions d'écoulement des eaux et de proposer ainsi une carte piézométrique correcte.
- Les processus d'oxydo-réductions jouent un rôle important dans la qualité des eaux. Les caractéristiques du potentiel redox des eaux peuvent constituer un bon indicateur de leur dégradation. Les études doivent donner une importance particulière aux minéraux suivants : fer, azote et soufre. Ce volet n'a malheureusement pas été abordé dans cette étude à cause de certaines contraintes.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahmed Salem M.; 2012** - Approche hydrodynamique de la nappe du Trarza Sud-Ouest de la Mauritanie. Thèse Doct., Univ. Paris-Sud; 148 p.
- Ait Brahim Y.; 2012** - Dénoyages miniers et hydrochimie élémentaire et isotopique des eaux souterraines de la région d'Oumjrane. Mémoire de fin d'étude, Univ. Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc; 79 p.
- AJCI; 1985** - Etude de faisabilité du projet d'aménagement agricole de la région périphérique du lac Fetzara. Agence Japonaise Coopération Internationale, Volume 2, Annexe A et B; 150 p +72 p.
- Alili, D.; 1993** - Caractéristiques pluviométriques de l'année hydrologique 1992-93. ANRH, Alger.
- Andreasen D. C., Fleck W. B.; 1997** - Use bromide: ratio differentiates potential sources of chloride and shallow, unconfined aquifer affected by brackish-water intrusion. *Hydrogeology journal*; 5(2): 17-26.
- ANRH; 1980** - Etude Agro-Pédologique de la région de Fetzara–Azzaba et Oued Aneb au 1/100 000é par Aissoug et Lezzar, Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, 36 p.
- ANRH; 1993** - Plan de développement. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques; Alger, 54 p. .
- Ayres R. S., Westcott D. W.; 1976** - Water quality for agriculture. F.A.O. Irrigation and Drainage Paper No. 29. Rome. Italy, 128 p.
- Azzaoui S.; 1999** - Métaux lourds dans le bassin versant du Sebou, géochimie, source de pollution et impact sur la qualité des eaux de surface. Thèse Doct., Univ. Ibn Tofail, Kénitra, Maroc; 130 p.
- Banton O., Bangoy L. M.; 1999** - Hydrogéologie: multisciences environnementale des eaux souterraines. Presse de l'Université du Québec; 460 p.



- Barbiéro L., Valles V.; 1992** - Aspects géochimiques de l'alcalinisation des sols dans la vallée du Dallol Bosso (république de Niger). *Cahiers de l'ORSTOM, série pédologie*; 27(2): 143-152.
- Barlow P. M.; 2003** - Ground Water in Freshwater–Saltwater Environments of the Atlantic Coast, US Geological Survey; 1262 p
- Bauder J. W., Brock T. A.; 2001** - Irrigation water quality, soil amendment, and crop effects on sodium leaching. *Arid Land Research and Management*; 15: 101-113.
- Bear J., Cheng A. H.-D., Sorek S., Ouazar D. H. I.; 1999** - Seawater intrusion in coastal Aquifers: Concepts, methods and practices (Theory and applications of transport in Porous Media); *Environmental Science & Engineering*; 1-8.
- Belhamra A.; 2001** - Contrôle de la salinité des eaux du lac Fetzara jusqu'à la mer. Mémoire Magister. Univ. Annaba; 110 p.
- Benziane A., Boualla N., Derriche Z.; 2012** - Aptitude des eaux du bassin de la Grande Sebkhia d'Oran à l'irrigation, *Journal of Applied Biosciences*; 56: 4066– 4074.
- BNEDR; 1997** - Étude d'aménagement et assainissement des terres dans la région périphérique du lac Fetzara – Dossier II. Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural; archives la Générale des Concessions Agricoles (Wilaya d'Annaba), 26 p.
- BNEDR; 1999** - Programme de mise en valeur des terres par le biais de la Concession – Mise en valeur des terres agricoles périphérique du lac Fetzara; Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural; archives la Générale des Concessions Agricoles (Wilaya d'Annaba), 52 p.
- Bolke J. K., Horan M.; 2000** - Strontium isotope geochemistry of groundwater and streams affected by agriculture. Locust Grove, MD. *Applied Geochemistry*; 15: 599-609.
- Bolke J. K.; 2002** – Groundwater recharge and agricultural contamination. *Hydrogéologie Journal*; 10: 153-179.
- Bouhlassa S., Alecheikh C., Kabiri L.; 2008** - Origine de la minéralisation et détérioration de la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique du quaternaire du bassin-versant de Rheris (Errachidia, Maroc). *Sécheresse*; 19; 67-75.

- Bourhan A.; 2010** - Discrimination de l'origine de la salinité des masses d'eau souterraine: contexte hydrogéologique et méthodes d'étude, Géosciences Réunion, BRGM, Univ. Avignon; 108 p.
- Boutkhil M.; 2007**- Etude de l'intrusion marine et de ses répercussions sur la dégradation des sols: cas des zones côtières d'Alger Est, *Actes des JSIRAU*; 6-9.
- Braune E., Xu Y.; 2010** - The role of ground water in Sub-Saharan Africa. *Ground Water*; 48 (2): 229-238.
- BRGM; 1996** - Méthodes et moyens de contrôle des biseaux salés. Rapport scientifique N° 38847; 81 p.
- Buckman H. O., Brady N. C.; 1967** - The nature and properties of soils. 6<sup>th</sup> edition. Eurasia Publication House Pvt. Ltd; 520 p.
- Calvache M.L., Polido-Bosch A.; 1996** - Processus d'intrusion-extrusion marine dans les aquifères côtiers du sud de l'Espagne. Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. *Sciences de la terre et des planètes*; 323(8): 673-679.
- Cartwright I., Weaver, T. R., Fifield L. K.; 2006** - Cl/Br ratios and environmental isotopes as indicators of recharge variability and groundwater flow: An example from the South-East Murray Basin, Australia. *Chemical Geology*; 231(1-2): 38-56.
- Chabour N.; 2006** - Hydrogéologie des domaines de transition entre l'Atlas Saharien et la Plateforme Saharienne à l'Est de l'Algérie. Thèse Doct., Univ. Constantine; 125 p.
- Chapelle F. H.; 1993** - Ground-water microbiology and geochemistry, John Wiley & Sons, Inc. NY; 93 p.
- Chen Y., Banin A.; 1975** - Scanning Electron Microscope (SEM) observations of soil structure changes induced by sodium calcium exchange in relation to hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*; 120: 428-36.
- Collins A. G.; 1975** - Geochemistry of oilfield waters. Elsevier scientific publishing company, New York; 495 p.
- Cudennec C., Leduc C., Koutsoyannis D.; 2007** - Dryland hydrology in Mediterranean regions-a review. *Hydrology Science Journal*; 52: 1077-87.

- Custodio E., Bruggeman G.A.; 1987** - Groundwater problems in coastal areas; Studies and Reports in Hydrology, Paris; 596 p.
- Custodio E.; 1997** – Studing, monitoring and controlling intrusion in Coastal aquifers. In guidelines for study. FAO; water reports, N° 11; 7-23.
- Custodio E.; 2002** - Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures. In: Bocanegra, Martines and Massone (Editors). *Groundwater and Human Development*; 1905-1918.
- Davis S. N., Whittemore D. O., Fabryka-Martin J.; 1998** - Uses of chloride/bromide ratios in studies of potable water. *Ground water*; 36: 338-350.
- Debieche T. H.; 2002**- évolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l’effet de la pollution saline, agricole et industrielle, Thèse Doct., Univ. Franche-Comté; 199 p.
- De Martonne E.; 1926** - Une nouvelle fonction climatologique: L’indice d’aridité. *La Météorologie*; 449-458.
- De Montety V.; 2008** - Salinisation d’une aquifère captive côtière en contexte deltaïque-cas de la camargue (Delta du Rhône, France). Thèse Doct., Univ. Avignon et des Pays de Vauclous; 208 p.
- Djamai R.; 1993** - Contribution à l’étude de la salinité des sols et des eaux du lac Fetzara (Annaba). Mémoire de Magister, Institut National Agronomique, Alger; 78 p.
- Djamai R.; 2000** - Etude spatio-temporelle de la salinité des sols du lac Fetzara (Annaba). Doc. Inédit; Univ. Annaba; p 61.
- Djamai R., Daoud Y., Ouardi J., Laifa A., Fadel D., Benslama M., Vallès V.; 2006** - Mathematical simulation the climatic variability-estimation of the water balance of the overturning pond of the Fetzara Lake (Algerian North-East). *European Journal of Scientific Research*; 13(2): 267-274.
- 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 évolution spatio-temporelle des phénomènes ». Thèse Doct., Institut National Agronomique, Alger; 167 p.

- Djamai R., Fadel D., Laifa A., Benslama M., Daoud Y., Valles V.; 2011** – Concept d'alcalinité résiduelle et évolution géochimique des processus. Application aux sols salés du lac Fetzara (Nord-Est algérien). *Revue Synthèse*; 23; 92 p.
- Douaoui A., Hartani T.; 2007** - Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chélif. Troisième atelier régional du projet Sirma, Tunisie. Cirad; 1-5.
- Droubi A.; 1976** - Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad. Thèse Doc., Univ. Strasbourg; 177 p.
- Droubi A., Fritz B., Gac J., Tardy Y.; 1978** - Generalized residual alkalinity concept, application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. *American Journal of Science*; 280: 560-572.
- Duce R. A., Hoffman E. J.; 1976** - Chemical fractionation at the air/sea interface. *Annual review of Earth and Planetary Sciences*; 4: 187-228.
- Durand J. H.; 1950** - Première résultats de l'étude des sols du lac Fetzara. Doc. Inédit; SE Alger; 112P+ carte.
- Durov S. A.; 1948** - Klassifikatsia prirodnykh vodi graficheskoe izobrazhenie ikh sostava. *Doklady Akademii Nauk*; 59(1): 87-90.
- Edmunds W. M., Gaye C. B.; 1994** - Estimating the spatial variability of groundwater recharge in the Sahel using chloride. *Journal of Hydrology*; 156 (1-4): 47-59.
- Edmunds W. M.; 1996** - Bromine geochemistry of British groundwater. *Mineralogical Magazine*; 60 (2): 274-284.
- Edmunds W. M., Droubi A.; 1998** - Groundwater salinity and environmental change. Isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and atmosphere. IAEA, Vienna, 503-518.
- El Blidi S., Fekhaoui M., El Blidi A., Idrissi L., Benazzou T.; 2003** - Contamination des rizières de la plaine du Gharb (Maroc) par des métaux traces. *Vecteur Environnement*; 46-53.

- Falstad J.; 2000** - Soil condition transplant status in Burger Draw. *Billings Gazette*. Prepared by D.G. Steward Page. Burger Draw Comments and Recommendations.
- FAO; 1989** - Evaluation des terres pour l'agriculture irriguée: Directives-Bulletin pédagogique de la FAO: Food and Agriculture Organization, 55; 307 p.
- Favreau G., Leduc, C., Marlin C., Guero A.; 2002** - Une dépression piézométrique naturelle en hausse au Sahel (Sud-Ouest du Niger). *Comptes Rendus Geosciences*; 334 (6): 395-401.
- Fetter B.; 1993** - The health transition and colonial British Africa. International Population Conference, Montréal; 429-439.
- Fisher R. S., Mullican W. F.; 1997**- Hydrochemical evolution of sodium sulfate and sodium chloride groundwater beneath the Northern Chihuahuan desert, Trans-Pecos, Texas, USA, *Hydrogeology Journal*; 5(2): 4-16
- Freeman J. T.; 2007** - The use of bromide and chloride mass ratio to differentiate salt-dissolution and formation brines in shallow groundwater of the Western Canadian Sedimentary Basin. *Hydrogeology Journal*; 15: 1377-1385.
- Frenkel H., Goertzen J.O., Rhoades J. D.; 1978** - Effect of clay type and content, exchangeable sodium percentage, and electrolyte concentration on clay dispersion and soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*; 142: 32-39.
- Gascoyne M., Kaminen D. C.; 1994** - The hydrogeochemistry of fractured plutonic rocks in the Canadian Shield. *Applied Hydrogeology*; 2(94): 43 - 49.
- Gaucher G., Burdin S.; 1974** - Géologie, Géomorphologie et hydrologie des terrains salés. Techniques vivantes, Presses Universitaires de France, Imp. Boudin, Paris; 234 p.
- Genxu W., Guodong C.; 1999** - Water resource development and its influence on the environment in arid areas of China, the case of the Heir River basin. *Journal of Arid Environments*; 43 (2): 121-131.
- Ghabayen S.M.S., McKee M., Kemblowski M.; 2006** - Ionic and isotopic ratios for identification of salinity sources and missing data in the Gaza aquifer. *Journal of Hydrology*; 318(4): 360-373.

- GHI; 2009** - Etude d'avant projet détaillée pour l'aménagement intégré portant sur la protection des localités à l'aval du lac et les terres agricoles à la périphérie du lac Fetzara contre les inondations-Wilaya d'Annaba (Étude hydrologique), Gabinetete Hispano d'Igéniera; 115 p.
- Gouaidia L.; 2008** - Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana Nord-Est Algérien. Thèse Doct., Univ. Annaba; 130 p.
- Groleau A., Harrault L., Viollier E., Gaillard A., Pepe M., Benedetti M.; 2008** - Variabilité temporelle du pH et du système CO<sub>2</sub> carbonate dans la Seine à Paris, Univ. Paris Diderot, 17 p.
- Habes S.; 2006** - Pollution saline d'un lac, cas du lac Fetzara, Est Algérienne. Mémoire de Magister, Univ. Annaba; 103 p.
- Habes S., Djabri L., Djabri Y., 2011** - Qualité des eaux d'un lac dans une région côtière de l'Est Algérien: cas du lac Fetzara. Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Edition 2, Tanga, Maroc; 331 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 Doct., Univ. Annaba; 168 p.
- Haddani H.; 2010** - Mise en évidence de l'intrusion marine vers les aquifères côtiers de la zone comprise entre El Jadida et Oualidia (Maroc). Mémoire de fin d'étude, Univ. Chouaib Doukkali, Maroc; 43 p.
- Hallaire M.; 1958** – Soil water movement in the film and vapor phase under the influence of evapotranspiration. *HRB Special Report*; 40: 88-105.
- Hamdy A., Ragab R., Scarascia Mugnozza E.; 2003** - Coping with water scarcity: water saving and increasing water productivity. *Irrigation and Drainage*; 52 (1): 3-20.
- Hanson B., Grattan S.R., Fulton A.; 1999** - Agricultural Salinity and Drainage. University of California Irrigation Program. *Division of Agriculture and Natural Resources Publication*, Oakland; 160 p.

- Hardy N., Shainber I., Gal M., Keren R.; 1983** - The effect of water quality and storm sequence upon infiltration rate and crust formation. *Journal of Soil Science*. 34 ; 665-676.
- Hsissou Y.; 1999** - Impact de l'environnement naturel et anthropique sur la qualité des eaux alluviales en zone semi-aride; cas de la plaine de Souss (Maroc). Thèse Doct., Univ. Ibn Zohr Agadir; 172 p.
- Hsissou Y., Murdy J., Mania J., Bouchaou L., Tulipano P.; 1999** - Utilisation du rapport Br/Cl pour déterminer l'origine de la salinité des eaux souterraines: exemple de la plaine du Souss (Maroc). C. R. Acad. Sci. Paris; 328: 381-386.
- Idder T.; 2007** - Le problème des excédents hydriques à Ouargla: situation actuelle et perspectives d'amélioration. *Sécheresse*; 18 : 161-167.
- Ifagraria; 1967** - Etude générale de la mise en valeur agricole des plaines côtières d'Annaba. Société Ifagraria, Rome; Partie 1; 169 p.
- Jones B. F., Vengosh A., Rosenthal E., Yechieli Y.; 1999** - Géochimical investigations. In Seawater Intrusion in Coastal Aquifers- Concepts, Methods and Practices. *Kluwer academic publishers*, Netherlands; 51-72.
- Jyrkama M. I., Sykes J. F.; 2007** - The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the Grand River watershed (Ontario). *Journal of Hydrology*; 338 (3-4): 237-250.
- Kadi A., 1997** - La gestion de l'eau en Algérie. *Hydrological Sciences Journal*; 42(2): 191p.
- Karaouli F., Zammouri M., Tarhouni J., Hamed Y.; 2008** - Etude hydrogéologique et impact de l'intensification de l'exploitation sur la qualité des eaux souterraine du bassin de Moulares-Redeyef (Sud-Ouest tunisien). *Sécheresse*; 19: 61-65.
- Khammari B., De Marsily G.; 1994** - Identification de l'intrusion marine en nappe côtière par cokrigeage entre les teneurs hydrochimiques (Nappe alluviale du bas Seybouse, Algérie); 18 p.
- Kharaka Y. K., Hanor J. S.; 2005** - Deep fluids in the continents: I sedimentary basins. *Treatise on Geochemistry*; 5(16): 499-540.

- Klopmann W., Bourhane A., Asfirane F.; 2011** - Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau « emploi des outils géochimiques, isotopiques et géophysiques », BRGM, France; 38 p.
- Kolodny Y., Kartz A., Starinsky A., Moise T., Simon E.; 1999** - Chemical tracing of salinity sources in Lake Kinneret (Sea of Galilee). *Limnology Oceanography*; 44: 1035-1044.
- Lange J., Leibundgut C.; 1999** - A non-calibrated rainfall-runoff model for large, arid catchment. *Water Resources*; 35: 2161-72.
- Leybourne M. I., Goodfellow W. D.; 2007** - Br/Cl ratios and O, H, C, and B isotopic constraints on the origin of saline waters from eastern Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta* ; 71(9): 2209-2223.
- Maouni A.; 2007** - Evolution et origine du chimisme des eaux de l'aquifère superficiel de Zaâfrane : région de la steppe Sud Algéroise. Etude de la variation spatiale de la salinité et ses risques sur les sols et la végétation. Thèse Doct., Univ. Annaba, 257 p.
- Marjoua A., Olive P., Jusserand C.; 1997** - Origines des sels dans l'aquifère de la Chaouia côtière (Maroc). Hydrochemistry (Proceeding of the Rabat Symposium). IASH Publ. N°244; 245-252.
- Miller R. W., Donahue R. L.; 1995** - Soils in our environment, Prentice Hall; 7th edition, U.S.A.; 784 p.
- Morell I., Médina J., Pulido A., Fernandez-Rudio R.; 1986** – The use of bromide and strontium ions as indicators of marine intrusion in the aquifer of Torreblanca Castellon, Spain. *9 th Salt water intrusion meeting*, Deft: 12(16): 629-640.
- Mudry J., Blavoux A.; 1986** - Utilisation de l'analyse en composantes principales (sur variables centrées réduites) pour l'étude du fonctionnement hydrocinématique de trois aquifères karstiques du Sud-Est de la France. *Hydrogéologie*; 1: 53-59.
- Ndembo Longoj J.; 2009** - Apport des outils hydrogéochimiques et isotopiques à la gestion de l'aquifère du Mont Amba. Thèse Doct., Univ. Avignon; 203 p.



- Nishri A., Stiller M., Rimmer A., Geifman Y., Krom M.; 1999** - Lake Kinneret (the Sea of Galilee): the effects of diversion of external salinity source and the protocol chemical composition of the internal salinity sources. *Chemical Geology*; 158: 37-52.
- Nordstrom D. K., Plummer L.N., Langmuir D., Busenberg E., May H. M., Jones B. F., Parkhurst D.L., 1990** - Revised chemical equilibrium data for major water-mineral reactions and their limitations. *American chemical society*, Washington; 398-413.
- Olive P.; 1996** - Introduction à la géochimie des eaux continentales. *Tempus S-JEP 09781/95*, gestion et protection des ressources en eau; 127 p.
- Ouardi J.; 2006** - Dégradation des sols et de la nappe des périmètres irrigués du Tadla Marocain par salinisation et sodisation. Thèse Doct., Univ. Cadi Ayyad, Marrakech; 154 p.
- Oulaaross Z.; 2009** - Etude climatologique, hydrogéologique et géophysique du Sahel Côtier des Doukkala (Maroc). Apport de l'analyse statistique et de l'inversion des données géoélectriques à l'étude du biseau salé de la lagune de Sidi Moussa. Thèse Doct., Univ. Chouaib Doukkali & Univ. Bordeaux 1; 279 p.
- Peter-Borie M., Lucassou F., Aubie S.; 2009** - Contexte hydrogéologique et hydraulique du littoral basique français, observation de la cote Aquitaine, BRGM, France; 31 p.
- Piper A. M.; 1944** - A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. *American Geophysical Union, Trans*; 914-923.
- Poutoukis D.; 1991** - Hydrochimie, teneurs isotopiques et origine des saumures associées aux gisements de potasse d'Alsace. Thèse Doct., Univ. Paris-11, Orsay; 124 p.
- Raoult J. F., Foucault A.; 2005** - Dictionnaire de géologie, 6<sup>ème</sup> édition; 388 p.
- Raymond K. L., Butterwick L.; 1992** - Perborate in Detergents (ed. N. T. de Qude). *Springer*, New York; 288-318.
- Richard L. A.; 1954** - Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agric. Handbook 60*, USDA, Washington D.C.; 160 p.
- Richter B. C., Kreitler C.W.; 1993** - Geochemical techniques for identifying sources of groundwater salinization, Boca Katon, FL, C.K. Smoley; 258 p.

- Rittenhouse G.; 1967** - Bromide in oilfield waters and its use in determining the possibilities of origin of these waters. *American Association of Petroleum Geologists*; 51: 2430-2440.
- Rittenhouse G., Fulton R. B., Grabowski R. J., Bernard J. L.; 1969** – Minor elements in oilfield waters. *Chemical Geology*; 4: 189-209.
- Rodier J., Legube B., Merlet N., 2009** - L'Analyse de l'eau, 9<sup>e</sup> édition, Dunod, Paris; 1526 p.
- Rouabhia A.E.K., Djabri L., 2010** - l'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux souterraines de l'aquifère Miocène de la plaine d'El Ma El Abiod. *Larhyss Journal*; 55-67.
- Rouabhia A.E.K., Djabri L., Hadji R., Baali F., Fehdi C., Hani A.; 2010** - Geochemical characterization of groundwater from shallow aquifer surrounding Fetzara Lake N. E. Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*; 5(1): 1-13
- Scanlon B. R., Healy R. W., Cook P.; 2002** - Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*; 10 (1): 18-39.
- Scanlon B. R., Keese K. E., Flint A. L., Flint L. E., Gaye C. B., Edmunds W. M., Simmers I.; 2006** - Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *Hydrological Processes*; 20 (15): 3335-3370.
- Schoeller H.; 1962** - Les eaux souterraines. Masson et Cie, Editeurs, Paris, 642 p.
- Simmers I.; 1997** - Recharge of phreatic Aquifers in (Semi-) Arid Areas. *International Association of Hydrogeology*; 255 p.
- Stumm W., Morgan J. J.; 1981** - Aquatic chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibrium in natural waters, 2nd Edition; 780 p.
- Thornthwaite C. W., Mather J.; 1957**- Instruction and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. *Philadelphia Publications in Climatology*; 10(3): 185-311.
- Tôth J.; 1999** - Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes, processes, and manifestations. *Hydrogeology Journal*; 7: 1-14.
-

**Travers L.; 1958** - La mise en valeur du lac Fetzara. *Annales de Géographie*; 67(361): 260-262.

**U.N.E.S.C.O.; 1987** - Groundwater problems in coastal areas; 582 p.

**Vallet-Coulomb C., Radakovitch O., De Montety V., Hermitte D., Sonzogni C., Ollivier P., Paul M.; 2009** – Salinisation de l'eau souterraine en Camargue. In: Monaco, A., Ludwig, W., Provansal, M., and Picon, B., Le golf du Lion: un observatoire de l'environnement en Méditerranée. Editions: Quae; 151-161.

**Vengosh A., Rosenthal A.; 1994** - Saline groundwater in Israel: it's bearing on the water crisis in the country. *Journal of Hydrology*; 156: 389–430.

**Vengosh A., Spivack A. J., Artzi Y., Ayalon A.; 1999** - Boron, strontium and oxygen isotopic and geochemical constraints for the origin of the salinity in groundwater from the Mediterranean Coast. *Water Resources Research*; 35: 1877–1894.

**Vengosh A.; 2003** - Salinization and saline environments, in treatise on geochemistry, *Environmental Geochemistry*; 9: 333-365.

**Walvoord M. A., Plummer M. A., Phillips F. M., Wolfsberg A. V.; 2002** - Deep arid system hydrodynamics 1. Equilibrium states and response times in thick desert vadose zones. *Water Resources Research*; 38 (12): 1308

**Younsi A.; 2001** - Méthodologie de mise en évidence des mécanismes de salure des eaux souterraines côtières en zone semi-aride irriguée (Chaouia côtière, Maroc). Thèse Doct., Univ. Chouaïb Doukali. El Jadida; 175 p.

**Zahi F.; 2008** - La qualité des eaux et des sols de la région du lac Fetzara (Nord-Est d'Algérie). Mémoire de Magister, Univ. Annaba; 156 p.

**Zahi F., Djamai R., Chaab S., Djabri L., Douiche A., Medjani F.; 2013** - Dynamique de la nappe et qualités physico-chimiques des eaux souterraines du lac Fetzara (Nord-Est algérien). *Revue Synthèse*; 26 : 86-95.

**Zenati N.; 1999** - Relation nappes-lac confirmation par l'hydrochimie; cas de la plaine Ouest d'El Hadjar, lac Fetzara N-E Algérien. Mémoire Magister, Univ. Annaba; 151 p.

**Zenati N.; 2010** - Pollution de l'environnement aquatique: Diagnostic et proposition « Région de Annaba ». Thèse Doct., Univ. Annaba; 288 p.

**Sites internet consultés**

<http://www.xlstat.com>

<https://www.rockware.com/product/overview.php?id=165>

<http://www.lha.univ-avignon.fr/LHA-Logiciels.htm>

<http://www.terre-et-eau.univ-avignon.fr/hydrochimie.html>.

**LISTE DES FIGURES**

**Chapitre I. Les origines de la salinité des eaux en zones côtières.....13**

Figure 1. Gammes de concentrations et terminologie.....14

Figure 2. Dissolution des sels marins issus des aérosols et embrun marins.....15

Figure 3. Relation eau douce eau de mer.....17

Figure 4. Source naturelle de salinité des eaux souterraines par lixiviation.....22

Figure 5. Mécanismes naturels de salinisation des eaux de surfaces et souterraines.....23

Figure 6. Exemple et conséquences des différentes pressions s'exerçant sur un aquifère côtier.....23

Figure 7. Sources naturelles et anthropiques de salinité: évaporation et recyclage des eaux d'irrigation.....25

**Chapitre II. Caractéristiques du paysage.....26**

Figure 8. Situation géographique du lac Fetzara.....27

Figure 9. Les fossés.....28

Figure 10. Canal principal.....28

Figure 11. Pont vanne.....29

Figure 12. Géologie du bassin versant du lac Fetzara.....30

Figure 13. Carte pédologique de la région de Annaba.....34

Figure 14. Modèle numérique de terrain de la région d'étude.....35

Figure 15. Distribution de la superficie du bassin versant du lac Fetzara.....37

Figure 16. Les principaux sous bassins versant du lac Fetzara.....38

Figure 17. Bassin versant du lac Fetzara.....38

Figure 18. Nappes entourant le Lac Fetzara.....39

Figure 19. Courbes de remplissage du lac.....41

---

Figure 20. Courbes pluviothermiques: station des Salines.....	43
Figure 21. Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite (Station les Salines 1981-2011).....	48
<b>Chapitre III. Matériel et méthodes.....</b>	<b>52</b>
Figure 22. Localisation des points d'eau dans le bassin versant du lac Fetzara.....	53
Figure 23. Rapports molaires $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ , $\text{Br}^-/\text{Cl}^-$ des principales sources de salinité.....	58
<b>Chapitre IV. Histoire des études réalisées.....</b>	<b>59</b>
Figure 24. Carte pédologique.....	65
<b>Chapitre V. Etude statistique multivariee des eaux du lac fetzara.....</b>	<b>67</b>
Figure 25. Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (campagne janvier 2011).....	76
Figure 26. Répartition des échantillons sur le plan factoriel (campagne janvier 2011)....	76
Figure 27. Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (campagne mai 2011).....	77
Figure 28. Répartition des échantillons sur le plan factoriel (campagne mai 2011).....	77
Figure 29. Répartition des éléments chimiques sur le plan factoriel (campagne octobre 2011).....	78
Figure 30. Répartition des échantillons sur le plan factoriel (campagne octobre 2011)...	78
<b>Chapitre VI. Approche géochimique des eaux.....</b>	<b>81</b>
Figure 31. Variation de la température des eaux durant les trois campagnes.....	81
Figure 32. Variation du pH des eaux durant les trois campagnes.....	82
Figure 33. Variation de Eh des eaux durant les trois campagnes.....	83
Figure 34. Minéralisation totale des eaux prélevées en janvier 2011.....	84
Figure 35. Minéralisation totale des eaux prélevées en mai 2011.....	85

---

---

Figure 36. Minéralisation totale des eaux prélevées en octobre 2011.....	85
Figure 37. Diagramme de Piper des eaux prélevées en janvier 2011.....	87
Figure 38. Diagramme de Piper des eaux prélevées en mai 2011.....	87
Figure 39. Diagramme de Piper des eaux prélevées en octobre 2011.....	88
Figure 40. Diagramme de Durov des eaux prélevées en janvier 2011.....	89
Figure 41. Diagramme de Durov des eaux prélevées en mai 2011.....	89
Figure 42. Diagramme de Durov des eaux prélevées en octobre 2011.....	90
Figure 43. Indice de saturation (IS) (campagne janvier 2011).....	93
Figure 44. Indice de saturation (IS) (campagne mai 2011).....	93
Figure 45. Indice de saturation (IS) (campagne octobre 2011).....	93
Figure 46. Relation sodium-chlorures (campagne janvier 2011).....	95
Figure 47. Relation sodium-chlorures (campagne mai 2011).....	95
Figure 48. Relation sodium-chlorures (campagne octobre 2011).....	96
Figure 49. Relation chlorures-Bromures (campagne janvier 2011 en mg/l).....	98
Figure 50. Relation chlorures-bromures (campagne mai 2011 en mg/l).....	99
Figure 51. Relation chlorures-bromures (campagne octobre 2011 en mg/l).....	99
Figure 52. Classification des eaux d’irrigation d’après le diagramme de Richards (campagne janvier 2011).....	102
Figure 53. Classification des eaux d’irrigation d’après le diagramme de Richards (1945) (campagne mai 2011).....	103
Figure 54. Classification des eaux d’irrigation d’après le diagramme de Richards (1954) (campagne octobre 2011).....	103

---

---

**LISTE DES TABLEAUX**

<b>Chapitre I. Les origines de la salinité des eaux en zones côtières.....</b>	<b>13</b>
<b>Chapitre II. Caractéristiques du paysage.....</b>	<b>26</b>
Tableau 1. Superficie du bassin versant du lac Fetzara.....	37
Tableau 2. Données climatiques moyennes mensuelles de la région du lac Fetzara (Annaba-Les Salines: 1982-2011).....	42
Tableau 3. Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite de la Station des Salines (1982/2011).....	47
Tableau 4. Indices d'aridité de de Martonne (1926) de la station de Annaba (1981- 2011).....	50
<b>Chapitre III. Matériel et méthodes.....</b>	<b>52</b>
Tableau 5. Faciès hydrochimiques et contextes géologiques.....	55
Tableau 6. Caractéristiques géochimiques des sources de salinité.....	58
<b>Chapitre IV. Histoire des études réalisées.....</b>	<b>59</b>
Tableau 7. Classe de sols.....	64
Tableau 8. Sommaire de bilan du lac Fetzara.....	66
<b>Chapitre V. Etude statistique multivariée des eaux du lac Fetzara.....</b>	<b>67</b>
Tableau 9. Statistique descriptive pour la chimie des eaux (campagne janvier 2011).....	71
Tableau 10. Statistique descriptive pour la chimie des eaux (campagne mai 2011).....	71
Tableau 11. Statistique descriptive pour la chimie des eaux (campagne octobre 2011).....	71
Tableau 12. Matrice de corrélation des différents paramètres (première campagne).....	73
Tableau 13. Matrice de corrélation des différents paramètres (deuxième campagne).....	73
Tableau 14. Matrice de corrélation des différents paramètres (troisième campagne).....	74

---



Tableau 15. Corrélacion entre les variables et les facteurs (première campagne).....79

Tableau 16. Corrélacion entre les variables et les facteurs (deuxième campagne).....79

Tableau 17. Corrélacion entre les variables et les facteurs (troisième campagne).....79

**Chapitre VI. Approche géochimique des eaux.....81**

Tableau 18. Rapport  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  des eaux du lac Fetzara.....96

Tableau 19. Evolution des classes d'irrigation selon Richards (1954).....102

**Annexe 1. Indice de Saturation de la première campagne (janvier 2011)**

Echantillons	IS Anhydrite CaSO <sub>4</sub>	IS Aragonite CaCO <sub>3</sub>	IS Calcite CaCO <sub>3</sub>	IS Dolomite CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	IS Gypse CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	IS Halite NaCl
E1	-1.89	-0.58	-0.43	-1.11	-1.65	-5.85
E2	-1.75	-0.16	-0.01	-0.06	-1.51	-5.22
E3	-1.82	-0.34	-0.19	-1.46	-1.58	-5.58
E4	-1.85	-0.24	-0.09	-0.90	-1.60	-5.67
E5	-1.71	-0.10	-0.05	-1.63	-1.47	-6.10
E6	-1.92	-0.08	-0.07	-0.86	-1.68	-5.95
E7	-2.34	-1.16	-1.01	-1.32	-2.10	-6.36
E8	-2.15	-0.94	-0.79	-1.55	-1.90	-6.45
E9	-2.36	-0.20	-0.05	-0.25	-2.21	-6.00
E10	-2.06	-0.67	-0.52	-0.88	-1.82	-5.52
E11	-2.56	-0.89	-0.74	-1.01	-2.31	-6.01
E12	-1.54	0.04	0.20	-0.32	-1.29	-5.14
E13	-1.66	-0.04	0.11	-0.06	-1.40	-5.43
E14	-1.37	0.00	0.15	-0.21	-1.13	-5.2
E15	-1.80	-0.76	-0.61	-0.93	-1.55	-5.43
E16	-2.23	-0.53	-0.38	-0.26	-1.97	-5.88
E17	-2.16	-0.72	-0.57	-1.02	-1.92	-5.8
E18	-2.10	-0.25	-0.10	-0.90	-1.85	-6.18
E19	-2.58	-0.57	-0.42	-0.78	-2.33	-6.72
E20	-2.79	-0.69	-0.54	-1.12	-2.54	-6.33
E21	-2.45	-2.14	-1.99	-3.41	-2.20	-6.55
E22	-1.79	-0.11	0.04	-0.09	-1.54	-5.92
E23	-1.95	-0.52	-0.37	-0.22	-1.70	-5.68
E24	-2.14	-0.81	-0.66	-0.74	-1.86	-6.14
E25	-1.86	-0.39	-0.24	-0.77	-1.61	-5.6

**Annexe 2. Indice de Saturation de la deuxième campagne (mai 2011)**

Echantillons	IS Anhydrite CaSO <sub>4</sub>	IS Aragonite CaCO <sub>3</sub>	IS Calcite CaCO <sub>3</sub>	IS Dolomite CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	IS Gypse CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	IS Halite NaCl
E1	-1.90	-0.48	-0.33	-0.60	-1.67	-5.59
E2	-1.43	-0.19	-0.05	-0.090	-1.20	-5.21
E3	-1.91	-0.69	-0.55	-0.87	-1.68	-5.45
E4	-1.68	-0.15	0.00	-0.03	-1.45	-5.64
E5	-1.73	-0.78	-0.63	-1.25	-1.49	-6.23
E6	-1.40	-0.47	-0.32	-0.78	-1.16	-6.21
E7	-2.07	-1.14	-0.99	-1.62	-1.84	-6.48
E8	-1.77	-0.32	-0.17	-0.11	-1.54	-6.18
E9	-2.06	-0.62	-0.48	-0.34	-1.83	-5.97
E10	-1.49	-0.62	-0.48	-1.03	-1.25	-5.87
E11	-1.58	-0.98	-0.84	-1.57	-1.34	-5.59
E12	-1.27	-0.27	-0.12	-0.03	-1.04	-5.16
E13	-1.54	-0.70	-0.56	-0.89	-1.31	-5.43
E14	-1.49	-0.73	-0.58	-0.89	-1.25	-5.49
E15	-1.79	-0.95	-0.81	-1.16	-1.55	-5.55
E16	-1.63	-0.25	-0.10	0.03	-1.39	-5.81
E17	-1.53	-0.90	-0.76	-1.51	-1.30	-5.41
E18	-2.02	-0.87	-0.72	-1.11	-1.79	-6.13
E19	-1.98	-0.65	-0.51	-0.47	-1.74	-6.55
E20	-1.69	-0.59	-0.45	-0.85	-1.45	-6.42
E21	-1.86	-0.89	-0.75	-1.62	-1.64	-6.31
E22	-1.72	-0.62	-0.47	-0.37	-1.48	-5.80
E23	-2.21	-1.13	-0.98	-1.35	-1.97	-6.28
E24	-1.98	-1.17	-1.02	-1.16	-1.74	-6.25
E25	-1.47	-0.76	-0.62	-1.31	-1.24	-5.70

**Annexe 3. Indice de Saturation de la troisième campagne (octobre 2011)**

Echantillons	IS Anhydrite CaSO <sub>4</sub>	IS Aragonite CaCO <sub>3</sub>	IS Calcite CaCO <sub>3</sub>	IS Dolomite CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	IS Gypse CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	IS Halite NaCl
E1	-2.24	1.27	1.41	3.19	-2.02	-4.75
E2	-	-	-	-	-	-
E3	-	-	-	-	-	-
E4	-2.19	1.47	1.62	3.63	-1.96	-4.94
E5	-2.08	0.97	1.12	2.39	-1.85	-6.24
E6	-2.14	0.51	0.65	1.28	-1.92	-6.08
E7	-1.84	0.46	0.60	1.09	-1.61	-6.14
E8	-1.96	0.22	0.36	1.00	-1.73	-6.81
E9	-3.18	0.30	0.44	1.40	-2.96	-6.63
E10	-3.00	1.01	1.15	3.08	-2.78	-5.77
E11	-	-	-	-	-	-
E12	-	-	-	-	-	-
E13	-	-	-	-	-	-
E14	-1.68	0.61	0.76	2.03	-1.45	-5.07
E15	-2.38	0.41	0.56	1.33	-2.15	-6.45
E16	-2.30	0.09	0.23	0.70	-2.07	-6.17
E17	-1.89	0.01	0.16	0.55	-1.66	-5.55
E18	-2.11	1.02	1.17	2.65	-1.88	-5.48
E19	-2.84	0.09	0.23	1.14	-2.62	-6.27
E20	-2.19	0.66	0.81	2.22	-1.95	-5.76
E21	-	-	-	-	-	-
E22	-1.76	0.67	0.82	1.97	-1.54	-5.72
E23	-2.32	0.55	0.69	1.84	-2.09	-6.04
E24	-2.29	0.29	0.44	1.41	-2.06	-6.03
E25	-2.36	0.10	0.25	0.94	-2.13	-5.82

**Annexe 4. Concentrations des bromures et le rapport Br<sup>-</sup>/Cl<sup>-</sup> des eaux du lac Fetzara.**

Echantillons	Janvier 2011			Mai 2011			Octobre 2011		
	Br <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup> /Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup> /Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup> /Cl <sup>-</sup>
E1	0.0010	11	9.0923E-05	0,00107	11	9.68182E-05	0.00056	40	1.38924E-05
E2	0.0011	20	5.5237E-05	0,00061	19	3.19737E-05	-	-	-
E3	0.0004	11	3.2685E-05	0,00229	13	0.000175962	-	-	-
E4	0.0006	7	7.9378E-05	0,00129	11	0.000117614	0.00151	33	4.56631E-05
E5	0.0007	10	6.6023E-05	0,00062	4	0.000155313	0.00113	4	0.000282854
E6	0.0011	7	0.00016342	0,00062	5	0.00012425	0.00281	6	0.000468085
E7	0.0010	6	0.00016016	0,00095	3	0.000315833	0.00112	7	0.0001602
E8	0.0011	1	0.00106553	0,00109	5	0.00021825	0.00049	2	0.000245307
E9	0.0010	9	0.00011549	0,00071	6	0.00011875	0.00039	3	0.000128494
E10	0.0009	11	8.0226E-05	0,00104	6	0.000173333	0.00055	12	4.54735E-05
E11	0.0010	4	0.00025984	0,00127	12	0.000105729	-	-	-
E12	0.0007	3	0.00023315	0,00158	25	0.0000633	-	-	-
E13	0.0004	3	0.00014599	0,00104	15	6.93333E-05	-	-	-
E14	0.0009	5	0.00018696	0,00195	12	0.000162292	0.00078	31	2.51928E-05
E15	0.0009	7	0.00012981	0,00104	13	0.00008	0.00075	3	0.000250313
E16	0.0010	16	6.0876E-05	0,00058	9	6.45833E-05	0.00105	7	0.000150188
E17	0.0009	15	5.8833E-05	0,00111	18	6.13889E-05	0.00026	14	1.82371E-05
E18	0.0008	15	5.2732E-05	0,00088	5	0.0001765	0.00066	13	5.08328E-05
E19	0.0002	6	2.5058E-05	0,00080	3	0.000267917	0.00113	3	0.000377138
E20	0.0004	20	2.1899E-05	0,00107	3	0.000355	0.00051	9	5.61813E-05
E21	0.0008	15	5.3603E-05	0,00096	4	0.000240313	-	-	-
E22	0.0001	19	5.8489E-06	0,00096	8	0.000120156	0.00062	9	6.89751E-05
E23	0.0005	13	3.8719E-05	0,00079	4	0.000197813	0.00111	5	0.000221277
E24	0.0002	8	2.5331E-05	0,00070	3	0.000233333	0.00115	6	0.000191072
E25	0.0004	14	2.8483E-05	0,00156	8	0.000194531	0.00060	8	7.44681E-05

**Annexe 5. Les rapports  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$  des eaux du lac Fetzara.**

Echantillons	Janvier 2011		Mai 2011		Octobre 2011	
	$\text{Na}^+/\text{K}^+$	$\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$	$\text{Na}^+/\text{K}^+$	$\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$	$\text{Na}^+/\text{K}^+$	$\text{Ca}^{++}/\text{Mg}^{++}$
E1	40.690	1.912	37.980	1.079	28.140	0.689
E2	75.240	1.230	50.570	0.574	-	-
E3	38.440	13.280	46.170	0.706	-	-
E4	64.440	26.340	61.030	1.139	31.950	0.479
E5	44.090	5.667	9.832	1.100	17.220	0.803
E6	33.940	1.702	6.172	1.584	7.701	1.833
E7	12.940	61.020	1.863	0.507	4.207	2.571
E8	8.112	8.749	2.608	0.600	6.046	0.641
E9	25.800	11.150	4.567	0.186	4.926	0.154
E10	6.752	1.765	42.33	1.271	5.576	0.345
E11	7.604	0.381	144.400	0.867	-	-
E12	1.998	0.228	158.00	0.740	-	-
E13	14.760	0.932	114.700	0.707	-	-
E14	3.603	5.455	45.690	0.466	72.980	0.307
E15	3.603	1.437	46.110	0.346	9.942	1.065
E16	44.920	0.774	56.420	0.525	25.490	0.708
E17	64.720	0.795	64.560	1.235	91.180	0.325
E18	38.360	0.178	35.800	0.565	75.280	0.577
E19	17.660	0.346	9.548	0.335	99.630	0.524
E20	91.350	1.140	44.750	1.075	66.070	0.099
E21	242.500	1.343	8.980	1.769	-	-
E22	61.800	1.323	98.340	0.198	84.750	0.658
E23	254.400	2.133	59.660	0.282	80.200	0.384
E24	369.500	3.913	11.140	0.151	64.090	0.212
E25	72.430	0.471	40.350	1.559	16.960	0.648

---

---

**Annexe 6. Substances dissoutes solides (TDS) des eaux  
du lac Fetzara (mg/l)**

Echantillons	Janvier 2011	Mai 2011	Octobre 2011
E1	1610	2420	5170
E2	2530	3770	-
E3	1560	2670	-
E4	1360	2340	4370
E5	970	1380	1060
E6	1340	2000	1260
E7	1390	1500	1650
E8	1050	1510	760
E9	790	1930	900
E10	1960	2260	1660
E11	1040	3150	-
E12	3350	6390	-
E13	2290	3840	-
E14	350	3690	4230
E15	2230	3060	960
E16	1540	2320	1160
E17	160	3880	2400
E18	890	1610	2160
E19	1020	1520	810
E20	860	1610	1620
E21	500	1240	-
E22	1073	3070	2210
E23	2120	1450	1430
E24	1840	2660	1750
E25	2080	2700	1810

## Annexes 7. Classe des eaux du lac Fetzara

Echantillons	Janvier 2011		Mai 2011		Octobre 2011		Origines
	S.A.R	Faciès chimique	S.A.R	Faciès chimique	S.A.R	Faciès chimique	
E1	8.116	Na-Cl	8.092	Na-Cl	5.665	Na-Cl	Canal principal
E2	7.836	Na-Cl	12.328	Na-Cl	-	-	Canal principal
E3	8.270	Na-Cl	9.813	Na-Cl	-	-	Canal principal
E4	7.740	Na-Cl	7.440	Na-Cl	7.370	Na-Cl	Canal principal
E5	7.1941	Na-Cl	5.748	Na-HCO <sub>3</sub>	5.788	Na-HCO <sub>3</sub>	puits
E6	6.517	Na-Cl	4.365	Na-HCO <sub>3</sub>	2.570	Na-HCO <sub>3</sub>	Puits
E7	4.003	Na-HCO <sub>3</sub>	3.7505	Na-HCO <sub>3</sub>	1.565	Ca-HCO <sub>3</sub>	Puits
E8	2.332	Na-HCO <sub>3</sub>	4.642	Na-HCO <sub>3</sub>	2.9075	Na-HCO <sub>3</sub>	Puits
E9	3.351	Na-Cl	6.226	Na-HCO <sub>3</sub>	4.322	Na-HCO <sub>3</sub>	puits
E10	5.670	Na-Cl	5.709	Na-HCO <sub>3</sub>	4.264	Na-Cl	Puits
E11	3.110	Na-Cl	5.727	Na-Cl	-	-	Cours d'eau
E12	4.417	Na-HCO <sub>3</sub>	5.929	Na-Cl	-	-	Cours d'eau
E13	4.168	Na-HCO <sub>3</sub>	6.550	Na-Cl	-	-	Cours d'eau
E14	5.400	Na-Cl	6.276	Na-Cl	5.638	Na-Cl	Puits
E15	5.326	Na-Cl	6.072	Na-Cl	3.146	Na-Cl	Cours d'eau
E16	8.403	Na-Cl	4.805	Na-Cl	3.227	Na-Cl	Oued El-Hout
E17	4.966	Na-Cl	4.745	Na-Cl	4.019	Na-Cl	Cours d'eau
E18	7.168	Na-Cl	5.150	Na-Cl	6.958	Na-HCO <sub>3</sub>	Oued Mellah
E19	4.022	Na-Cl	2.126	Na-HCO <sub>3</sub>	4.588	Na-HCO <sub>3</sub>	Puits
E20	6.641	Na-Cl	3.702	Na-HCO <sub>3</sub>	4.9105	Na-HCO <sub>3</sub>	Puits
E21	4.487	Na-Cl	4.964	Na-HCO <sub>3</sub>	-	-	Oued Ziyed
E22	6.316	Na-Cl	4.053	Na-HCO <sub>3</sub>	3.528	Na-HCO <sub>3</sub>	Puits
E23	4.888	Na-Cl	3.676	Na-HCO <sub>3</sub>	4.216	Na-HCO <sub>3</sub>	Puits
E24	4.458	Na-Cl	4.422	Na-HCO <sub>3</sub>	4.935	Na-HCO <sub>3</sub>	Puits
E25	6.087	Na-Cl	8.957	Na-Cl	4.712	Na-HCO <sub>3</sub>	Puits



---

---

## Annexe 8. Méthodes de dosage

- **Dosage des chlorures (Cl<sup>-</sup>)**

### Réactifs nécessaires

- Nitrate d'argent (AgNO<sub>3</sub>) : 0.1N (16.99g d'AgNO<sub>3</sub>/1litre d'eau distillée).
- Chromate de potassium (K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>) à 5%.

### Mode opératoire

- Prélever un aliquote de 10 ml de l'échantillon d'eau et la placer dans une capsule en porcelaine.
- Ajouter 5 gouttes de la solution de K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>.
- Titrer avec AgNO<sub>3</sub> 0.1 N jusqu'à l'apparition d'une couleur rouge brique.
- Effectuer un essai à blanc avec de l'eau distillée.

### Calculs

**V<sub>2</sub>**: Le volume en ml de l'aliquote prélevé.

**n**: La lecture faite à la burette en ml pour l'échantillon.

**n'**: La lecture faite à la burette en ml pour l'essai à blanc.

$$\text{Cl}^- \text{ (meq/l)} = (n - n')(0.1/V_2) \times 100$$

### Dosage des sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

#### Réactifs nécessaires

- Chlorure de baryum (BaCl<sub>2</sub>) :(100 g de BaCl<sub>2</sub> /1litre d'eau distillée).
- Nitrate d'argent (AgNO<sub>3</sub>): 0.1N.

#### Mode opératoire

- Prélever une aliquote de 10 ml de l'échantillon d'eau dans un bécher et le porter à une douce ébullition à 60°C.

-Précipiter l'ion  $\text{SO}_4^{--}$  avec une solution chaude de  $\text{BaCl}_2$  à 10%. La précipitation doit être faite très lentement, en ajoutant le réactif ( $\text{BaCl}_2$ ) goutte à goutte.

-Placer le bécher sur une plaque chauffante et attendre que les sulfates soient complètement déposés.

-Décanté la liqueur sur un filtre sans cendre placé sur un entonnoir.

-Reprendre le précipité resté dans un bécher et rincer le avec l'eau distillée bouillante et filtrer à nouveau par décantation.

-Répéter cette opération trois fois, puis faire passer le précipité sur le filtre et laver à l'eau bouillante jusqu'à la disparition complète de  $\text{BaCl}_2$  dans les eaux de lavage (vérifier la réaction avec  $\text{AgNO}_3$ ).

-Prendre le filtre et le faire sécher dans une étuve à une faible température ( $50^\circ$ ), puis placer –le dans une capsule en porcelaine préalablement peser.

-Placer le tout dans un four à moufle à  $500^\circ\text{C}$  et laisser le filtre se carboniser pendant 30 minutes .Après refroidissement, peser à nouveau la capsule.

### Calculs

A : Le poids du précipité de  $\text{BaCl}_2$  en mg.

$V_2$  : Le volume de l'aliquote en ml.

1g de  $\text{BaCl}_2$   $\longrightarrow$  0.411g de  $\text{SO}_4^{--}$

$\text{SO}_4^{--}/\text{BaSO}_4 = 0.411$  et qui va correspondre à 8.56 meq de  $\text{SO}_4^{--}$

$$\text{SO}_4^{--} (\text{meq/l}) = A \times 8.56 \times \frac{100}{V_2}$$

### Dosage des carbonates ( $\text{CO}_3^{--}$ ) et bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )

#### Réactifs nécessaires

-Acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ): 0.02N (0.56 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ /1 litre d'eau distillée).

-Orange de méthylène à 0.01%.

-Phénophtaléine à 1% (10 g de phénophtaléine/1litre d'alcool éthylique "éthanol").

### Mode opératoire

-Prélever une aliquote de 10 ml de l'échantillon d'eau et la placer dans une capsule en porcelaine.

-Ajouter 2 gouttes de phénophtaléine. En présence des carbonates la couleur devient rouge claire.

-Titrer avec l'acide sulfurique à 0.02N jusqu'à ce que la couleur rouge disparaisse.

-Noter la quantité d'acide utilisé (X).

-Ajouter 2 gouttes de méthyle orange à la même solution, puis titrer avec toujours de l'acide sulfurique à 0.02N jusqu'à l'apparition de la couleur rose.

-Noter la nouvelle lecture sur la burette (Y).

### Calculs

$$\text{CO}_3^- \text{ meq/l} = \frac{2X \cdot \text{normalité de H}_2\text{SO}_4}{\text{volume d aliquote}} \times 1000$$

$$\text{HCO}_3^- \text{ meq/l} = \frac{(Y - 2X) \cdot \text{normalité de H}_2\text{SO}_4}{\text{volume d aliquote}} \times 1000$$

- **Dosage des cations**

#### Dosage du calcium (Ca<sup>++</sup>)

Réactifs nécessaires

-NaOH (2N).

-EDTA (0,02):7.448g d'EDTA/1litre d'eau distillée.

Mode opératoire

-Prélever 50 ml de l'échantillon d'eau et placer la dans un erlen.

-Ajouter 1ml de NaOH (2N).

-Puis ajouter 10 ml de Muréxide.

-Titrer avec l'EDTA (0.02) jusqu'à l'apparition d'une couleur violette.

### Calculs

$$N_1 \cdot V_1 = N_2 \cdot V_2$$

$V_1$ : Prise d'essai

$N_2$ : Normalité EDTA (0,02N).

$V_2$ : Volume d'EDTA.

$$N/1000 = 1 \text{ meq/l.}$$

$$N_1 = (0,02N \cdot V_2) / 50 = N \cdot V_2 / 2500 = N \cdot V_2 / 1000 \cdot 2.5 = V_2 / 2.5$$

$\text{Ca}^{++} (\text{meq/l}) = \frac{V_2}{2.5}$
---

### Dosage du magnésium ( $\text{Mg}^{++}$ ) par complexométrie

#### Réactifs nécessaires :

- $\text{NH}_4\text{OH}$  (6N): 238.69 ml de  $\text{NH}_4\text{OH}$  /1litre d'eau distillée.

-Noir d'eriochrome T: 0.02 g de NET + 2g de NaCl/1 litre d'eau distillée.

-EDTA (0.02N).

#### Mode opératoire

-Prélever 50 ml de l'échantillon d'eau et placer –la dans un erlen.

-Ajouter 1ml de  $\text{NH}_4\text{OH}$  (6N).

-Puis ajouter 10 ml de NET.

-Titrer avec l'EDTA 0.02N jusqu'à l'apparition d'une couleur bleue cobalt.

### Calculs

$$N_1 V_1 = N_2 \cdot V_2$$

$$\text{TH} = V_2 / 2.5$$

$$\text{Mg}^{++} \text{ (meq/l)} = \text{TH-Ca}^{++} \text{ (meq/l)}$$

### **Dosage du sodium par ( $\text{Na}^+$ ) et du potassium ( $\text{K}^+$ ) par spectrophotomètre à flamme**

#### **Gamme étalon du sodium ( $\text{Na}^+$ )**

##### **Solution mère**

254 mg de NaCl /1000 ml d'eau distillée.

##### **Solution filles**

A partir de la solution mère, préparée une série de solution (2 ppm, 4 ppm, 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm, 30 ppm).

Introduire successivement 2 ml de solution mère dans une fiole de 100 ml, 4 ml dans une deuxième, 10ml dans une troisième, 15 ml dans une quatrième, 20 ml dans une cinquième, 30 ml dans une sixième, et compléter le volume avec l'eau distillée.

#### **Gamme étalon du potassium ( $\text{K}^+$ )**

##### **Solution mère**

190,8 mg de KCl/1000 ml d'eau distillée.

##### **Solution filles**

Pour la préparation des solutions filles, mêmes principe de la préparation des solutions filles du sodium avec des concentrations, 2 ppm, 4 ppm, 10 ppm, 15 ppm, 20 ppm, 30 ppm.

#### **Dosage par spectrophotomètre à flamme**

Le réglage du zéro de l'appareil se fait avec l'eau distillée.

L'étalonnage de l'appareil se fait par les gammes étalons selon l'élément à doser ( $\text{Na}^+$  ou  $\text{K}^+$ ).

La lecture de la concentration des échantillons doit être inférieure à la concentration maximale de la gamme étalon .Dans le cas contraire, faire des dilutions.

## Calculs

Noter les lectures obtenues ( $Y_2, Y_4, Y_{10}, Y_{15}, Y_{20}, Y_{30}$ ) de chaque concentration des solution de la gamme étalon ( $X_2, X_4, X_{10}, X_{15}, X_{20}, X_{30}$ ).

Calculer le coefficient C (densité optique en ppm).

$$C = \frac{Y_2 + Y_4 \dots \dots \dots + Y_{30}}{X_2 + X_4 \dots \dots \dots + X_{30}}$$

L : la lecture obtenue de l'échantillon.

C : la densité optique en ppm.

D : l'inverse du rapport de dilution.

$\text{La teneur de l'élément meq/l} = \frac{L}{D} \times D \times A$
---

Pour le sodium  $A=1/22.99$

Pour le potassium  $A=1/39$

## Dosage des Bromures ( $\text{Br}^-$ ) par la méthode colorimétrique

### Réactifs

- Réactif fushiné

Verser 10 ml d'une solution récente de fuchsine à 1‰ dans 100 ml d'acide sulfurique au 1/20, préparé en mélangeant 5 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentré avec de l'eau en quantité suffisante pour obtenir 100 ml et en laissant refroidir. Le mélange se décolore peu à peu. En une heure environ, il est prêt pour l'emploi.

- Chloroforme privé d'alcool.

Purifier le chloroforme de l'alcool par 3 lavages à l'eau distillée pour éviter ainsi la réduction par l'alcool du mélange sulfo-chromique, dont l'action serait dans ce cas atténuée.

- Solution de chromate à 10%.
- Acide chlorhydrique pur.
- Acide sulfurique pur.

- Solution mère étalon de brome à 1g/l.  
Bromure de potassium.....1.487 g  
Eau distillée.....100 ml.
- Solution fille étalon de brome à 0.001 g/l.

Amener 1 ml de la solution mère à 100 ml avec de l'eau distillée.

Etablissement de la courbe d'étalonnage

Dans une série de tubes à essais numérotés, introduire successivement les réactifs suivants en agitant après chaque addition :

Numéro des tubes	T	I	II	III	IV	V	VI
Solution de brome à 0,001 g/l (ml).....	0	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Eau distillée (ml).....	5	4.95	4.9	4.8	4.7	4.6	4.5
Acide chlorhydrique (gouttes)	4	4	4	4	4	4	4
Acide sulfurique (ml).....	1	1	1	1	1	1	1
Correspondance en mg/l de Brome.....	0	0.01	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1

Refroidir sous courant d'eau froide jusqu'à 15°C environ. Verser le contenu des tubes à essais dans une série d'ampoules à décanter de 50 ml numérotées et ajouter dans l'ordre indiqué.

Numéro des ampoules	T	I	II	III	IV	V	VI
Chloroforme (ml).....	3	3	3	3	3	3	3
Solution de chromate (gouttes)	8	8	8	8	8	8	8
Solution de fuchsine décolorée (ml).....	2	2	2	2	2	2	2

Agiter fortement. Le chloroforme se sépare coloré en rouge. Décanter la solution chloroformique dans une série de tubes à essais numérotés.

Effectuer la lecture au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 470 nm.

Tracer la courbe d'étalonnage.