

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA  
UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR  
ANNABA



جامعة باجي مختار  
- عنابة -

Faculté des Sciences

Année : 2019/2020

Département de Biologie

# THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat

**TRANSFERT DE L'AZOTE ET DISTRIBUTION DE  
SES PROCESSUS PHYSICO-CHIMIQUES ET  
BIOLOGIQUES DANS LE LAC FETZARA**

**Option**

Protection, conservation et valorisation des ressources naturelles

**Par**

**BOULAKSA Khaoula**

**DIRECTEUR DE THÈSE :** LAIFA Aziz Prof U.B.M. Annaba

Devant le jury

**PRESIDENT :** BENSLAMA Mohamed Prof U.B.M. Annaba

**EXAMINATEUR :** HOUHAMDI Moussa Prof U.8 Mai 45. Guelma

**EXAMINATRICE :** TREA Saliha M.C.A U.B.M. Annaba

**EXAMINATRICE :** FEKRACHE Fadila M.C.A U. 20 Août 55. Skikda

## **RESUME**

Par sa taille et sa spécificité, la zone humide Ramsar du Lac Fetzara est représentative du type rare de zone humide naturelle de la région méditerranéenne. L'activité agropastorale pratiquée dans sa zone périphérique, les rejets industriels et urbains constituent des sources potentielles de pollution de ce lac par les éléments nutritifs.

Notre objectif est d'étudier les matières azotées dans les eaux (superficielles et souterraines) et les sédiments du Lac Fetzara, en cherchant leurs sources, leurs quantifications, leurs transferts, leurs transformations, et leurs impacts sur le lac lui-même et sur son environnement.

Par une approche physico-chimique spatio-temporelle, les résultats analytiques des eaux et des sédiments obtenus montrent des concentrations importantes en ion ammonium, avec des valeurs maximales dans les points qui reçoivent des eaux résiduaires urbaines, alors que les concentrations les plus élevées en ions nitrate et nitrite sont enregistrées dans la partie centrale et les points situés dans la partie Est et Sud du lac.

La variation saisonnière des différentes formes d'azote est sous l'influence des conditions climatiques (température, précipitation et évaporation), physico-chimiques (pH et oxygène dissous) et biochimiques (nitrification, dénitrification et ammonification). Cette variation, se traduit par la transformation de l'azote en forme nitrate dans les conditions oxydantes et en forme ammonium dans les conditions réduites avec une étape vers la forme nitrite.

L'effet de la pollution agricole, industrielle et urbaine qui touche la zone humide du Lac Fetzara est traduit par une augmentation considérable de la concentration en azote dans les eaux et les sédiments pendant la deuxième année d'étude. Le niveau de cette pollution varie spatialement selon la distance d'éloignement de la source de pollution et par rapport à la saison (humide ou sèche) et aux années 2015 et 2016.

**Mots clés :** Matières azotées, Eaux, Sédiments, Transformation, Pollution, Lac Fetzara, Zone humide.

## **ABSTRACT**

By its size and specificity, the Lake Fetzara Ramsar wetland is representative of the rare type of natural wetland in the Mediterranean region. The agropastoral activity practiced in its peripheral zone, industrial and urban discharges constitute potential sources of nutrient pollution of this lake.

Our objective is to study the nitrogenous materials in the waters (surface and underground water) and sediments of Lake Fetzara, looking for their sources, their quantification, their transfers, their transformations, and their impacts on the lake itself and on its environment.

By a spatio-temporal physico-chemical approach, the analytical results of the waters and sediments obtained show high concentrations of ammonium ion, with maximum values in the points that receive urban wastewater, while the highest concentrations of nitrate and nitrite ions are recorded in the central part and the points located in the eastern and southern part of the lake.

The seasonal variation of the different forms of nitrogen is under the influence of climatic (temperature, precipitation and evaporation), physico-chemical (pH and dissolved oxygen) and biochemical (nitrification, denitrification and ammonification) conditions. This variation results in the transformation of nitrogen into the nitrate form under oxidizing conditions and into the ammonium form under reduced conditions with a step towards the nitrite form.

The effect of agricultural, industrial and urban pollution affecting the Lake Fetzara wetland is reflected in a considerable increase in nitrogen concentration in the water and sediment during the second year of the study. The level of this pollution varies spatially according to the distance from the source of pollution and in relation to the season (wet or dry) and the years 2015 and 2016.

**Key words:** Nitrogenous materials, Water, Sediments, Transformation, Pollution, Lake Fetzara, Wetland.

## ملخص

بحجمها وخصوصيتها ، تعد الأرض الرطبة رامسار لبحيرة فزارة مثالا للنوع النادر من الأرض الرطبة الطبيعية لمنطقة البحر الأبيض المتوسط. يشكل النشاط الزراعي الرعوي الذي يمارس في المنطقة المحيطة بها، والنفايات الصناعية والحضرية، مصادر محتملة لتلوث هذه البحيرة بالمواد المغذية.

هدفنا هو دراسة المواد النيتروجينية في مياه (السطحية والجوفية) وفي رواسب بحيرة فزارة ، من خلال البحث عن مصادرها ، كمياتها ، تنقلاتها ، تحولاتها ، وتأثيراتها على البحيرة نفسها وعلى محيطها.

باستخدام نهج فيزيو- كيميائي مكاني- زمني ، تظهر النتائج التحليلية للمياه والرواسب التي تم الحصول عليها تراكيز عالية من أيون الأمونيوم ، أين نسجل قيم قصوى له في النقاط التي تزود بمياه الصرف الصحي الحضري ، بينما نجد أعلى تراكيز لأيونات النترات والنترت في الجزء الأوسط والنقاط الواقعة في الجزء الشرقي والجنوبي من البحيرة.

يتأثر التباين الموسمي لأشكال النيتروجين المختلفة بالظروف المناخية (درجة الحرارة ، التساقط والتبخر) ، الفيزيو- كيميائية (درجة الحموضة والأكسجين) والظروف البيو- كيميائية (النترجة ، نزع النيتروجين ، التحلل). ينتج عن هذا الاختلاف تحويل النيتروجين إلى شكل نترات تحت الظروف المؤكسدة وإلى شكل أمونيوم في ظل الظروف المرجعة مع مرحلة نحو تشكل النترت.

ينعكس التلوث الزراعي ،الصناعي والحضري الذي يؤثر على الأرض الرطبة لبحيرة فزارة في زيادة كبيرة لتراكيز النيتروجين في الماء و في الرواسب خلال السنة الثانية من الدراسة. ويختلف مستوى هذا التلوث مكانياً حسب بعد المسافة عن مصدر التلوث ، وحسب الموسم (رطب أو جاف) السنوات 2015 و2016.

**الكلمات المفتاحية:** مادة نيتروجينية، ماء ، رواسب ، تحول ، تلوث ، بحيرة فزارة ، أرض رطبة.

## **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 **LAIFA Aziz** 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 témoignée de m'avoir initiée 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 à Monsieur le Professeur **BENSLAMA Mohamed**, de l'université de Annaba, pour avoir bien voulu s'intéresser à ce travail et d'avoir accepté de me faire le grand honneur de présider le jury de ma soutenance de thèse.*

*Je tiens également à remercier **Mr HOUHAMDI Moussa**, Professeur à l'université 8 Mai 1945 Guelma qui a accepté de participer en qualité de membre examinateur pour évaluer ce travail.*

*Je dois aussi remercier vivement Madame **TREA Saliha**, Maitre de conférences A à l'université Badji Mokhtar d'Annaba d'avoir accepté de faire partie du jury en tant qu'examinatrice.*

*Madame **FEKRACHE Fadila**, Maitre de Conférences A à l'université 20 Août 1955 de Skikda, a accepté d'évaluer ce travail en tant membre examinateur du jury. Je la remercie vivement.*

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

*Enfin je remercie affectueusement toute ma famille.*

*En bref, merci à tous!*

## ***Dédicace***

*Je dédie ce travail à l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, à toi mon père.*

*J'exprime mon immense gratitude à la source de mes efforts, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à tous mes sœurs.*

*A mon marie Farid, ma petite fille Nada*

## TABLE DES MATIÈRES

Résumé.....	I
Abstract.....	II
ملخص.....	III
Remerciement.....	IV
Dédicace.....	V
Table des matières.....	VI
Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux.....	XIII
Introduction générale.....	1

### Chapitre I. L'azote dans les milieux aquatiques continentaux

1. Les différentes formes chimiques de l'azote.....	3
2. Le cycle de l'azote.....	4
2.1. Le cycle général de l'azote.....	4
2.1.1. La fixation de l'azote.....	5
2.1.2. Assimilation de l'azote par les êtres vivants.....	5
2.1.3. L'ammonification ou minéralisation de l'azote organique.....	5
2.1.3.1. Facteurs influençant la minéralisation de l'azote organique.....	6
2.1.4. La nitrification.....	6
2.1.4.1. Importance de la nitrification.....	7
2.1.4.2. Facteurs influençant la nitrification.....	7
2.1.5. La dénitrification.....	8
2.1.5.1 Facteurs influençant la dénitrification.....	9
2.1.6. Réduction dissimilative des nitrates en ammonium (RDNA).....	9
2.2. Le sous - cycle de l'azote dans les zones humides.....	10
3. Origine de différentes formes de l'azote.....	11
4. Les processus de transfert et de transformation de l'azote dans les bassins versants.....	12
5. Les conséquences environnementales de la pollution azotée.....	13
5.1. Changement climatique.....	14
5.2. Acidification du sol.....	14
5.3. La dégradation de la qualité des eaux.....	15
5.4. Risques sanitaires liés à l'excès d'ions nitrate et nitrite.....	15

Conclusion.....	16
-----------------	----

## **Chapitre II. Présentation de la zone d'étude**

1. Situation géographique.....	18
2. Géologie et géomorphologie.....	19
2.1 Géologie.....	19
2.2. Géomorphologie.....	21
3. Hydrologie et hydrogéologie.....	22
3.1. Hydrologie.....	22
3.2. Hydrogéologie.....	24
4. Les sols du Lac Fetzara.....	25
4. 1. Les sols peu évolués.....	25
4. 2. Les vertisols.....	26
4. 3. Les sols hydromorphes.....	26
4. 4. Les sols halomorphes.....	26
5. Occupation du sol.....	27
5.1. Occupation agricole.....	27
5. 2. Occupation urbaine.....	28
5.3. Occupation industrielle.....	29
6. Sources de pollution dans la zone d'étude.....	29
7. Synthèse climatique.....	31
7.1. Le régime thermique.....	31
7.2. Le régime pluviométrique.....	32
7.3. Diagramme pluviothermique.....	33
7.4. L'humidité relative .....	33
7.5. Le vent.....	34
7.6. L'évaporation.....	35
7.7. Le bilan hydrique.....	35

7.7.2. Le bilan hydrique.....	37
7.8. L'indice d'aridité de Martonne (1926).....	39
Conclusion.....	40

### **Chapitre III. Matériel et méthodes**

1. Echantillonnage.....	42
1.1. Points de prélèvements.....	42
1.2. Période de prélèvement.....	44
1.3. Echantillonnage.....	44
1.3.1. Prélèvement des échantillons.....	44
1.3.2. Traitements et conservation des échantillons.....	44
2. Analyses au laboratoire.....	45
2.1. Analyse des eaux (superficielles et souterraines).....	45
2.2. Analyse des sédiments.....	45
3. Analyse statistique des résultats obtenus.....	46

### **Chapitre IV. Résultats et discussion**

1. Etude des eaux.....	47
1.1. La température (T).....	47
1.1.1. La température dans les eaux superficielles.....	47
1.1.2. La température dans les eaux souterraines.....	47
1.2. Le potentiel d'hydrogène (pH).....	48
1.2.1. Le pH des eaux superficielles.....	48
1.2.2. Le pH des eaux souterraines.....	49
1.3. La conductivité électrique.....	50
1.3.1. La conductivité électrique des eaux superficielles.....	50
1.3.2. La conductivité électrique des eaux souterraines.....	51
1.4. L'ion chlorure.....	52
1.4.1. Les ions chlorure dans les eaux superficielles.....	52
1.4.2. Les ions chlorure dans les eaux souterraines.....	53
1.5. L'ion nitrate.....	54

1.5.1. Les ions nitrate dans les eaux superficielles.....	54
1.5.2. Les ions nitrate dans les eaux souterraines.....	55
1.6. L'ion ammonium.....	56
1.6.1. Les ions ammonium dans les eaux superficielles.....	56
1.6.2. Les ions ammonium dans les eaux souterraines.....	57
1.7. L'ion nitrite.....	58
1.7.1. Les ions nitrite dans les eaux superficielles.....	59
1.7.2. Les ions nitrite dans les eaux souterraines.....	59
1.8. L'oxygène dissous.....	60
1.8.1. L'oxygène dissous dans les eaux superficielles.....	60
1.8.2. L'oxygène dissous dans les eaux souterraines.....	61
2. Etude des sédiments.....	62
2.1. Le pH.....	62
2.2. La conductivité électrique.....	63
2.3. La texture.....	64
2.4. Le carbone organique.....	65
2.5. La matière organique.....	66
2.6. L'ion nitrate.....	67
2.7. L'ion ammonium.....	68
3. Etude statistiques.....	69
3.1. Analyse en composantes principales (ACP).....	69
3.1.1. Les eaux superficielles du Lac Fetzara.....	70
3.1.1.1. Saison humide.....	70
3.1.1.2. Saison sèche.....	73
3.1.2. Les eaux souterraines du Lac Fetzara.....	75
3.1.2.1. Saison humide.....	75
3.1.2.2. Saison sèche.....	77
3.1.3. Les sédiments du Lac Fetzara.....	79
3.1.3.1. Saison humide.....	79

3.1.3.2. Saison sèche.....	81
3.2. Test <i>t</i> de Student.....	83
3.2.1. Comparaison des moyennes des paramètres mesurés entre les deux saisons (humide et sèche) dans les points d'eau et les sédiments du lac Fetzara.....	83
3.2.2. Comparaison des moyennes des paramètres mesurés entre les deux années 2015 et dans les eaux et les sédiments du lac Fetzara.....	95
4. Discussion.....	97
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>103</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>107</b>

## LISTE DES FIGURE

### Chapitre I. L'azote dans les milieux aquatiques continentaux

Figure 1. Le cycle global de l'azote.....	4
Figure 2. Le sous cycle de l'azote dans les zones humides.....	11

### Chapitre II. Présentation de la zone d'étude

Figure 3. Situation géographique du lac Fetzara.....	18
Figure 4. Coupes géologiques entre Ain Berda et l'Edough, passant par le lac Fetzara.....	20
Figure 5. Le bassin versant du lac Fetzara.....	24
Figure 6. Nappes entourant le Lac Fetzara.....	25
Figure 7. Carte pédologique de la région d'Annaba.....	27
Figure 8. Relation du lac Fetzara avec les sources de pollution.....	30
Figure 9. Présentation des données thermiques de la région d'Annaba.....	32
Figure 10. Présentation des données pluviométriques de la région d'Annaba.....	32
Figure 11. Diagramme pluviométrique.....	33
Figure 12. Humidité relative.....	34
Figure 13. Vitesse des vents.....	35
Figure 14. Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite.....	39

### Chapitre III. Matériel et méthodes

Figure 15. Localisation des points d'échantillonnage des eaux et des sédiments dans le Lac Fetzara.....	43
---	----

### Chapitre IV. Résultats et discussion

Figure 16. Variation de la température des eaux superficielles du Lac Fetzara.....	47
Figure 17. Variation de la température des eaux souterraines du Lac Fetzara.....	48
Figure 18. Variation du pH des eaux superficielles du Lac Fetzara.....	49
Figure 19. Variation du pH des eaux souterraines du Lac Fetzara.....	49
Figure 20. Variation de la conductivité électrique des eaux superficielles du Lac Fetzara.....	51
Figure 21. Variation de la conductivité électrique des eaux souterraines du Lac Fetzara.....	51
Figure 22. Variation de la concentration en ion chlorure dans les eaux superficielles du Lac Fetzara.....	53
Figure 23. Variation de la concentration en ion chlorure dans les eaux souterraines du Lac Fetzara.....	53

<b>Figure 24.</b> Variation de la concentration en ion nitrate dans les eaux superficielles du Lac Fetzara.....	55
<b>Figure 25.</b> Variation de la concentration en ion nitrate dans les eaux souterraines du Lac Fetzara.....	55
<b>Figure 26.</b> Variation de la teneur en ion ammonium dans les eaux superficielles du Lac Fetzara.....	57
<b>Figure 27.</b> Variation de la concentration en ion ammonium dans les eaux souterraines du Lac Fetzara.....	58
<b>Figure 28.</b> Variation de la concentration en ion nitrite dans les eaux superficielles du Lac Fetzara.....	59
<b>Figure 29.</b> Variation de la concentration en ion nitrite dans les eaux souterraines du Lac Fetzara.....	60
<b>Figure 30.</b> Variation de la concentration en oxygène dissous dans les eaux superficielles du Lac Fetzara.....	61
<b>Figure 31.</b> Variation de la concentration en oxygène dissous dans les eaux souterraines du Lac Fetzara.....	62
<b>Figure 32.</b> Variation du pH des sédiments du Lac Fetzara.....	63
<b>Figure 33.</b> Variation de la conductivité électrique dans les sédiments du Lac Fetzara.....	63
<b>Figure 34.</b> Distribution des fractions granulométriques des sédiments du Lac Fetzara.....	64
<b>Figure 35.</b> Variation de la teneur en carbone organique dans les sédiments du Lac Fetzara.....	65
<b>Figure 36.</b> Variation de la teneur en matière organique dans les sédiments du Lac Fetzara.....	67
<b>Figure 37.</b> Variation de la teneur en ion nitrate dans les sédiments du Lac Fetzara.....	68
<b>Figure 38.</b> Variation de la teneur en ion ammonium dans les sédiments du Lac Fetzara.....	69
<b>Figure 39.</b> Répartition des paramètres et des points d'eau superficielle sur le plan factoriel en saison humide.....	72
<b>Figure 40.</b> Répartition des paramètres et des points d'eau superficielle sur le plan factoriel en saison sèche.....	75
<b>Figure 41.</b> Répartition des paramètres et des points d'eau souterraine sur le plan factoriel en saison humide.....	77
<b>Figure 42.</b> Répartition des paramètres et des points d'eau souterraine sur le plan factoriel en saison sèche.....	79
<b>Figure 43.</b> Répartition des paramètres et des points de sédiments sur le plan factoriel en saison humide.....	81
<b>Figure 44.</b> Répartition des paramètres et des points de sédiments sur le plan factoriel en saison sèche.....	83

## LISTE DES TABLEUX

### Chapitre I. L'azote dans les milieux aquatiques continentaux

<b>Tableau 1.</b> Problèmes causés par les composés azotés.....	14
---	----

### Chapitre II. Présentation de la zone d'étude

<b>Tableau 2.</b> Répartition de la superficie des formations topographiques du lac Fetzara.....	22
<b>Tableau 3.</b> Superficie du bassin versant du lac Fetzara.....	22
<b>Tableau 4.</b> Distribution des différentes classes de sols.....	25
<b>Tableau 5.</b> Températures moyennes mensuelles (les Salines 1980-2014).....	31
<b>Tableau 6.</b> Précipitations moyennes mensuelles (les Salines 1980-2014).....	32
<b>Tableau 7.</b> Moyennes mensuelles de l'humidité relative (les Salines 1984-2013).....	34
<b>Tableau 8.</b> Moyennes mensuelles de la vitesse des vents (les Salines 1984-2013).....	34
<b>Tableau 9.</b> Evaporation moyennes mensuelles (les Salines 1982-2011).....	35
<b>Tableau 10.</b> ETP selon la formule de Thornthwaite à la station des Salines (1980-2014).....	37
<b>Tableau 11.</b> Bilan hydrique selon la méthode de C. W Thornthwaite.....	38
<b>Tableau 12.</b> Indices d'aridité de Martonne (1926) de la station d'Annaba (1981-2011).....	40

### Chapitre III. Matériel et méthodes

<b>Tableau 13.</b> Données GPS des points d'échantillonnage.....	43
--	----

### Chapitre IV. Résultats et discussion

<b>Tableau 14.</b> Classe de la minéralisation des eaux d'après la conductivité électrique.....	50
<b>Tableau 15.</b> Les différentes classes texturales des sédiments du Lac Fetzara.....	65
<b>Tableau 16.</b> Statistique descriptive pour la physico-chimie des eaux superficielles du Lac Fetzara (saison humide).....	70
<b>Tableau 17.</b> Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimique des eaux superficielles du Lac Fetzara (saison humide).....	71
<b>Tableau 18.</b> Statistique descriptive pour la physico-chimie des eaux superficielles du Lac Fetzara (saison sèche).....	73
<b>Tableau 19.</b> Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimique des eaux superficielles du Lac Fetzara (saison sèche).....	73
<b>Tableau 20.</b> Statistique descriptive pour la physico-chimie des eaux souterraines du Lac Fetzara (saison humide).....	75
<b>Tableau 21.</b> Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimique des eaux souterraines du Lac Fetzara (saison humide).....	76

<b>Tableau 22.</b> Statistique descriptive pour la physicochimie des eaux souterraines du Lac Fetzara (saison sèche).....	77
<b>Tableau 23.</b> Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimique des eaux souterraines du Lac Fetzara (saison sèche).....	78
<b>Tableau 24.</b> Statistique descriptive pour la physico-chimie des sédiments du Lac Fetzara (saison humide).....	79
<b>Tableau 25.</b> Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimique des sédiments du Lac Fetzara (saison humide).....	80
<b>Tableau 26.</b> Statistique descriptive pour la physico-chimie des sédiments du Lac Fetzara (saison sèche).....	81
<b>Tableau 27.</b> Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimique des sédiments du Lac Fetzara (saison sèche).....	82
<b>Tableau 28.</b> Test <i>t</i> de Student du point 1.....	84
<b>Tableau 29.</b> Test <i>t</i> de Student du point 2.....	84
<b>Tableau 30.</b> Test <i>t</i> de Student du point 5.....	85
<b>Tableau 31.</b> Test <i>t</i> de Student du point 7.....	85
<b>Tableau 32.</b> Test <i>t</i> de Student du point 9.....	86
<b>Tableau 33.</b> Test <i>t</i> de Student du point 13.....	86
<b>Tableau 34.</b> Test <i>t</i> de Student pour les paramètres mesurés en saisons humide et sèche des eaux superficielles du Lac Fetzara.....	87
<b>Tableau 35.</b> Test <i>t</i> de Student du point 3.....	88
<b>Tableau 36.</b> Test <i>t</i> de Student du point 4.....	88
<b>Tableau 37.</b> Test <i>t</i> de Student du point 6.....	89
<b>Tableau 38.</b> Test <i>t</i> de Student du point 8.....	89
<b>Tableau 39.</b> Test <i>t</i> de Student du point 10.....	90
<b>Tableau 40.</b> Test <i>t</i> de Student du point 11.....	90
<b>Tableau 41.</b> Test <i>t</i> de Student du point 12.....	91
<b>Tableau 42.</b> Test <i>t</i> de Student pour les paramètres mesurés en saisons humide et sèche des eaux souterraines.....	91
<b>Tableau 43.</b> Test <i>t</i> de Student du point 1.....	92

<b>Tableau 44.</b> Test <i>t</i> de Student du point 2 .....	92
<b>Tableau 45.</b> Test <i>t</i> de Student du point 5.....	93
<b>Tableau 46.</b> Test <i>t</i> de Student du point 7 .....	93
<b>Tableau 47.</b> Test <i>t</i> de Student du point 9 .....	94
<b>Tableau 48.</b> Test <i>t</i> de Student du point 13.....	94
<b>Tableau 49.</b> Test <i>t</i> de Student pour les paramètres mesurés en saisons humide et sèche des sédiments.....	95
<b>Tableau 50.</b> Test <i>t</i> de Student des paramètres mesurés en deux années (2015, 2016) d'étude dans les eaux et les sédiments du lac Fetzara.....	96

# **INTRODUCTION**

## **INTRODUCTION**

Les zones humides sont des terres de transition entre les écosystèmes aquatiques et les écosystèmes terrestres (Raven et Berge, 2009). Elles constituent des écosystèmes remarquables qui remplissent des fonctions essentielles (Dajoz, 2008). Elles sont le siège d'interactions entre les grands compartiments qui la composent : l'eau, les sédiments (ou les sols) et les organismes vivants. Ces interactions se manifestent par des flux d'énergie, d'eau et de matières entre ces compartiments (Fustec et Lefèvre, 2000).

L'eau joue un rôle primordial dans la formation et l'évolution des milieux humides. Le niveau de l'eau, la fréquence et la durée de submersions, l'importance et la direction des différents flux sont autant de facteurs qui conditionnent la genèse des sols et leur fonctionnement biogéochimique (Bernaud et Fustec, 2007).

Le sédiment constitue aussi un compartiment dynamique et essentiel dans les écosystèmes humides (Flück et *al.*, 2012). Cependant, les contaminants liés aux sédiments ne doivent pas être négligés, car ils sont susceptibles de contribuer à la détérioration de la qualité chimique et écologique des eaux superficielles (Casado et *al.*, 2016).

L'azote est un élément essentiel de la vie (Savary, 2010). Il est relativement abondant dans la biosphère où il circule sous des formes minérales et organiques à l'état particulaire, dissous et gazeux. L'azote sous différentes formes peut être immobilisé et stocké dans les milieux humides (Bernaud et Fustec, 2007). Sa présence excessive dans les eaux, en particulier sous la forme d'ions nitrate, nitrite et d'ammonium, pose un problème de pollution et d'écotoxicité (Bordet, 2007). La pollution azotée des eaux naturelles est liée principalement aux activités domestiques, agricoles et industrielles (Doré, 1989). Certains composés d'azote peuvent causer de graves dommages dans les différents réservoirs de l'environnement (Sigg et *al.*, 2006). La présence des ions nitrate en quantité importante dans les eaux superficielles et souterraines contribue respectivement à l'eutrophisation des milieux aquatiques et à une dégradation de la ressource en eau (Savary, 2010). Les ions nitrate peuvent être à l'origine de la formation d'ions nitrite et de nitrosamines, responsables de deux phénomènes potentiellement pathologiques : méthémoglobinémie et cancer (Rouyre, 2003).

La position géographique de l'Algérie, sa configuration physique et la diversité de son climat lui confèrent une importante richesse en zones humides, notamment dans la partie Nord-Est (DGF, 2003). L'intérêt de ces zones humides algériennes vient du fait qu'elles occupent une

position stratégique sur les deux grandes voies de migrations internationales et qu'elles constituent des sites d'hivernage et de reproduction de première importance entre la mer méditerranée et le Sahara (Rabah, 2005). Toutefois, ces ressources sont menacées et font l'objet des perturbations parfois irréversibles (urbanisation, surpâturage, pollution, pêche, etc...) (Rhazi et *al.*, 2011).

Par sa taille et sa spécificité, le Lac Fetzara est l'un des plus importants lacs de l'extrême Nord-Est algérien. Elles lui ont permis son inscription officielle sur la liste des zones humides d'importance internationale (Ramsar) (Habes, 2013). Le Lac Fetzara constitue le site de nidification et d'hivernage le plus important de l'Est. Il accueille en moyenne plus de 30000 oiseaux d'eau en hiver (DGF, 2003).

Dans la région du Lac Fetzara, la chimie des eaux est souvent influencée par l'effet de la dissolution des formations géologiques, de l'évaporation, des rejets industriels et urbains, ainsi que par l'activité agricole (Zahi, 2013). Dans ces conditions particulières, ce lac est présent comme un siège d'importation et d'exportation de diverses matières minérales et organiques subissant ou non des transformations par des processus physico-chimiques et biologiques.

Dans ce contexte, l'objectif de notre travail est d'étudier, par une approche d'analyse physicochimique spatio-temporelle, les matières azotées dans les eaux superficielles et souterraines et dans les sédiments du Lac Fetzara, en cherchant leurs sources, leurs quantifications, leurs transferts, leurs transformations, ainsi que leur impact sur le lac lui-même et sur son environnement. A cet effet, nous avons adopté une démarche qui nous a permis d'organiser notre manuscrit en quatre chapitres.

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur l'azote dans les milieux aquatiques continentaux.

Le deuxième chapitre est essentiellement dédié à la présentation mésologique de la région dans laquelle se trouve le Lac Fetzara.

Dans le troisième chapitre sont présentés le matériel et les méthodes d'étude relatifs aux eaux et aux sédiments du Lac Fetzara et destinés à la réalisation des campagnes d'échantillonnages, aux analyses physico-chimiques analytiques et au traitement des données acquises

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation et à la discussion des résultats obtenus sur le terrain et au laboratoire.

**CHAPITRE I**

**L'AZOTE DANS LES MILIEUX**

**AQUATIQUES CONTINENTAUX**

## CHAPITRE I. L'AZOTE DANS LES MILIEUX AQUATIQUES CONTINENTAUX

L'azote est le principal constituant de l'atmosphère terrestre puisqu'elle en contient presque 80 % en volume et représente alors la plus importante réserve de cet élément pour la biosphère (Maxi et *al.*, 2007). Les autres réservoirs sont les sols, les sédiments des lacs, des cours d'eau et des océans, les eaux de surface et les eaux souterraines, et la biomasse des organismes vivants (Campbell et Reece, 2007).

L'azote est un élément essentiel de la vie (Savary, 2010) où il circule sous des formes minérales et organiques à l'état particulaire, dissous et gazeux.

Son excès dans les eaux, en particulier sous la forme de nitrate, favorise le problème d'eutrophisation des écosystèmes aquatiques et présentent un risque pour la santé des hommes et des animaux (Bernaud et Fustec, 2007).

### 1. Les différentes formes chimiques de l'azote

L'élément azote entre dans la composition chimique de nombreuses molécules organiques ou molécules minérales.

Les molécules organiques azotées plus ou moins complexes (ex : acides aminés, acides nucléiques, protéines, pigments, etc.) entrent dans la constitution de la biomasse et la matière organique détritique.

Les molécules minérales ou inorganiques sont représentées par (Montuelle, 2003) :

➤ **Des formes ioniques** très solubles dans l'eau :

- L'ion nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ), qui est un ion minéral nutritif directement assimilable par les plantes (Bliefert et Bernaud, 2001).

- L'ions ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), assez souvent rencontré dans les eaux naturelles et traduisant habituellement un processus de dégradation incomplète de la matière organique (Rodier et *al.*, 2009).

- L'ion nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ), peu abondante dans les eaux naturelles car il ne constitue qu'un produit intermédiaire entre les formes nitrate et ammonium lors des processus de nitrification et dénitrification (Faurie et *al.*, 1998).

- **Des gaz dissous** : ammoniac  $\text{NH}_3$ , oxyde nitrique  $\text{NO}$ , dioxyde d'azote  $\text{NO}_2$ , protoxyde d'azote  $\text{N}_2\text{O}$ , azote moléculaire  $\text{N}_2$ .

## 2. Le cycle de l'azote

### 2.1. Le cycle général de l'azote

Les différentes combinaisons chimiques, organiques ou minérales de l'azote sont impliquées dans des réactions essentiellement biochimiques, très différentes les unes des autres, mais qui ne sont pas moins très étroitement liées entre elles et participent au cycle de l'azote qui permet sa circulation dans la biosphère (Martin, 1979).

Le cycle de l'azote (figure 1) représente l'ensemble des voies de transferts de l'azote entre les différents réservoirs de la biosphère. Il est réglé principalement par l'activité métabolique des bactéries (nitrification, dénitrification, ammonification...) (Baudin et al., 2007). Il est complexe en raison du grand nombre de transformations de l'azote dans l'environnement et de la difficulté pour les êtres vivants à l'incorporer (Gaudnik, 2011).

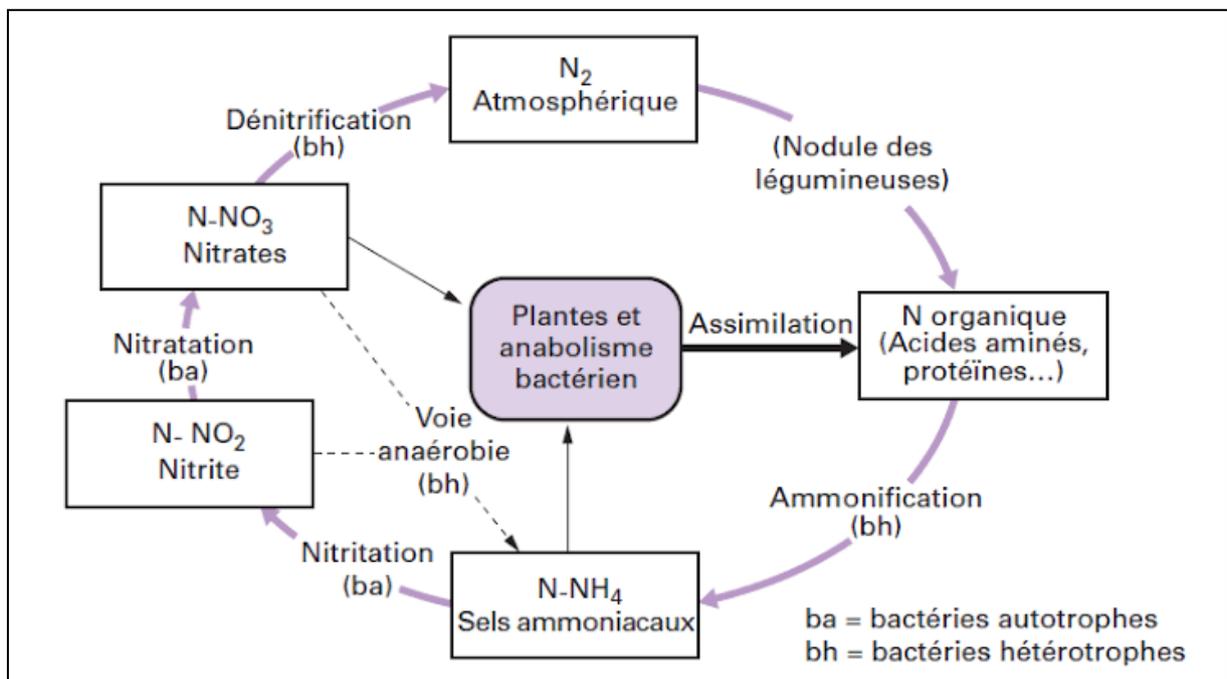
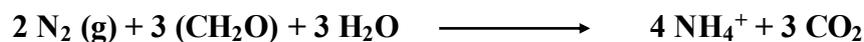


Figure 1. Le cycle global de l'azote (Degremont, 2005)

Les principales étapes du cycle de l'azote sont les suivantes :

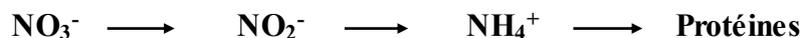
### 2.1.1. La fixation de l'azote

La fixation de l'azote correspond à la conversion de l'azote atmosphérique (N<sub>2</sub>) en azote utilisable par les organismes végétaux ou animaux. Cette fixation produit de l'ion ammonium (Maxi *et al.*, 2007). Les bactéries qui sont capables de fixer l'azote atmosphérique sont soit aérobies comme les *Azotobacter*, soit anaérobies comme les *Clostridium* (Ramade, 2005) au niveau des sédiments (Doré, 1989). Certaines sont capables de réaliser la photosynthèse comme les *Rhodospirillum* ou bien vivent en symbiose avec les légumineuses (*Rhizobium*). Les cyanobactéries jouent aussi un rôle important dans la fixation de l'azote atmosphérique (Ramade, 2005). La réaction chimique type est (Maxi *et al.*, 2007) :



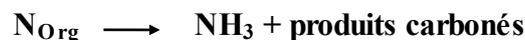
### 2.1.2. L'assimilation de l'azote par les êtres vivants

C'est la transformation de l'azote minéral (nitrate et ammonium) en matière vivante selon le schéma indiqué ci-dessous (Martine, 1979). Les ions nitrate et nitrite doivent être au préalable réduits par des enzymes (nitrate réductase et nitrite réductase). Ensuite, l'ammonium produit est fixé sur l'acide céto-glutarique pour former l'acide glutamique (Ramade, 2005).



### 2.1.3. L'ammonification ou minéralisation de l'azote organique

C'est la transformation de l'azote organique (N<sub>Org</sub>) en ion ammonium (Degrémont, 2005). D'une manière générale, elle peut s'écrire schématiquement de la façon suivante (Martin, 1979) :



L'ammonification conduit à la libération de l'ion ammonium et résulte (Doré, 1989):

- D'une part, l'excrétion de composés azotés par les organismes vivants directement sous forme d'ion ammonium (vertébrés) ou d'urée et d'acide urique (invertébrés) qui sont ensuite dégradés.
- D'autre part, de la décomposition de cellules vivantes après leur mort.

L'ammonification des composés organiques azotés d'origine animale ou végétale est réalisée par un très grand nombre de microorganismes parmi lesquels on peut citer les genres *Achromobacter*, *Clostridium*, *Flavobacterium*.

L'ammonification peut être réalisée dans les milieux hydriques mais avec une intensité plus ou moins grande en fonction des conditions écologiques (Doré, 1989).

### **2.1.3.1. Facteurs influençant la minéralisation de l'azote organique**

#### **- La température**

La température la plus favorable se situe dans l'intervalle de température de 30-35°C (Ochoa, 2008).

#### **- La teneur de l'oxygène dissous**

La réaction d'ammonification se fait en conditions aérobies ou anaérobies (aussi bien en présence qu'en absence d'oxygène) (Montuelle, 2003).

#### **- Le pH**

Le pH optimum pour la minéralisation de l'azote est compris entre 6.5 et 8.5 (Dassonville et Renault, 2002).

### **2.1.4. La nitrification**

La nitrification est la conversion biologique de l'ion ammonium en ion nitrite puis en ion nitrate (Montuelle, 2003). Elle se produit en deux étapes essentielles selon les réactions ci-dessous (Pourriot et Meybeck, 1995) :



L'ion nitrite observable y est un produit intermédiaire d'oxydation.

Deux types de nitrification peuvent être distingués, la nitrification autotrophe et la nitrification hétérotrophe (Doré, 1989).

- ***La nitrification autotrophe***

Elle se déroule en deux étapes consistant en la nitrification (*Nitrosomonas*, *Nitrosospora*) et la nitrification (*Nitrobacter*). Elle est le fait de bactéries aérobies strictes et chimolithotrophes obligatoires utilisant l'oxydation des substrats minéraux comme seules sources d'énergie et le CO<sub>2</sub> comme source exclusive de carbone.

- ***La nitrification hétérotrophe***

Elle correspond à la formation d'ions nitrate par des bactéries hétérotrophes en présence de matières organiques. Les bactéries nitrifiantes hétérotrophes sont nombreuses et très variées, et les conditions particulières dans des milieux aquatiques suggèrent que la nitrification hétérotrophe qui peut s'effectuer dans des conditions d'anaérobiose relative joue un rôle plus important que la nitrification autotrophe.

**2.1.4.1. Importance de la nitrification**

Au niveau des gains ou pertes d'azote, la nitrification n'a pas d'impact sur le bilan global des écosystèmes, puisqu'elle n'ajoute ni élimine de l'azote, elle change uniquement le degré d'oxydation des composés azotés. C'est en cela qu'elle est d'une importance capitale dans les écosystèmes car elle est le lien entre les formes réduites et oxydées du cycle de l'azote. Elle est par conséquent l'intermédiaire entre la décomposition de la matière organique (ammonification) et la perte d'azote fixé dans l'écosystème (dénitrification) (Montuelle, 2003).

**2.1.4.2. Facteurs influençant la nitrification**

La nitrification est réalisée par un petit nombre de microorganismes spécialisés dans cette fonction et est, de façon générale, assez sensible aux conditions environnementales. Ainsi, la croissance des bactéries nitrifiantes est directement contrôlée par quelques paramètres tels que (Montuelle, 2003) :

- ***La température***

La température affecte la vitesse de réaction de deux manières : elle a une influence, d'une part, sur la vitesse de diffusion des substrats et d'autre part, elle peut modifier la croissance des organismes (Martine, 1979). Elle optimale pour les microorganismes nitrifiants quand sa

valeur se situe entre 25 °C et 37 °C (Montuelle, 2003). Ce processus est alors plus intense en été car favorisé par des températures plus élevées (Ochoa, 2008).

- **La teneur en oxygène dissous**

La cinétique de nitrification est influencée par la concentration en oxygène dissous dans le milieu. Elle augmente jusqu'à des concentrations de 3 à 4 mg d'O<sub>2</sub>/l et elle est fortement inhibée pour des concentrations inférieures à 0.5 mg d'O<sub>2</sub>/l (Degrémont, 2005).

- **Le pH**

La nitrification est favorisée par des pH neutres ou légèrement basiques. Elle devient faible dans les milieux acides (Pourriot et Meybeck, 1995). Le pH optimal pour la nitrification est compris entre 7.2 et 8, et un pH inférieur à 6,8 la réduit de manière significative (Degrémont, 2005).

- **La disponibilité des ions ammonium**

La nitrification est contrôlée essentiellement par la disponibilité de l'ion NH<sub>4</sub><sup>+</sup> pour les organismes nitrifiants (Andrianarisoa, 2009).

### 2.1.5. La dénitrification

La dénitrification est une réduction par voie biologique des nitrates en azote gazeux qui retourne sous sa forme primitive dans l'atmosphère (Koller, 2004). C'est un processus exclusivement bactérien qui s'effectue en milieu anoxique selon la séquence suivante (Doré, 1989) :



La dénitrification est réalisée par plusieurs groupes de bactéries hétérotrophes pour la plupart aérobies facultatives (genre *Pseudomonas*, *Alcaligenese*, *Bacillus*, *Nitrosomonas*, *Paracoccus*...). Ces bactéries ont la capacité, en l'absence d'oxygène libre, d'utiliser l'oxygène inclus dans la molécule de nitrate pour respirer.

Lors de cette respiration, les nitrates sont réduits sur une série de réactions de réduction qui conduisent au dégagement d'azote moléculaire gazeux via un certain nombre d'intermédiaire dissous (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) et gazeux (NO, N<sub>2</sub>O).

La dénitrification boucle le cycle de l'azote en renvoyant N<sub>2</sub> dans l'atmosphère mais accompagné d'oxydes gazeux (NO, N<sub>2</sub>O) dont les propriétés (effet de serre, réaction avec l'ozone) motivent une attention particulière (Pourriot et Meybeck, 1995).

### 2.1.5.1 Facteurs influençant la dénitrification

La dénitrification peut avoir lieu à partir du moment où trois facteurs sont réunis (Bernaud et Fustec, 2007) :

- la présence de nitrates.
- une absence d'oxygène.
- la présence de carbone organique facilement dégradable.

D'autres facteurs physico-chimiques tels que la température (Fustec et Lefeuvre, 2000) et le pH peuvent influencer la dénitrification. Le pH optimal se situe entre 7 et 8.2 (Degrémont, 2005).

### 2.1.6. Réduction dissimilative des nitrates en ammonium (RDNA)

La RDNA correspond à la transformation des nitrates en ammonium (Curie, 2006). C'est un processus bactérien important des environnements anoxiques et riches en matières organiques (notamment des sédiments). Il est rencontré chez un nombre important de bactéries anaérobies strictes et anaérobies facultatives qui puisent leur énergie principalement de fermentations plutôt que d'oxydations (par opposition à la dénitrification). Elle s'effectue selon la réaction globale suivante (Montuelle, 2003):



A l'inverse de la dénitrification qui provoque une élimination définitive des nitrates, la réduction dissimilative est un processus temporaire d'élimination des nitrates (Curie, 2006). L'ammonium produit peut, en effet, être utilisé pour la nitrification ou assimilé par la biomasse microbienne (Burgin et Hamilton, 2007).

La RDNA entre en compétition avec la dénitrification hétérotrophe pour les nitrates mais chaque réaction a ses propres avantages : la dénitrification hétérotrophe fournit plus d'énergie mais les bactéries réalisant la RDNA sont capables de transférer plus d'électrons par mole de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Burgin et Hamilton, 2007 ; Kirchman et *al.*, 2008). De plus, la RDNA est supposée être

favorisée dans les environnements riches en carbone organique et pauvres en nitrate (Montuelle, 2003).

Le rapport C/N exercerait un contrôle sur le type de réactions : pour des rapports C/N > 4 la réduction dissimilative prédominerait alors que pour des rapports C/N inférieurs à 4 la dénitrification serait prédominante (Smith, 1982).

## **2.2. Le sous - cycle de l'azote dans les zones humides**

L'azote est présent dans les zones humides sous trois formes principales : ammonium, nitrate et organiques. La transformation d'une forme en un autre est sous la dépendance de processus microbiologiques très sensibles (Reddy et Patrick, 1984). Le cycle de l'azote dans les zones humides est contrôlé par diverses variables: le climat, l'hydrologie, la géomorphologie et la végétation (Ochoa, 2008).

Dans des conditions aérobies, l'azote organique peut être minéralisé sous forme d'ion nitrate via l'ammonification et la nitrification.

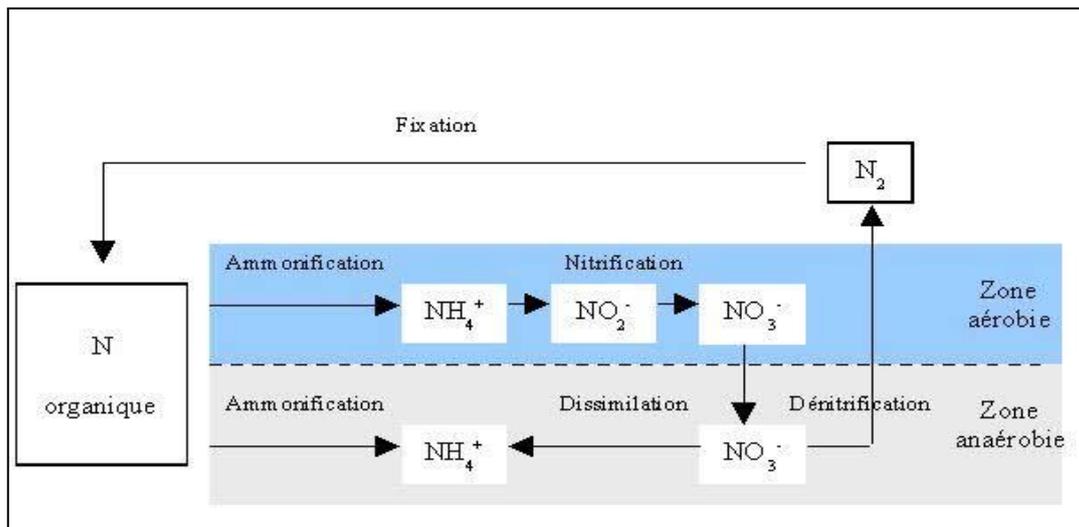
La nitrification est une série de réactions sous la dépendance de bactéries chémo-autotrophes des groupes *Nitrosomonas* et *Nitrobacter*. En l'absence d'oxygène libre, seule l'ammonification est possible parce que les bactéries nitrifiantes sont des aérobies stricts.

Les nitrates formés dans les zones superficielles du milieu humide, peuvent alors diffuser dans les zones anaérobies où ils seront dénitrifiés.

Dans des conditions de milieu très réductrices, le nitrate peut être transformé en ion ammonium selon le processus de réduction dissimilative indiqué précédemment.

Enfin, il existe dans les zones humides des organismes fixateurs d'azote atmosphérique, qu'ils soient libres dans le sol ou symbiontes pouvant enrichir le milieu humide en ion nitrate et influencer les différents processus impliqués dans ce cycle de l'azote (Fustec et Lefevre, 2000).

Fustec et Lefevre, 2000, ont proposé sommairement le schéma descriptif de ce sous-cycle (figure 2).



**Figure 2.** Le sous-cycle de l'azote dans les zones humides (Fustec et Lefèvre, 2000)

Au sein de ce cycle, il se déroule en parallèle des processus physicochimiques et biologiques, de multiples voies de transfert de l'azote entre les différents compartiments du milieu aquatique avec son environnement plus ou moins immédiat (sources et exportations de l'azote dans une zone humide plus ou moins anthropienne).

### 3. Origine des différentes formes de l'azote

Les sources d'azote dans les eaux sont nombreuses. Brièvement sont les suivantes :

- **La fixation de l'azote atmosphérique** : Par des bactéries libres ou associées à des végétaux, elle introduit de l'azote atmosphérique dans le milieu aquatique (Bernaud et Fustec, 2007).
- **Les eaux de pluie** (Martine, 1979),
- **Les rejets des eaux usées urbaines** : Essentiellement constituées par des eaux dites « domestiques » provenant de l'activité humaine, elles sont de deux sortes : les eaux vannes et les eaux ménagères.
- **Le déversement des eaux résiduaires industrielles** : Les quantités de produits azotés rejetés par les eaux résiduaires industrielles varient énormément d'une industrie à l'autre (industrie du papier, industrie des engrais chimiques, industries agroalimentaires et industries du traitement des métaux) (Vilaginès, 2000).
- **L'utilisation d'engrais chimiques ou des résidus** jouant un rôle d'engrais dans les parcelles agricoles.

Le devenir de l'azote dans le milieu naturel dépend de nombreux facteurs physico-chimiques, mécaniques et biologiques tels que (Martine, 1979):

- *La nature du milieu (densité, porosité, propriétés adsorbantes, qualité d'échanges).*

- *Les conditions climatiques.*

- *La qualité du rejet.*

#### **4. Les processus de transfert et de transformation de l'azote dans les bassins versants des zones humides**

L'azote se présente sous plusieurs formes : minérales et organiques, solides, dissoutes et gazeuses. Malgré cette diversité de formes et l'ubiquité de cet élément dans la biosphère, le transfert de l'azote dans les bassins versants s'effectue majoritairement sous une de ses formes minérales dissoutes, les ions nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ).

La faible rétention physique de l'ion nitrate dans les sols et dans les sédiments le rend facilement entraînable par les eaux de surface ou de sub-surface jusqu'aux nappes et cours d'eau qui les drainent. Par ailleurs, l'azote peut être transporté aussi sous forme organique particulaire ou sous forme minérale ammoniacale adsorbée sur les colloïdes argileux et humiques. Cette seconde forme de transfert est très liée au transfert de matières solides dans les bassins versants et s'apparente aux processus d'érosion et de sédimentation.

Cependant, la majeure partie des transferts d'azote se fait sous forme dissoute. Par conséquent, la position des zones humides vis-à-vis des écoulements de surface et/ou de sub-surface est primordiale, dans la mesure où elle conditionne la proportion d'eau et donc d'azote dissous qu'elle va pouvoir intercepter (Fustec et Lefèvre, 2000).

Les mécanismes d'interception et de rétention des matières particulaires transportées par les eaux de ruissellement et de crue permettent le captage de la plus grande partie de l'azote organique et des ions ammonium associés aux particules. Les espèces végétales et les micro-organismes interviennent ensuite dans le stockage et le recyclage des constituants azotés.

Dans ces milieux, l'absorption des composés azotés dissous sous forme d'ion nitrate et d'ion ammonium, par les végétaux et les micro-organismes conduit à une rétention d'azote plus ou moins longue. La biomasse microbienne, qui se renouvelle constamment, immobilise aussi de l'azote de façon durable (Bernaud et Fustec, 2007).

Cet azote organique constitutif des micro-organismes et des tissus végétaux peut ensuite être utilisé pour la constitution des tissus d'animaux, avant de retourner au sol soit après la mort de ces différents organismes, soit par excrétion (Genermont et Cellier, 2016).

Les processus de transformation de l'azote organique produit en place ou introduit dépendent de la saturation en eau des sols ou des sédiments. Si la couche superficielle de ces derniers n'est pas saturée en eau et donc suffisamment pourvue en oxygène, la minéralisation de l'azote organique par voie microbienne va s'opérer comme en milieu terrestre : transformation en ammoniacque puis en ions nitrite et en ions nitrate. Les ions nitrate diffusent en profondeur vers la zone saturée où circulent également des eaux en provenance du bassin versant ou des écosystèmes aquatiques adjacents.

Dans la zone saturée, qui atteint souvent la surface du sol, l'absence d'oxygène limite la minéralisation de l'azote organique à la production d'ammoniacque. Les ions nitrate peuvent dans des conditions particulières et assez rares, être réduits en ammoniacque, mais ils sont d'une manière générale éliminés par dénitrification (Bernaud et Fustec, 2007).

## **5. Les conséquences environnementales de la pollution azotée**

L'azote est un élément important pour le développement des êtres vivants (Bliefert et Perraud, 2001). L'utilisation d'engrais artificiels en agriculture ainsi que les émissions d'oxyde d'azote dans l'atmosphère, ont altéré la répartition naturelle des composés d'azote entre l'eau, le sol et l'air. Il en résulte alors que certains composés d'azote peuvent causer de graves dommages dans les différents réservoirs de l'environnement (Sigg et *al.*, 2006) (tableau 1) et en conséquence sur les écosystèmes aquatiques et terrestres (eutrophisation, acidification) et sur la santé des hommes et des animaux (Bernaud et Fustec, 2007).

**Tableau 1** : Problèmes causés par les composés azotés (Sigg *et al.*, 2006).

Composé d'azote	Origine	Systèmes affectés	Effets
$\text{NO}_3^-$	Engrais	Eaux souterraines Mer Océan	Nocifs dans l'eau potable
$\text{NO}_2^-$	Produit intermédiaire de la nitrification, dénitrification et réduction de $\text{NO}_3^-$	Eaux de surface	Toxicité pour les poissons
$\text{N}_2\text{O}$	Produit intermédiaire de la dénitrification et de la réduction de $\text{NO}_3^-$	Atmosphère	Effet de serre, destruction de l'ozone dans la stratosphère
$\text{NH}_3(\text{g})/\text{NH}_4^+$	Engrais (agriculture, élevage)	Atmosphère Sol Eaux de surface et souterraines	Toxicité de $\text{NH}_3$ pour les poissons Problèmes dans la désinfection de l'eau potable par le chlore.

### 5.1. Changement climatique

A l'instar d'autres molécules telles que le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et le méthane, certaines molécules azotées peuvent favoriser le changement climatique.

La dénitrification produit des oxydes d'azote intermédiaires à l'état gazeux (dont l'oxyde nitreux  $\text{NO}$  et le protoxyde d'azote  $\text{N}_2\text{O}$ ) qui peuvent s'échapper dans l'atmosphère avant leur transformation en azote moléculaire ( $\text{N}_2$ ) dans les écosystèmes terrestres et aquatiques (Bernaud et Fustec, 2007). En atteignant la stratosphère, le  $\text{N}_2\text{O}$  contribue à la destruction de la couche d'ozone et à l'installation de l'effet de serre (Sigg *et al.*, 2006).

### 5.2. Acidification du sol

Certaines transformations de composés azotés représentent une source importante de protons, provoquant une acidification du sol avec toutes les conséquences négatives qu'elle implique, dont notamment un appauvrissement en nutriments (Sutton *et al.*, 2013) et une libération d'ions aluminium toxiques (Delhaize et Ryan, 1995).

### 5.3. La dégradation de la qualité des eaux

L'augmentation de la concentration des dérivés azotés, essentiellement l'ammonium et les nitrates, dans les eaux peut être le fait d'une insuffisance de précautions dans la gestion des quantités d'azote produites ou utilisées par les collectivités locales, l'industrie et l'agriculture (Vilaginès, 2000). Cette augmentation a de multiples impacts négatifs sur la qualité des eaux, sur les services rendus par les écosystèmes aquatiques et sur leur bon fonctionnement.

La présence excessive d'azote dans les eaux superficielles peut provoquer leur eutrophisation ou une toxicité pour certains organismes aquatiques (Bordet, 2007).

- **L'eutrophisation** : Elle concerne les eaux de surfaces. Elle est provoquée par un excès d'azote responsable de la modification des caractéristiques physico-chimiques ou biologiques et induisant des changements typiques dans la structure globale des peuplements des macrophytes du milieu aquatique (Pourriot et Meybeck, 1995): la diminution de la profondeur par comblement progressif, coloration des eaux (vert à brun), transparence réduite, augmentation de la biomasse végétale, déficit en oxygène dans les couches profondes (Degrémont, 2005), des variations de la richesse et de la diversité spécifique des peuplements, accumulation excessive de déchets organiques (effets toxiques, difficultés d'enracinement) (Pourriot et Meybeck, 1995).
- **La toxicité pour les organismes aquatiques** : Quand il est converti en ammoniac, l'ion ammonium devient toxique pour les poissons. Une alcalinisation du milieu aquatique entraîne donc une augmentation de la toxicité due à l'ion ammonium (Gaujous, 1995).

Les polluants azotés menacent même la qualité des nappes d'eau souterraines en la rendant de plus en plus souvent impropre à la consommation humaine et animale (Dajoz, 2006). Ce sont les ions nitrate qui en sont les plus grands responsables (Vilaginès, 2000).

### 5.4. Risques sanitaires liés à l'excès d'ions nitrate et nitrite

Qu'ils soient en concentration excessive dans les aliments ou dans les eaux de boisson, les nitrates soulèvent de sérieux problèmes d'hygiène publique.

Les ions nitrate ne sont pas toxiques en soi. Mais, dans le tube digestif, ils peuvent être transformés en ions nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ) (Rouyrre, 2003) lesquels sont très toxiques (Ramade, 2005).

En premier lieu, dans le sang, les nitrites peuvent agir sur l'hémoglobine et la transformer en méthémoglobine (Vilaginès, 2000). Cette affectation résulte de la fixation de l'ion nitrite sur l'hémoglobine. La méthémoglobine ainsi formée est incapable de retenir l'oxygène de l'air car c'est une molécule stable. Il en résulte une forme particulière d'anémie, qui affecte les nourrissons et les enfants en bas âge (Ramade, 2005). Il peut en résulter des troubles graves, allant jusqu'à la mort du nourrisson quand la méthémoglobine atteint un certain niveau (Vilaginès, 2000).

Par ailleurs, l'ensemble de la population peut être exposée à un autre risque pathologique lié à la consommation des eaux polluées par les ions nitrate qui peuvent induire la formation de nitrosamines cancérogènes dans l'appareil digestif (Ramade, 2005).

### **Conclusion**

L'azote est un élément très abondant dans la biosphère et surtout dans l'atmosphère (Maxi et *al.*, 2007), où il trouve essentiellement sous forme d'azote moléculaire (N<sub>2</sub>) (Campbell et Reece, 2007). Mais cet élément ne peut être utilisé directement par les organismes. Des processus de transformation de l'azote atmosphérique sont nécessaires pour se présenter sous une forme utilisable (Maxi et *al.*, 2007).

Dans le milieu naturel, les composés azotés sont présents sous forme organiques ou inorganiques (minérales) (Montuelle, 2003). La transformation d'une forme en une autre (cycle de l'azote) est sous la dépendance de processus biologiques : fixation biologique du diazote atmosphérique, l'ammonification de l'azote organique, la nitrification de l'ammonium et la dénitrification du nitrate (Sigg et *al.*, 2006). L'importance relative de ces processus dépend fortement de certaines conditions environnementales, telles que la concentration en oxygène dissous, la température, le pH, les apports en carbone organique...etc (Cornwell et *al.*, 1999).

L'azote constitue paradoxalement à l'heure actuelle un élément principal de la productivité agricole d'une part et une des substances principales de nuisance de l'environnement d'autre part (Dalgaard et *al.*, 2012). Il est identifié comme étant la troisième menace pour notre planète après la perte de la biodiversité et le changement climatique (Giles, 2005).

L'introduction accrue de cet élément dans les différents milieux récepteurs est préjudiciable à la santé humaine, nuisible aux ressources biologiques terrestres et à l'ensemble des écosystèmes naturels (Metahri, 2012).

## **CHAPITRE II**

### **PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE**

## CHAPITRE II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

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 Zied et de l'oued El Hout. A 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 (Fekrache, 2015).

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 (Travers, 1958).

Une autre tentative en 1999-2000 par la GCA (Générale des Concessions Agricoles) pour la création de trois périmètres agricoles, n'a pas donné des résultats escomptés puisque les sols étaient inondés durant toute la période hivernale.

Depuis l'année 2003, le Lac Fetzara a été inclut dans la liste des zones humides d'importance internationale conformément à l'article 2. 1 de la convention RAMSAR (Fekrache, 2015).

Le Lac Fetzara constitue le site de nidification et d'hivernage le plus important de l'Est. Il accueille en moyenne plus de 30000 oiseaux d'eau en hiver dominés principalement l'oie cendrée (*Anser anser*) et le Canard siffleur (*Anaspenelope*). C'est aussi une zone de gagnage pour les Anatidés et Foulques.

Son couvert végétal est caractérisé, de l'extérieur vers l'intérieur, par un groupement naturel constitué de chêne liège et d'olivier et un groupement artificiel de plantation de pin maritime et d'eucalyptus. Viennent ensuite une strate arbustive composée de genêts et d'oléastre, une strate herbacée et enfin, une végétation palustre diversifiée, constituée principalement de roseaux (*Arundo spi.*), de massettes (*Typha sp.*), de joncs (*Juncus sp.*) Cette végétation aquatique assez importante est très peu étudiée (DGF, 2003).

## 1. Situation géographique

Le Lac Fetzara est situé au centre du quadrillage délimité par les latitudes 36° 43' et 36° 50' Nord et les longitudes 7° 24' et 7° 39' Est et au Nord-Est de l'Algérie. Il se trouve dans la commune de Berrahal, au Sud-Ouest de la ville d'Annaba, à 14 Km du littoral marin (figure 3). A sa périphérie existent plusieurs agglomérations: au Nord, le chef - lieu de la commune de Berrahal, au Sud, les territoires des communes d'El Eulma et de Cheurfâ, et à l'Est, les petits villages d'El Gantra et de Oued Zied (GHI, 2009).

D'une superficie d'environ 18600 ha, il s'étale sur une dépression de 17 km d'Ouest en Est et de 13 Km du Nord au Sud. Sa partie inondable est située en son centre et couvre une superficie estimée à 13000 ha (Djamai et *al.*, 2011). Le lac est partiellement inondé en hiver malgré la présence d'un canal principal creusé pour assurer son drainage (Durand, 1950). 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).

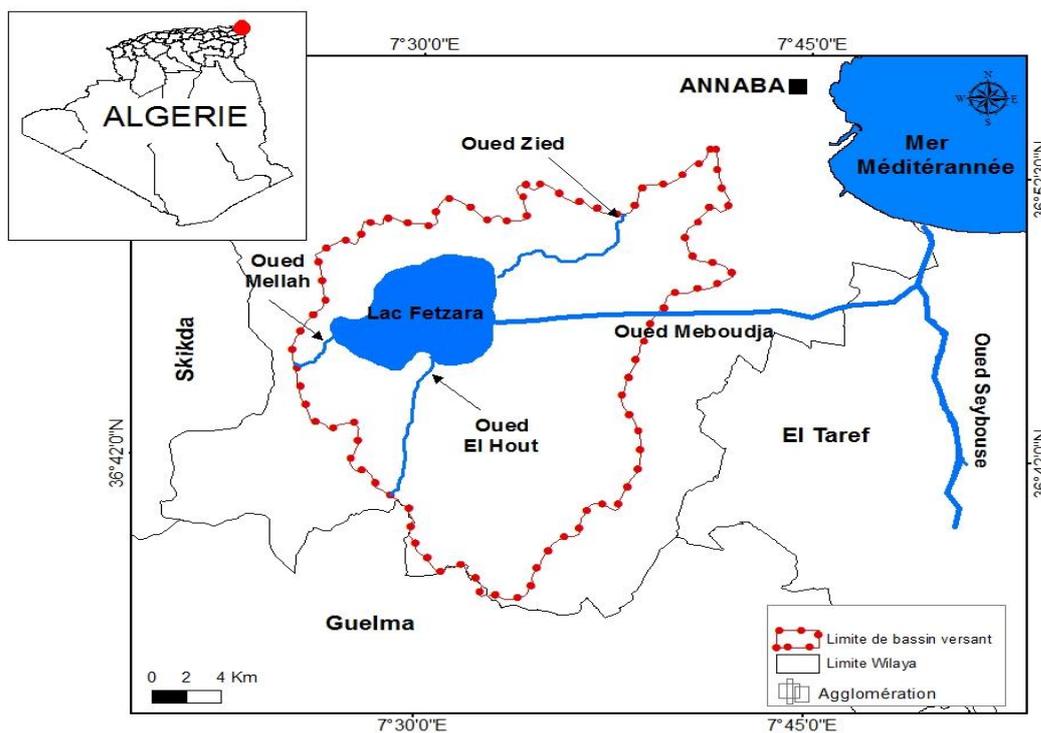


Figure 3 : Situation géographique du lac Fetzara

## **2. Géologie et géomorphologie**

### **2.1. Géologie**

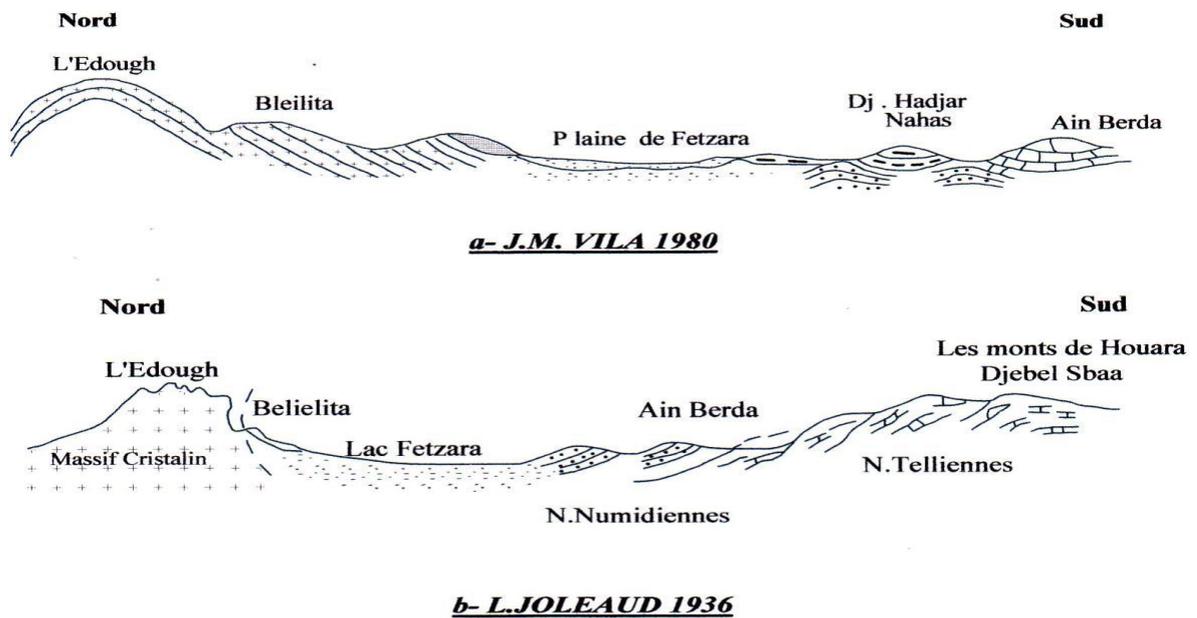
Le Lac Fetzara et son bassin versant sont constitués de plusieurs formations géologiques dont la stratigraphie serait la suivante (Joleaud, 1936) :

- Formations marécageuses actuelles : Constituées de limons, elles sont mal drainées et forment le fond de la cuvette du Lac Fetzara.
- Dépôts récents : Formés de sables et limons, ils constituent la bordure du lac et sont d'âge Néopléistocène.
- Dépôts anciens : Constitués de sables et de limons datant du début de la formation du lac et le dépôt dunaire d'El Gantra qui a isolé le lac de la mer. Tous ces dépôts datent du Pléistocène récent.
- Alluvions des moyennes terrasses des vallées : Formées de sables et de cailloux roulés, parfois assez riches en fer, du niveau de 30 m environ en bordure de vieux thalweg creusés jadis sur l'emplacement de la dépression du Lac Fetzara. Elles sont d'âge Pléistocène ancien.
- Alluvions des hautes terrasses des vallées : Formées de sables et cailloux roulés, du niveau de 50 m, elles sont disposées comme les précédentes et comprennent de nombreux blocs de grès de Numidie. Elles sont d'âge Pléistocène ancien.
- Alluvions de bas niveaux des plateaux : Elles sont formées de cailloux roulés du niveau de 100 m.
- Grès de Numidie de l'Eocène supérieur ou de l'Oligocène : Grès quartzeux massifs donnant parfois des éboulis sur les pentes argileuses qu'ils surmontent.
- Argile de Numidie : Verdâtres ou brunâtres, plus ou moins schisteuses avec intercalation de petits bancs de grès quartzeux et de marnes calcaires gris bleuâtres, elles sont d'âge Eocène supérieur ou Oligocène.
- Argiles plus ou moins schisteuses avec bancs de calcaires, brèche à petits éléments et Nummulites, grès de 150 à 200 m d'épaisseur et d'âge Eocène moyen.
- Schistes argileux, talqueux ou sériciteux.

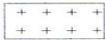
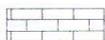
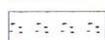
- Gneiss : Ils se divisent en deux types :

- Les gneiss inférieurs qui sont des formations très importantes avec 1500 m d'épaisseur, à micas noirs et blancs qui se désagrègent facilement en arènes blanchâtres.
- Les gneiss supérieurs qui sont fréquemment intercalés de lits de micaschistes et sillonnés de granulite et pegmatite qui peuvent dériver de micaschistes granulaires.

- Micaschistes : Ils sont traversés par des bandes sub-continues ou continues de cipolins.



**Légende :**

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

**Figure 4.** Coupes géologiques entre Ain Berda et l'Edough, passant par le Lac Fetzara :

a - Vila (1980) et b – Joleaud (1936)

## **2.2. Géomorphologie**

La cuvette du Lac Fetzara correspond à un large synclinal que dessinent les argiles et grés de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène inférieur.

Le creusement de la zone actuelle a commencé dès la fin du Pliocène. Il s'est confirmé au Post-pliocène en donnant une vallée dont le fond descendant par étage successifs a été compartimenté au Pléistocène en une succession de lagunes lacustres, saumâtre et marines, par des lignes de coteau. Un cordant dunaire a ensuite isolé le Lac Fetzara, le convertissant au Néopléistocène en lac, puis en marécage saumâtre évoluant vers le stade de chott et ayant tendance à devenir une lagune de sur-saturation (Joleaud, 1936).

Les études faites sur le Lac Fetzara ont permis de montrer à la fois le rôle de la tectonique et du climat dans l'élaboration du lac. Concernant la tectonique, les failles qui limitent cette cuvette sont restées actives pendant tout le Quaternaire. D'après Marre (1987), le Lac Fetzara présente des bordures Nord et Sud nettement dissymétriques. Au Sud, un véritable piémont avec plusieurs niveaux de glacis qui s'est construit en avant du Tell Nord guelmien. Au Nord, le massif de l'Edough tombe brutalement dans la cuvette du Lac Fetzara et peu de formes quaternaires assurent le passage de la montagne au fond de la dépression. Enfin, à l'Est, une lunette que suit la route, isole la dépression lacustre de la plaine d'El-Hadjar.

Selon Marre (1987), concernant le rôle du climat, il aurait existé dans le Lac Fetzara des périodes de déflation éolienne qui ont alterné avec des périodes d'inondations. Pendant les phases humides, le lac restait en eau toute l'année d'où la présence de vases organiques et d'une faune lagunaire qui remontait par les oueds. Tandis que pendant les phases sèches, le lac s'asséchait au moins en été ; et la déflation éolienne se mettait en action avec les vents du Nord-Ouest, en provoquant le creusement du fond de la cuvette et dépôt au Sud-Est sur les glacis, et enfin construction de la lunette sableuse à l'Est qui forme la dépression.

D'une manière générale, la topologie du Lac Fetzara est relativement simple. La partie la plus profonde du lac est à 10 m. La zone du Lac Fetzara est divisée en partie montagneuse (altitude > 40 m), la terrasse formée vers le centre du lac (altitude de 10 à 20 m) et les terrains bas (altitude < 10 m). La plaine occupe environ les deux tiers de la superficie totale (tableau 2).

**Tableau 2.** Répartition de la superficie des formations topographiques du Lac Fetzara (AJCI, 1985).

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

### 3. Hydrologie et hydrogéologie

#### 3. 1. Hydrologie

D'après AJCI (1985), le bassin versant du Lac Fetzara est de 515 km<sup>2</sup>. Les eaux sont collectées des oueds Zied, 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 Zied 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 et son bassin versant est de 47 km<sup>2</sup>. Ces trois oueds totalisent 29% de la superficie totale du bassin versant du Lac Fetzara (tableau 3) et font partie du réseau hydrographique endoréique (figure 5).

**Tableau 3.** Superficie du bassin versant du Lac Fetzara (AJCI, 1985).

Oueds principaux	Superficie (km <sup>2</sup> )
Oued Zied	19
Oued Mellah	47
Oued El-Hout	81
Ruisseaux et autres petits bassins	Superficie (km <sup>2</sup> )
Versant Nord	138
Versant Sud-Ouest	114
Versant Sud-Est	116
<b>Total</b>	<b>515</b>

Dans un rapport de Durand (1950), il est constaté que dans une année assez pluvieuse, il est possible de distinguer 5 zones concentriques concernant le régime de remplissage et de vidange du Lac Fetzara :

- Première zone de 3890 ha qui ne s'inonde jamais (au - dessus de la côte 12 m).
- Deuxième zone de 2250 ha entre les côtes 12 et 11.75 m qui s'inonde trois fois pendant la période d'hiver avec une durée de 4 à 10 jours. La durée totale d'inondation est en général de 23 jours.
- Troisième zone de 3000 ha entre les côtes 11.70 et 10.85 m qui s'inonde trois fois avec une durée de 11 à 12 jours. La durée totale de submersion est de 44 jours.
- Quatrième zone de 2000 ha entre les côtes 10.85 et 10.70 m qui reste inondée de la première décade de Janvier jusqu'à la première décade de Mars (62 jours en moyenne).
- Cinquième zone de 2000 ha en dessous de la côte 10.70 m et qui reste inondée durant toute la période pluvieuse.

La superficie du lac inondée en hiver est estimée à 60 Km<sup>2</sup> (AJCI, 1985). Le drainage du lac, est effectué par le canal principal installé au centre du lac et le traversant d'Ouest en Est. En saison pluvieuse, les eaux sont emmagasinées dans le lac et drainées vers le l'Oued Meboudja en passant par le pont-vanne situé sur le CW 106 qui permet de maintenir le niveau du lac à une certaine hauteur. En saison estivale (Juin à Septembre), la superficie du lac se réduit jusqu'à environ 20 km<sup>2</sup> et tous les oueds se tarissent (Djamai, 2018).

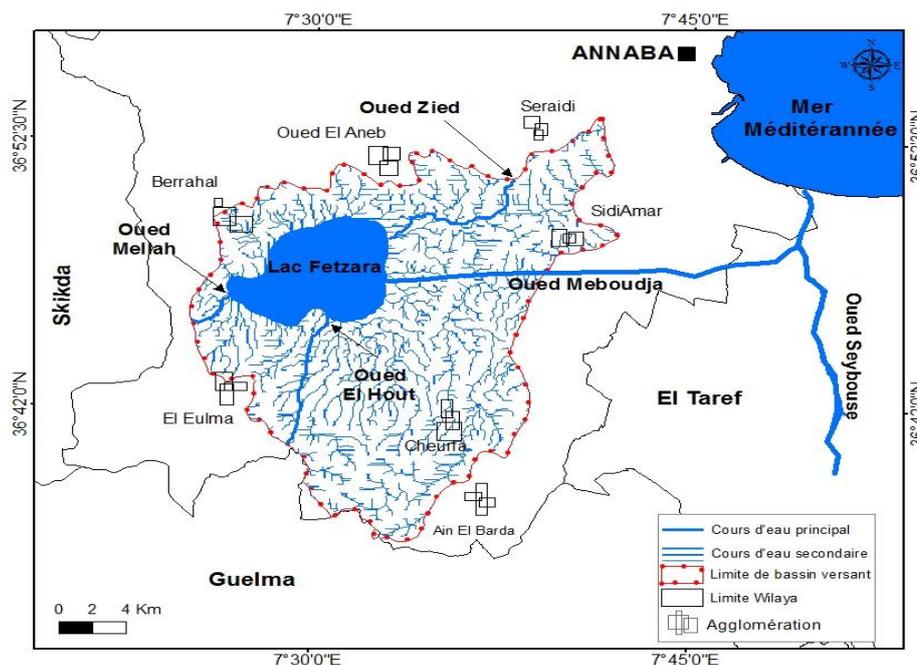


Figure 5. Le bassin versant du Lac Fetzara (in Zenati, 1999 modifiée)

### 3.2. Hydrogéologie

Du point de vue hydrogéologique, le Lac Fetzara occupe la région Ouest de la plaine d'Annaba et 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 variant entre 2 et 10 m, elle est à potentialités 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.*, 2010 ; Zenati, 1999 ; Zenati, 2010) dans les environs du lac montrent deux directions principales du flux souterrain. D'un côté, le lac est alimenté par l'aquifère et 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. Ces 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.

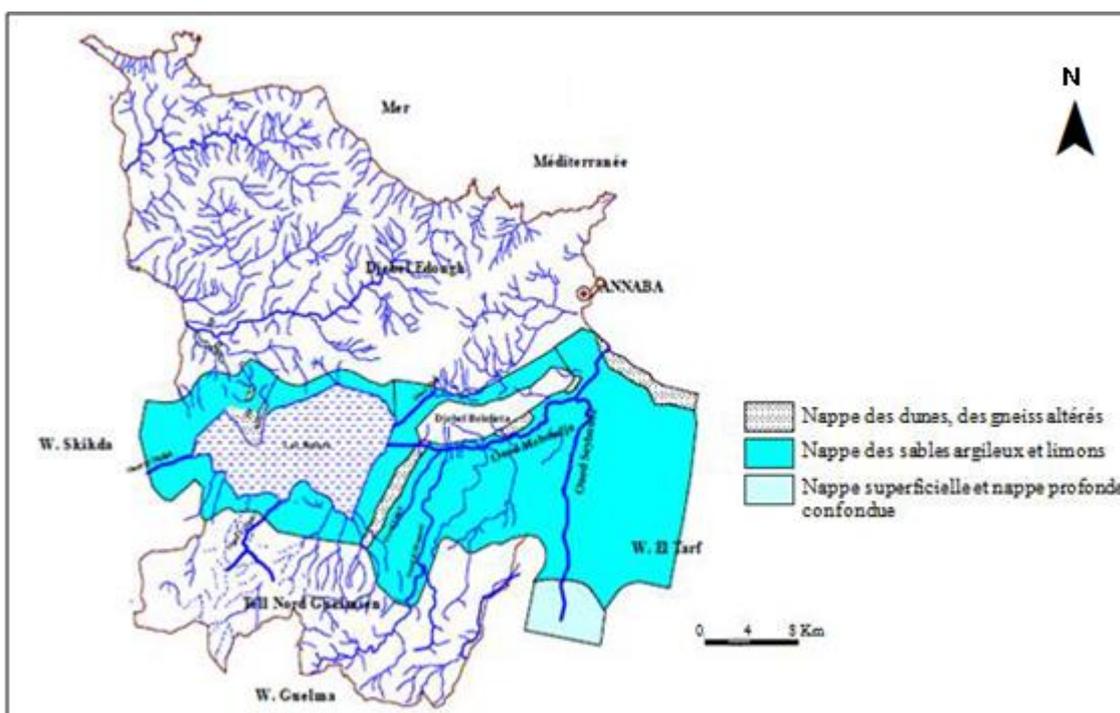


Figure 6. Nappes entourant le Lac Fetzara (in Zenati, 1999).

#### 4. Les sols du Lac Fetzara

Selon la classification française CPCS (1967), sont distinguées quatre classes de sols sur le Lac Fetzara (AJCI, 1985), dont la répartition est la suivante (tableau 4 et figure 6).

Tableau 4. Distribution des différentes classes de sols

Classes de sols	Superficies (ha)	%
Sols peu évolués	5119	28
Vertisols	625	3.3
Sols hydromorphes	2548	13.7
Sols halomorphes	10228	55
<b>Total</b>	<b>18600</b>	<b>100</b>

##### 4.1. Les sols peu évolués

Les sols peu évolués représentent une superficie de 5199 ha (28% de la superficie totale). Ils forment une couronne autour du lac et constituent les zones les plus périphériques. Ils comprennent trois sous-classes :

- Sols peu évolués d'érosion (1.45 %). Ils sont très répandus à l'Est du CW108.
- Sols peu évolués d'apport colluvial (15.1 %). Une partie de ces sols est faiblement calcaire et à teneur élevée en limons.
- Sols peu évolués d'apport alluvial (11.12 %). On les rencontre en bas de terrasses dans les terrains plats à faible pente. Ces sols ne sont pas calcaires.

#### **4.2. Les vertisols**

Ces sols représentent 625 ha (3.3 % de la superficie totale). Ils se localisent essentiellement à l'Ouest du lac. On peut distinguer deux sous classes de vertisols :

- Vertisols à drainage externe nul ou réduit (1.22 %). Cette zone est caractérisée par un mauvais drainage d'où une forte saturation des sols.
- Vertisols à drainage externe possible (2.08 %). Ces sols sont assez bien drainés.

#### **4.3. Les sols hydromorphes**

Ce sont des sols à pseudogley et représentent 2548 ha (13.7 % de la superficie totale). Ils forment une ceinture discontinue à la périphérie, s'intercalant entre les sols peu évolués et sols halomorphes qui occupent le centre du lac. Ils sont localisés sur des alluvions à mauvais drainage et occupant des terrains plats à faible pente. Aussi, ils sont argileux et affectés par le phénomène d'oxydo-réduction.

#### **4.4. Les sols halomorphes**

Avec 10228 ha (55 % du total des sols), ces sols représentent la classe la plus importante. Ils correspondent aux sols à accumulation de sels dans la zone du lac inondée en saison pluvieuse. Ce sont des sols à texture lourde, riche en minéraux argileux gonflants. En période sèche, de petites fissures se produisent à la surface et la nappe peut s'abaisser jusqu'à plus de 1.5 m de profondeur. On peut remarquer deux sous-classes de sols halomorphes :

- Sols halomorphes à structure non dégradée (47 % du total). La salinité est élevée (CE comprise entre 16 et 18 mS/cm). Ils correspondent aux solontchaks.
- Sols halomorphes à structure dégradée (8 % du total). Cette sous-classe est elle-même divisée en deux groupes :

- Sols salés à alcalis: Représentant 5.47 %, ils sont moins réponsus et se situent particulièrement au Nord du confluent de l'Oued El Hout et du canal principal. Leur salinité est moins élevée et peut diminuer jusqu'à 4 mS/cm. Ces sols correspondent aux solontchaks-solonetz.
- Sols salés à horizon Bt (2.42 % du total) : Leur salinité est faible et ils peuvent être considérés comme des solonetz.

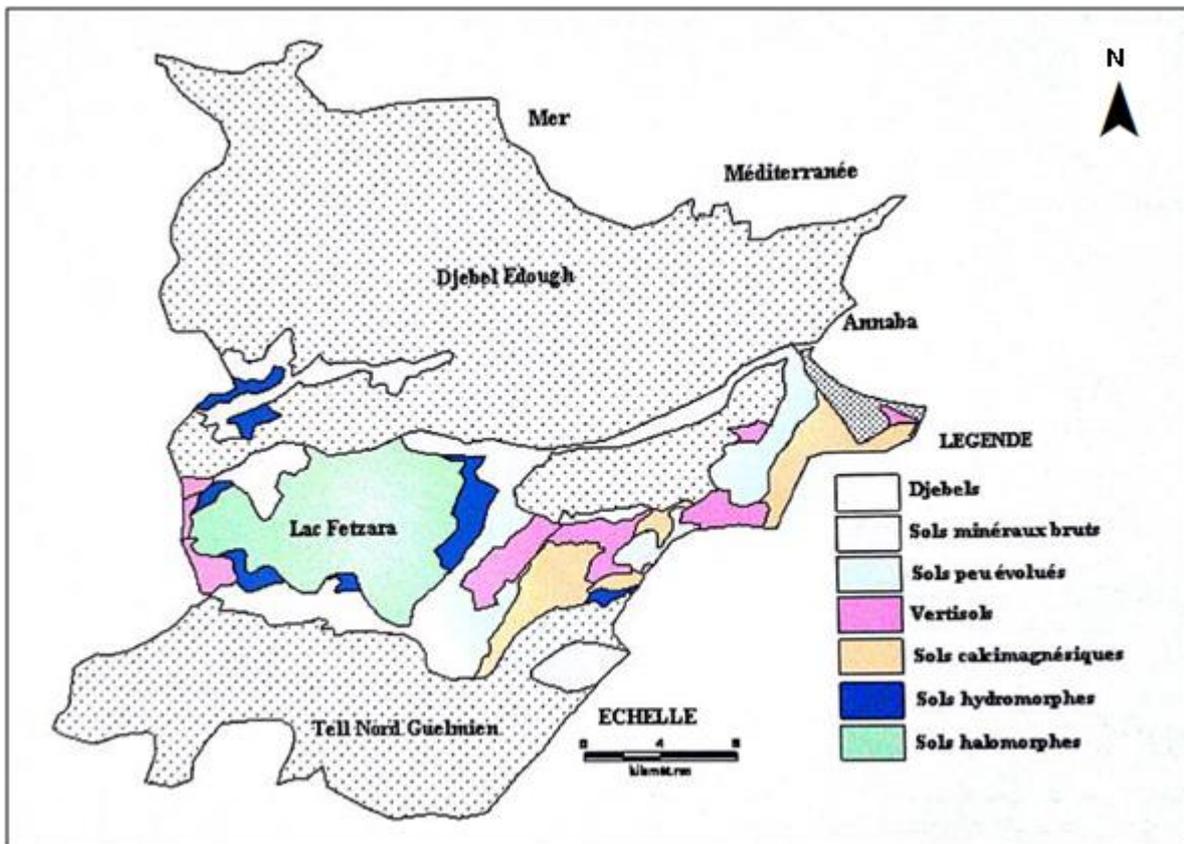


Figure 7. Carte pédologique de la région d'Annaba (in Zenati, 2010).

## 5. Occupation du sol

### 5.1. Occupation agricole

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 et des cultures d'été pendant la période sèche où l'on pratique l'irrigation.

Dans la partie située à l'Est du Lac Fetzara, s'étendant jusqu'à la route Annaba- Guelma, les terres cultivées, si elles ne sont pas laissées en jachère, alternent principalement entre la céréaliculture en sec (blé tendre, orge) et la tomate industrielle. On peut y rencontrer le tabac

et un maraîchage (poivron, choux, choux- fleurs, laitue et parfois oignon) sur des superficies réduites.

Les zones de l'Oued Zied et de Kali Toussa situées au Nord du Lac Fetzara, sont généralement inondées pendant l'hiver et leurs terres sont réservées au pâturage. Toutefois, dans certaines parcelles sont cultivées du maraîchage à cycle court (courgettes, cucurbitacées, tomates, haricots...).

Au Sud et à l'Ouest du Lac Fetzara, les terres sont cultivées en céréales ou en 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) et 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 de batteries pour poules de chair ou de ponte et pour dindes) (Fekrache, 2015).

## **5. 2. Occupation urbaine**

Depuis les années 70 jusqu'à nos jours, la croissance industrielle et démographique a conduit à un exode rural massif des populations vers la wilaya d'Annaba. L'accroissement de la population dans les grandes communes a provoqué par conséquent l'extension des zones urbanisées et de nouvelles cités sont implantées de part et d'autres le long du piémont (ex : Oued Zied, Berka Zerga, Hadjar Eddisse et Bergouga).

Les recensements de 1966, 1977, 1987 et 2008, ont permis de constater les populations se concentrent le plus souvent autour des zones industrielles, terres agricoles et des points d'eau. Trois zones de population sont distinguées :

### **- Zone faiblement peuplée**

Elle se localise aux alentours du Lac Fetzara, et plus précisément au Sud. Elle comprend les Cités d' El Eulma, Cheurfà, El Hashassia, Azizi Ahmed, Sidi Hamed et El Gantra. Ce sont des zones dépourvues d'axes de communication et où, les terres cultivables sont rares.

- **Zone moyennement peuplées**

Ce sont les cités d'El Kerma, Houraicha, Griche, Hadjar Eddisse, Oued Zied, Berka Zerga et Derradji Redjem. Ce sont des zones agricoles avoisinant des zones industrielles.

- **Zone fortement peuplée**

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

### **5.3. Occupation industrielle**

Elle est très importante. Les entreprises industrielles sont réparties dans cinq zones industrielles (Foufou, 2018):

- Zone industrielle de Kalitoussa à Berrahal.
- Zone industrielle de Chaiba.
- Zone industrielle de Pont Bouchet.
- Zone industrielle d'Allelick.
- Complexe sidérurgique d'Hadjar.

Avec d'autres entreprises disséminées dans la plaine, ces différentes entreprises sont classées suivant leur activité et leur degré de pollution en :

- Industries particulièrement polluantes (Sider, Ferial, Orelait et Geni-Sider) ;
- Industries alimentaires et agro-alimentaires (Agrifed, etc.) ;
- Entrepôts et entreprises de prestation.

## **6. Sources de pollution dans la zone d'étude**

La pollution des eaux et des sols de la zone humide du Lac Fetzara peut avoir de multiples origines (figure 8). Qu'il s'agisse de pollution urbaine, industrielle et agricole :

- **Dans sa partie Ouest**, le lac reçoit les eaux en provenance de la ville de Berrahal située en amont du lac. Ces eaux sont alors de toutes natures (industrielles, urbaines....)

(Habes, 2013). La plupart des industries dans la région du Lac Fetzara ne sont pas raccordées à un quelconque réseau d'assainissement et même s'il existe, il ne fonctionne pas d'une manière satisfaisante. Par conséquent, des effluents chimiques fortement colorés et toxiques rejoignent le lac, polluant de ce fait ses eaux et les eaux souterraines adjacentes (Khelifaoui et al., 2012).

- **Dans sa partie Est**, le Lac Fetzara reçoit les eaux en provenance de la grande décharge de Berka Zerga, qui accueille les déchets de la ville d'Annaba. Les lixiviats issus de cette décharge vont polluer les eaux et les sols environnant. Toujours dans sa partie Est, le lac reçoit aussi les eaux de l'Oued Zied qui charrie entre autres les eaux usées de l'agglomération portant son nom.

Ces eaux transitant par le Lac Fetzara subissent des modifications et finissent par se déverser partiellement dans l'Oued Meboudja (Habes, 2013).

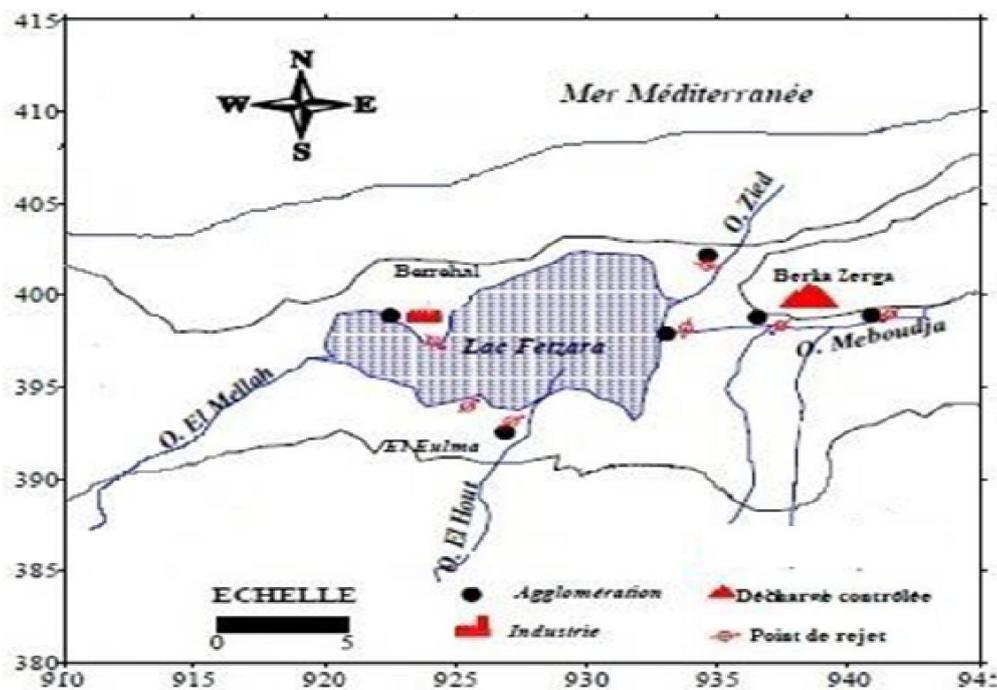


Figure 8. Relation du Lac Fetzara avec les sources de pollution (In Zenati, 2010, modifiée)

## 7. Synthèse climatique

La détermination des paramètres climatiques permet l'estimation de la lame d'eau écoulée ou infiltrée, expliquant ainsi les mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux superficielles et souterraines. Pour cela il est nécessaire de déterminer le bilan hydrique et alors 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 utilisé 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. Cette station 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 Lac Fetzara portent sur 34 ans et concernent les moyennes mensuelles de la période 1980-2014.

### 7.1. Le régime thermique

La température est indicatrice du pouvoir évaporant de l'air et elle est aussi 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 Août sont les mois les plus chauds, avec une moyenne de 25.08°C et le mois le plus froid est celui de Janvier (11.44°C) (tableau 5).

**Tableau 5.** Températures moyennes mensuelles (Les Salines 1980-2014).

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Températures (C°)	23.44	19.70	15.92	12.41	11.44	11.58	13.14	15.26	18.32	22.27	24.60	25.56

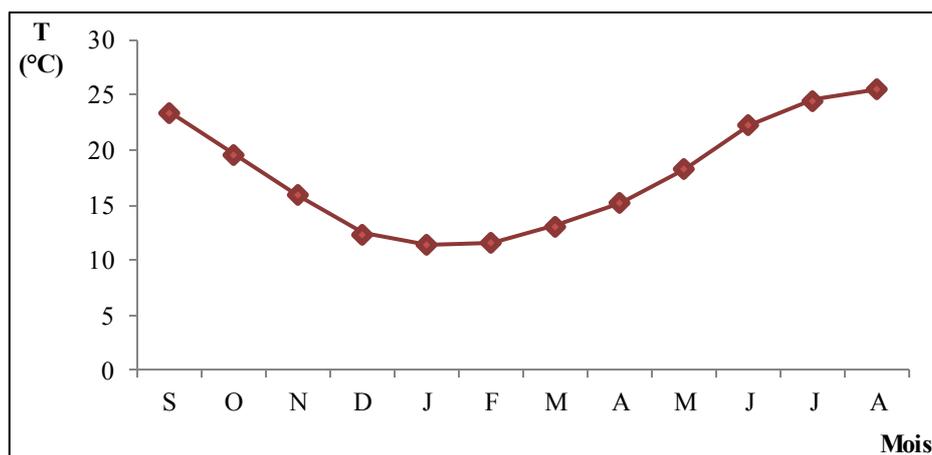


Figure 9. Présentation des données thermiques de la région d'Annaba (Les Salines 1980-2014)

### 7.2. Le régime pluviométrique

La région est soumise à des conditions climatiques marquées par de forts contrastes saisonniers et des irrégularités très nettes des précipitations. Son mois le plus pluvieux correspond au mois de Décembre avec une moyenne mensuelle de 113.76 mm. Le mois le plus sec est le mois de Juillet avec une moyenne de 2.56 mm (tableau 6).

Tableau 6. Précipitations moyennes mensuelles (Les Salines 1980-2014)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
Précipitations (mm)	37.75	63.92	85.54	113.76	100.36	80.84	74.94	55.45	35.77	11.91	2.56	7.86	670.8

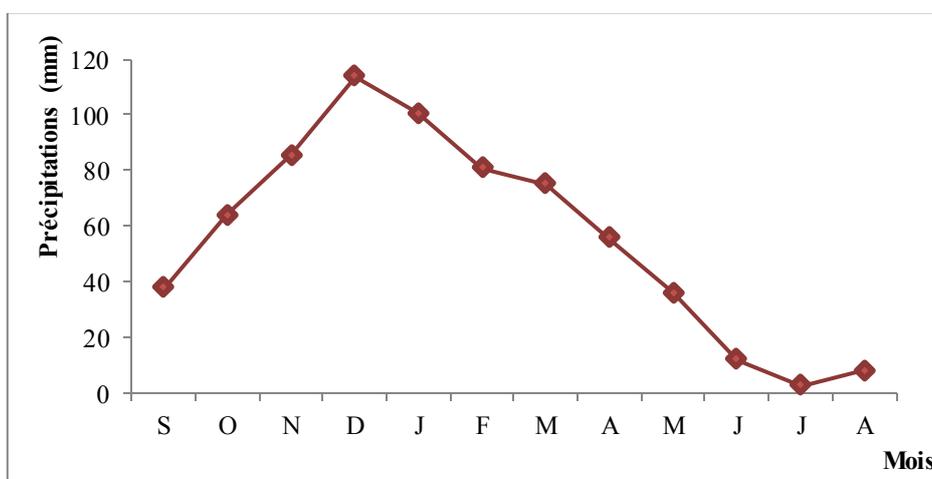


Figure 10. Présentation des données pluviométriques de la région d'Annaba (Les Salines 1980-2014)

### 7.3. Diagramme pluviothermique

Ce diagramme est obtenu par la combinaison des températures et des précipitations moyennes mensuelles sur la même période d'observation, selon la relation :  $P \text{ (mm)} = 2T \text{ (}^\circ\text{C)}$ . Il permet de déterminer les périodes sèches et humides (figures 11).

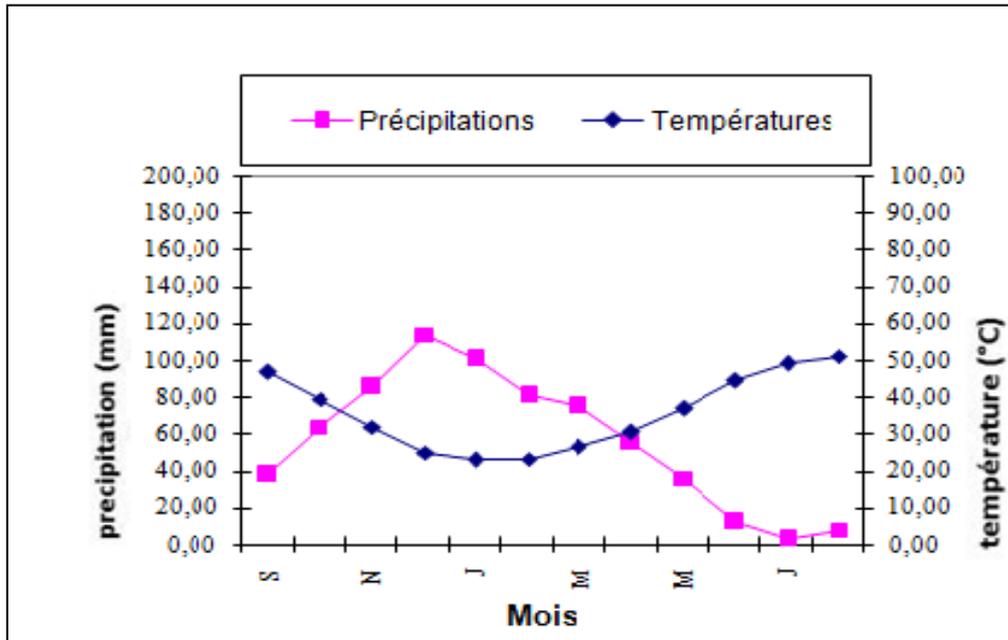


Figure 11. Diagramme pluviothermique (Les Salines 1980-2014)

D'après ce diagramme pluviothermique, deux saisons bien distinctes peuvent être déterminées :

- Une saison sèche et chaude qui s'étalant du mois de Mai jusqu'au mois de Septembre, marquée par une forte évaporation provoquée par l'augmentation de la température.
- Une saison humide plus longue, s'étendant du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai, caractérisée par des précipitations importantes avec un maximum au mois de Décembre.

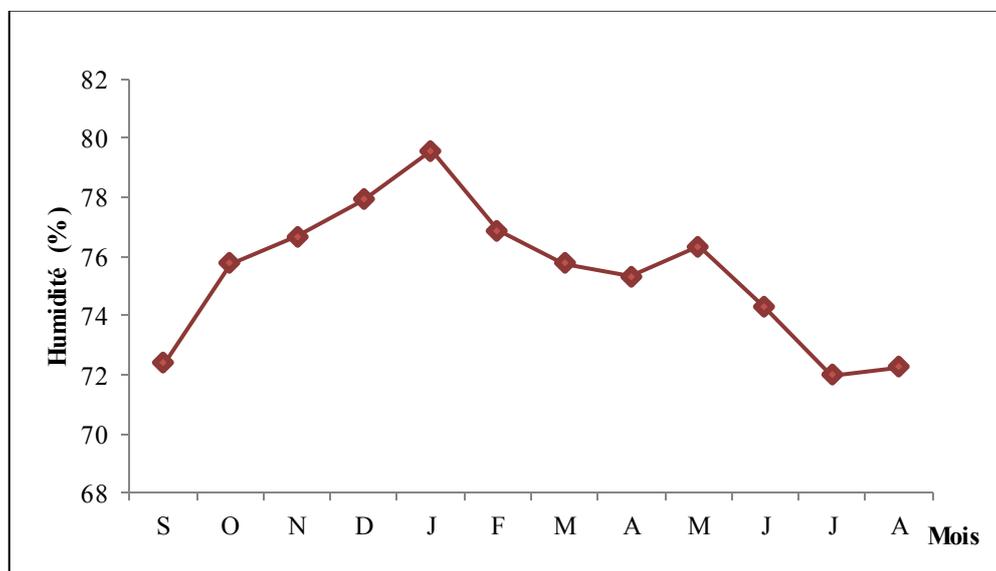
### 7.4. L'humidité relative

Elle correspond au rapport de la tension de vapeur réelle observée à la tension de vapeur saturante à la même température.

On a pu remarquer que l'humidité maximale est de l'ordre de 79.57 % au mois de Janvier, par contre l'humidité minimale est de 72.0 % au mois de Juillet, avec une moyenne annuelle de l'ordre de 75.42 % (tableau 7).

**Tableau 7.** Moyennes mensuelles de l'humidité relative (Les Salines 1984-2013)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moyenne
H %	72.39	75.78	76.68	77.91	79.57	76.87	75.7	75.32	76.34	74.28	72.0	72.25	75.42



**Figure 12.** Humidité relative (Les Salines 1984-2013)

### 7.5. Le vent

D'après la station météorologique Les Salines, les vents dominants sont de direction NW-SE avec des vitesses moyennes de 3.27 m/s (tableau 8). Ces vents en contact avec le massif de l'Edough et la barrière montagneuse du Sud, déversent des pluies au passage.

**Tableau 8.** Moyennes mensuelles de la vitesse des vents (Les Salines 1984-2013)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Vitesse des vents (m/s)	3.68	2.74	2.58	3.23	3.34	3.56	3.51	3.51	3.26	3.06	3.45	3.40

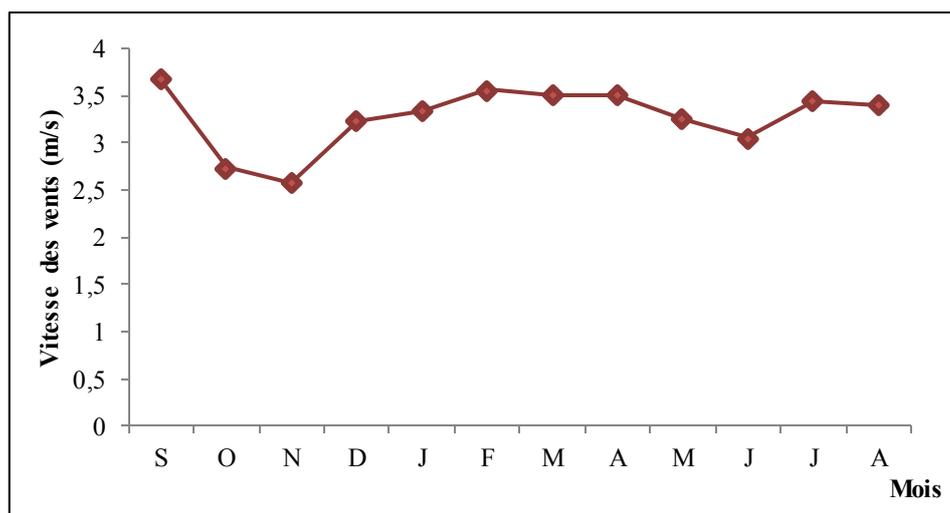


Figure 13. Vitesse des vents (Les Salines 1984-2013)

### 7.6. L'évaporation

L'évaporation mensuelle varie au cours de l'année. Sa valeur maximale (tableau 9) est enregistrée en Juillet et Août (respectivement 153.9 mm et 154.3 mm) et la valeur minimale en Janvier (61.9 mm). L'évaporation totale moyenne annuelle est très importante puisqu'elle est de 1220 mm/an. Dans cette région le déficit hydrique est très important (évaporation > précipitations) de Mars à Novembre.

Tableau 9. Evaporation moyennes mensuelles (Les Salines 1982-2011)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Évaporation (mm)	127.9	99.8	79.7	66	61.9	66.9	88	87.3	103.9	130.4	153.9	154.3

### 7.7. Le bilan hydrique

Le but de l'étude du bilan hydrique est d'évaluer la répartition des quantités d'eaux reçues sur une surface entre ses différents composants (écoulement, infiltration et évaporation). Il est calculé par la méthode de Thornthwaite, selon la formule suivante :

$$P = ETR + I + R$$

Avec :

**P** : Précipitation moyenne annuelle en (mm) ;

**ETR** : Evapotranspiration réelle moyenne annuelle en (mm) ;

**I** : Infiltration moyenne annuelle (mm) ;

**R** : Ruissellement moyen annuel (mm).

### 7.7.1. L'évapotranspiration

L'évapotranspiration est la plus importante des paramètres. Elle 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 (ET) est l'ensemble des phénomènes d'évaporation (processus physique) et de transpiration (processus biologique).

On distingue l'évapotranspiration potentielle (ETP) et l'évapotranspiration réelle (ETR)

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

C'est la somme des quantités d'eau pouvant s'évaporer et transpirer sur une surface donnée et pendant une période bien définie, en considérant des apports d'eau suffisants.

Pour estimer l'évapotranspiration potentielle, on utilise la 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 :

$$\text{ETP (mm)} = 16 (10 T/ I)^a \times k$$

Où

$$I = \sum i \quad i = (T/5)^{1.5}$$

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

Avec:

ETP: évapotranspiration potentielle en mm.

T: Température moyenne mensuelle °C.

i: Indice thermique mensuel.

I: Indice thermique annuel.

K: Coefficient d'ajustement mensuel.

a : Exposant climatique.

**Tableau 10.** ETP selon la formule de Thornthwaite à la station Les Salines (1980-2014)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
<b>I</b>	10.35	8.08	5.74	3.95	3.43	3.51	4.25	5.42	7.12	9.6	11.12	11.86	84.4
<b>ETP</b>	108.8	75.65	44.2	26.3	23.8	23.9	36.7	52.7	80.9	117.5	142.9	144.7	878.1

**- 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.

On estime l'évapotranspiration réelle (ETR) par la méthode de Thornthwaite qui repose sur le volume des précipitations. Trois cas peuvent se présenter :

- 1<sup>er</sup> cas:  $P \geq ETP \Rightarrow ETR = ETP$

Il y a reconstitution des réserves du sol jusqu'à saturation. Le surplus de précipitations constitue l'écoulement superficiel.

- 2<sup>ème</sup> cas:  $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$

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

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

Dans ce dernier cas on aura un déficit qui représente la quantité d'eau à apporter pour l'irrigation. C'est le déficit agricole (DA).

**7.7.2. Le bilan hydrique**

L'établissement du bilan hydrique nous permet de connaître les différents paramètres (ETP, ETR, RFU, Def, Exc) qui nous aident 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 d'eau au point où la RFU sera complètement vide. Il en résulte alors un déficit agricole (DA).

La figure 14 présente le graphisme du bilan d'eau (Thornthwaite) qui illustre les résultats du tableau N° 11 de la station Les Salines.

**Tableau 11.** Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite (Les Salines 1980/2014)

Paramètres ► Mois ▼	T (°C)	ETP (mm)	Pr (mm)	RFU (mm)	ETR (mm)	Def (mm)	Exc (mm)
<b>S</b>	23.4	109.0	37.75	0.0	37.8	71.2	0.0
<b>O</b>	19.7	74.7	63.92	0.0	63.9	10.4	0.0
<b>N</b>	15.9	44.4	85.54	41.1	44.4	0.0	0.0
<b>D</b>	12.4	26.4	113.8	100.0	26.4	0.0	28.5
<b>J</b>	11.4	24.4	100.4	100.0	24.4	0.0	76.0
<b>F</b>	11.6	24.3	80.84	100.0	24.3	0.0	56.5
<b>M</b>	13.1	37.3	75.94	100.0	37.3	0.0	37.7
<b>A</b>	15.3	52.5	55.45	100.0	52.5	0.0	2.9
<b>M</b>	18.3	81.1	35.77	54.7	81.1	0.0	0.0
<b>J</b>	22.3	117.4	11.91	0.0	66.6	50.8	0.0
<b>J</b>	24.6	143.5	2.56	0.0	2.6	140.9	0.0
<b>A</b>	25.6	144.1	7.86	0.0	7.2	136.2	0.0
<b>Annuel</b>	<b>17.8</b>	<b>878.6</b>	<b>670.7</b>		<b>469.0</b>	<b>409.6</b>	<b>201.6</b>

Ce bilan montre que :

- l'ETP atteint son maximum en Août (144.1 mm) et son minimum en Février (24.3 mm).
- La reconstitution de la RFU s'effectue au mois de Novembre (41.1 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 (76 mm) et un minimum au mois d'Avril (2.9 mm).
- L'excédent égal à (201.6 mm) représentant 31 % des précipitations annuelles, alors que l'ETR est de l'ordre de (469 mm) représentant 69 % des précipitations annuelles.
- Le déficit agricole DA débute au mois de Juin et se poursuit jusqu'au mois d'Octobre.

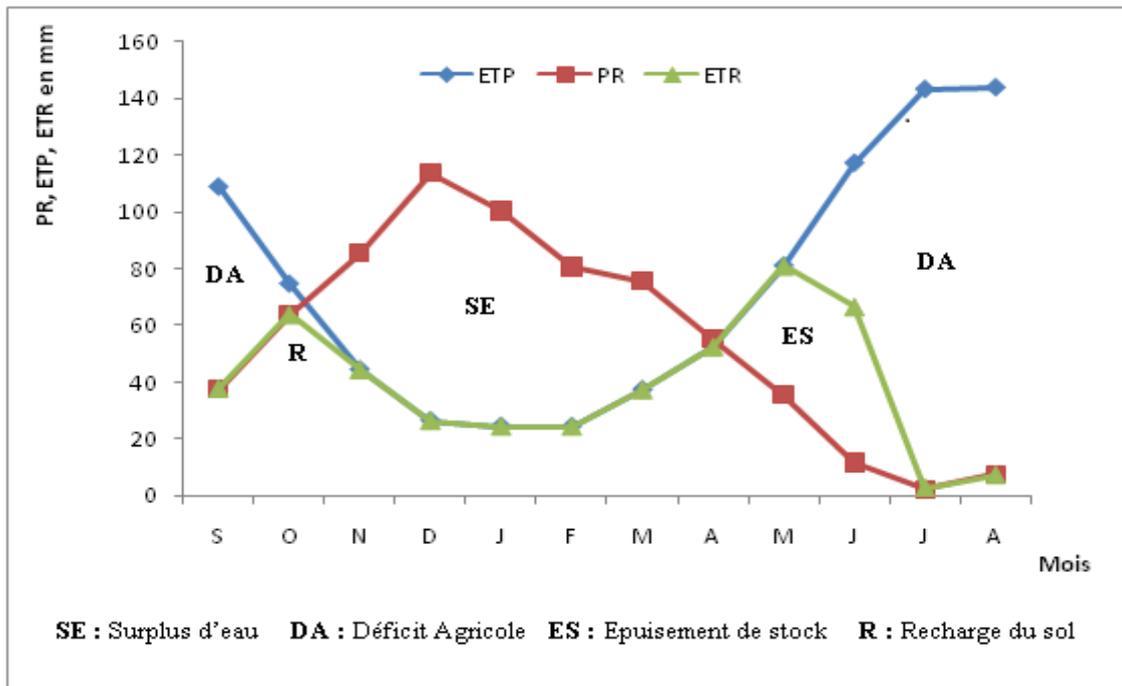


Figure 14. Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite (station Les Salines, 1980-2014).

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

Il est 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)

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

**P**: total des précipitations annuelles (mm).

**t**: température moyennes mensuelle (°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 pour a compris entre 10 et 20. En dessous de 10, c'est l'aridité. Pour la région d'Annaba, l'indice d'aridité annuel (A) de Martonne est de 24.6, 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 Août.

**Tableau 12.** Indices d'aridité de Martonne (1926) de la station Les salines d'Annaba (1981-2011)

Paramètres►	T (°C)	P (mm)	A
Mois▼			
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
O	25.8	9.69	3.248
<b>Annuel</b>	<b>17.8</b>	<b>686.3</b>	<b>24.687</b>

### Conclusion

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

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

La région du lac Fetzara est constituée des quatre types de sol suivants:

Sol vertisol, sol peu évolué, sol hydromorphe et sol halomorphe.

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 une modification de la composition chimique des eaux du Lac Fetzara.

L'analyse des données climatiques d'une série d'observation de 34 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 (670.7 mm).

L'estimation du bilan d'eau par la méthode de Thornthwaite a montré qu'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 aussi un déficit agricole enregistré à partir du mois de Juin jusqu'au mois d'Octobre (période correspondant à l'épuisement du stock d'eau dans les sols).

**CHAPITRE III**  
**MATERIEL ET METHODES**

## **CHAPITRE III. MATERIEL ET METHODES**

Pour atteindre l'objectif principal de ce travail de thèse, déjà indiqué dans l'introduction, nous avons utilisé et adopté le matériel et les méthodes suivantes qui nous permettent d'acquérir des données récentes relatives aux eaux et sédiments du Lac Fetzara. Ces données nous permettent de réaliser les études suivantes constituant le corps du chapitre intitulé résultats et discussion :

- L'étude des paramètres physico-chimiques des eaux superficielles et souterraines du Lac Fetzara.
- L'étude physicochimique des sédiments du Lac Fetzara.
- L'étude de la variation spatiale entre les différents points échantillonnés.
- L'étude de la variation temporaire des paramètres physicochimiques entre les saisons humides et les saisons sèches et entre les deux années d'étude.

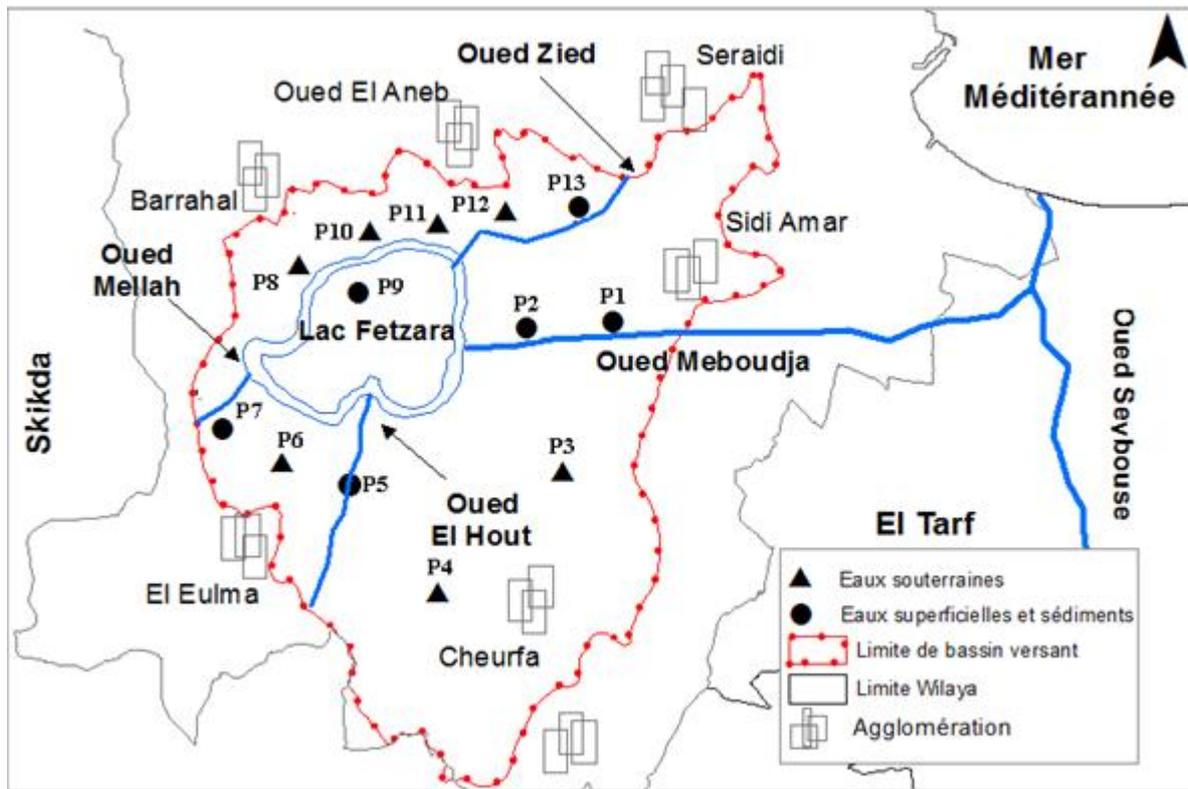
### **1. Echantillonnage**

L'échantillonnage des eaux et des sédiments est fait de manière à couvrir le plus possible de stations (accessibles même en hiver) afin de nous rapprocher le plus possible des caractéristiques physico-chimiques réelles des eaux superficielles et souterraines ainsi que des sédiments du Lac Fetzara.

#### **1.1. Points de prélèvements**

Les points d'échantillonnage sont répartis de la façon suivant (figure 15) :

- 06 points d'échantillonnage des eaux de surface : Les prélèvements d'eau ont été effectués dans les principaux oueds, Oued Zied, Oued El Hout et Oued Mellah, qui alimentent le lac, dans le lac et le canal principal, ainsi qu'en tête de l'Oued Meboudja assurant le drainage du Lac Fetzara.
- 07 points d'échantillonnage des eaux souterraines : Les prélèvements d'eau sont faits dans des puits situés à la périphérie du lac.
- 06 points d'échantillonnage des sédiments : Les sédiments ont été prélevés dans les mêmes points d'échantillonnage des eaux de surface.



**Figure 15.** Localisation des points d'échantillonnage des eaux et des sédiments dans le Lac Fetzara

Les données GPS des points d'échantillonnage sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau 13.** Les données GPS des points d'échantillonnage

Points de prélèvements	Coordonnées géographiques		Nature du milieu
	Latitude	Longitude	
P1	N : 36°47.174'	E : 007° 35.467'	Oued
P2	N : 36°47.197'	E : 007° 34.718'	Canal principal
P3	N : 36°46.080'	E : 007° 35.060'	Puits
P4	N : 36°43.531'	E : 007° 31.464'	Puits
P5	N : 36°44.084'	E : 007° 28.848'	Oued
P6	N : 36°47.107'	E : 007° 23.964'	Puits
P7	N : 36°44.778'	E : 007° 26.208'	Oued
P8	N : 36°49.691'	E : 007° 29.427'	Puits
P9	N : 36°49.122'	E : 007° 29.635'	Le lac
P10	N : 36°50.406'	E : 007° 31.174'	Puits
P11	N : 36°50.564'	E : 007° 31.609'	Puits
P12	N : 36°50.096'	E : 007° 32.966'	Puits
P13	N : 36°49.610'	E : 007° 36.231'	Oued

## **1.2. Périodes de prélèvement**

Afin de mettre en évidence les principales caractéristiques physico-chimiques des eaux et des sédiments du Lac Fetzara durant les différentes saisons humides et sèches des années 2015 et 2016, quatre campagnes d'analyses physico-chimiques ont été effectuées comme suit :

- Les première et troisième campagnes sont effectuées en Janvier 2015 et 2016. Elles correspondent à la saison humide, période hivernale qui coïncide avec la période de recharge des aquifères et des cours d'eaux.
- Les deuxième et quatrième campagnes sont effectuées en Juin 2015 et 2016. Elles correspondent à la saison sèche

## **1.3. Echantillonnage**

Pour assurer la fiabilité de nos résultats analytiques et leur interprétation adéquate, nous avons effectué l'échantillonnage des eaux avec le plus grand soin possible.

### **1.3.1. Prélèvement des échantillons**

Les échantillons d'eau prélevés sont conservés dans des flacons en polyéthylène téréphtalate de volume 1,5 L préalablement rincées avec l'eau échantillonnée, et transportés dans une glacière jusqu'au laboratoire où sont réalisées les mesures de certains paramètres chimiques.

Les sédiments sont prélevés en surface à l'aide d'une truelle, dans les mêmes points d'échantillonnage que ceux utilisés pour le prélèvement des eaux de surface. Seuls les 10 premiers centimètres de sédiments ont été prélevés et introduits dans des sachets en plastiques, et conservés dans une glacière à une température approximative de 4°C.

### **1.3.2. Traitement et conservation des échantillons**

Afin d'empêcher d'une part l'action des micro-organismes sur la solution et d'autre part pour retirer les éléments solides en suspension pouvant interagir ultérieurement avec les sels solubles de la solution, les échantillons d'eau sont filtrés sur papier filtre circulaire dès l'arrivée au laboratoire. Les échantillons filtrés sont ensuite stockés au frais et à l'abri de la lumière qui peut modifier leur composition chimique.

Les échantillons des sédiments ramenés au laboratoire sont divisés en deux lots dont l'un est séché à l'air libre pendant quelques jours puis broyé et tamisé à la maille 2 mm pour obtenir de la terre fine qui va servir à toutes les analyses physicochimiques. L'autre lot est stocké

dans des sachets en plastiques et conservé dans un réfrigérateur pour être utilisé lors de l'analyse de l'azote (nitrate et ammonium).

## 2. Analyses des échantillons au laboratoire

### 2.1. Analyse des eaux (superficielles et souterraines)

En plus des mesures de température, de pH, de conductivité électrique, de l'oxygène dissous qui sont effectuées *in situ* avec une sonde-multi-paramètres (HANNA HI982/X), l'analyse chimique des échantillons d'eau a été réalisée au niveau du laboratoire de recherche sols et développement durable de l'université Badji Mokhtar d'Annaba (Algérie). Elle concerne :

- **Les ions nitrate ( $NO_3^-$ )** : qui sont dosé par spectrophotométrie. La méthode utilisée pour le dosage est celle au salicylate de sodium (Rodier, 1978).

- **Les ions nitrite ( $NO_2^-$ )** : qui sont dosé par spectrophotométrie. La méthode utilisée pour le dosage est celle du réactif de Zambelli (Rodier, 1978).

- **Les ions ammonium ( $NH_4^+$ )** : qui sont dosé par spectrophotométrie. La méthode utilisée pour le dosage est celle du réactif de Nessler (Rodier, 1978).

- **Les ions chlorure ( $Cl^-$ )** : qui sont quantifiés par titrimétrie (méthode de Mohr) (Rodier, 1978).

### 2.2. Analyse des sédiments

- **Le pH** : Le pH des sédiments est mesuré dans une suspension sol/eau (1/5) et la lecture se fait sur un pH-mètre (Bonneau et Souchier, 1994).

- **La conductivité électrique** : Elle est déterminée sur une suspension sol/eau selon un rapport 1/5, à l'aide d'un conductimètre (Bonneau et Souchier, 1994).

- **Le carbone organique** : Le carbone organique est déterminé par titrage selon la méthode Anne (Bonneau et Souchier, 1994).

- **La matière organique** : La teneur en matière organique dans les sédiments est estimée à partir du taux de carbone organique (C) en utilisant la relation (Roussel et *al.*, 2001) suivante :

$$MO = \% C \times 1.72$$

- **La texture** : La détermination de la texture des sédiments est réalisée par la méthode de densimétrie selon la méthode MA-TER-6.

- **Les ions nitrate ( $NO_3^-$ )** : Les ions nitrate sont déterminés par spectrophotométrie après extraction par le sulfate de potassium (Mathieu et Pieltain, 2003).

- **Les ions ammonium ( $NH_4^+$ )** : Les ions ammonium sont déterminés par spectrophotométrie après extraction par le chlorure de potassium (Mathieu et Pieltain, 2003).

### **3. Analyse statistique des résultats obtenus**

Compte tenu du nombre important des résultats de mesures acquis, nous avons utilisé un moyen statistique de traitement de données qui est l'Analyse en Composantes Principales (ACP). L'ACP est un outil d'analyse des données qui permet d'expliquer la structure des corrélations ou des covariances en utilisant des combinaisons linéaires des données originales. Son utilisation permet de réduire et d'interpréter les données sur un espace réduit (Lagarde, 1995). En plus, elle a pour objectif de présenter, sous une forme graphique, le maximum de l'information contenue dans une table de données, basées sur le principe de double projection sur les axes factoriels. A cet effet, nous avons utilisé dans notre étude le logiciel Xlstat version 2016.

La comparaison des moyennes de chacun des paramètres physicochimiques entre les deux saisons (humide et sèche) et entre les deux années (2015 et 2016), est faite par le test *t* de Student pour échantillons indépendants à l'aide du logiciel Minitab version 2016.

**CHAPITRE IV**

**RESULTATS ET DISCUSSION**

## CHAPITRE IV. RESULTATS ET DISCUSSION

### 1. Etude des eaux

#### 1.1. La température (T)

La température de l'eau est un facteur écologique très important qui régit pratiquement la totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques (Chapman et Kimstch, 1996). Les eaux souterraines gardent généralement une fraîcheur constante, mais la température des eaux de surface varie selon plusieurs facteurs (Bouziani, 2000). L'élévation de température s'accompagne de la diminution de la densité, d'une réduction de la viscosité, d'une augmentation de la tension de vapeur saturante à la surface (évaporation) et d'une diminution de la solubilité des gaz (Rodier *et al.*, 2009).

##### 1.1.1. La température dans les eaux superficielles

L'évolution temporelle de la température des eaux superficielles du Lac Fetzara (figure 16) montre des valeurs minimales en hiver et maximales en été. Ces valeurs oscillent entre 11°C (P2) et 18°C (P13) en période humide, et entre 23°C (P7) et 25°C (P13) en période sèche.

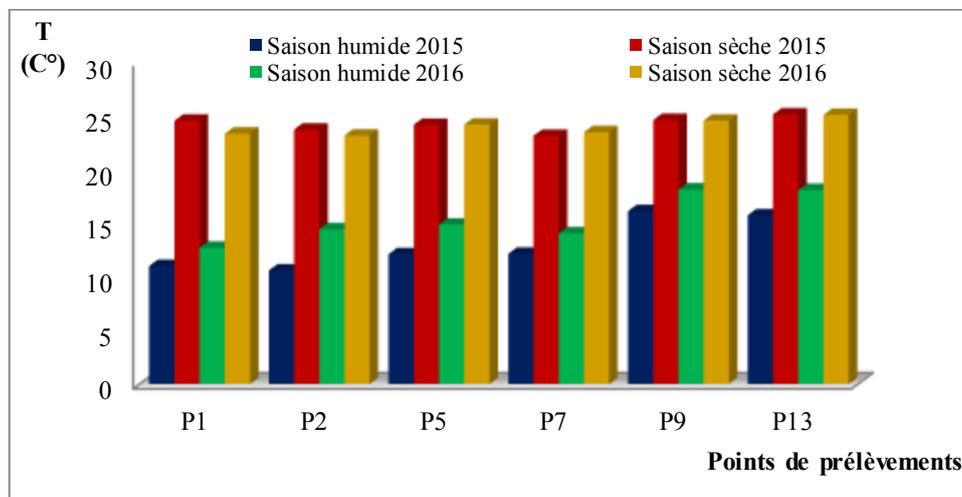
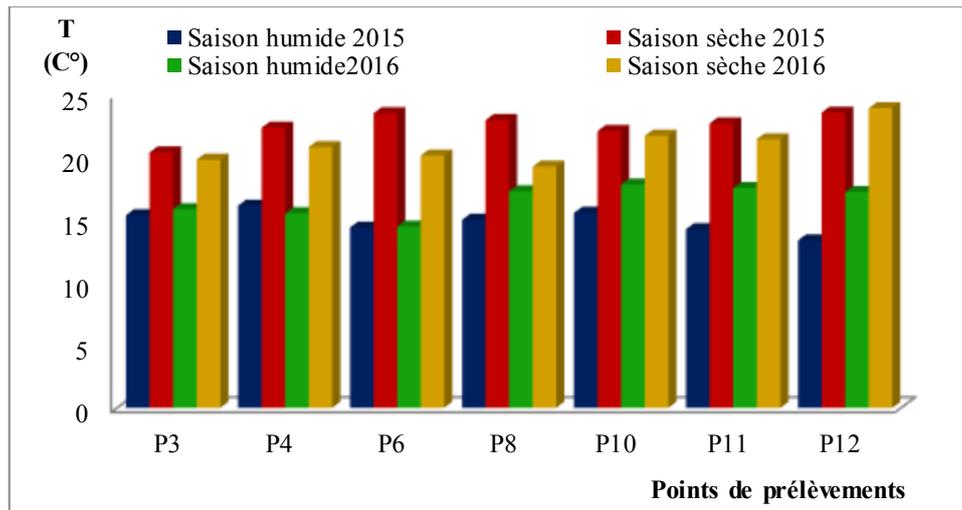


Figure 16. Variation de la température des eaux superficielles du Lac Fetzara

##### 1.1.2. La température des eaux souterraines

Les résultats de mesures obtenus montrent que les valeurs de la température ne présentent pas de grandes variations d'un puits à l'autre (figure 17), avec un minimum de 13 °C (P12) et un maximum de 24 °C (P12). Les plus faibles valeurs sont enregistrées en saison humide.



**Figure 17.** Variation de la température des eaux souterraines du Lac Fetzara

L'observation de la température des eaux superficielles et souterraines du Lac Fetzara montre une évolution saisonnière : elle augmente durant le mois le plus chaud (Juin) et elle diminue durant le mois le plus frais (Janvier). Elle suit la température du climat de la région (Fekrache, 2015 ; Merghem *et al.*, 2016), tout en restant inférieure à la valeur maximale de 25°C (JORA, 2011).

## 1.2. Le potentiel d'hydrogène (pH)

Correspondant à la concentration d'ions d'hydrogène, le pH permet de mesurer l'acidité ou la basicité d'une eau. Dans les eaux naturelles, il dépend de l'origine de celles-ci et de la nature des terrains traversés (Savary, 2010). Les directives du Conseil des communautés européennes précisent que l'eau ne doit pas être agressive en indiquant comme valeurs guides :  $6.5 < \text{pH} < 9.5$  (Rodier *et al.*, 2009). La norme édictée par la réglementation locale (JORA, 2011) en recommande un pH situé entre 6.5 et 9.

### 1.2.1. Le pH des eaux superficielles

Les valeurs du pH des eaux superficielles du Lac Fetzara ne montrent pas de variations notables, avec un minimum de 7.2 (P2) et un maximum de 8.9 (P5) (figure 18) ce qui témoigne d'une alcalinité du milieu (Drouart et Vouillamoz, 1999).

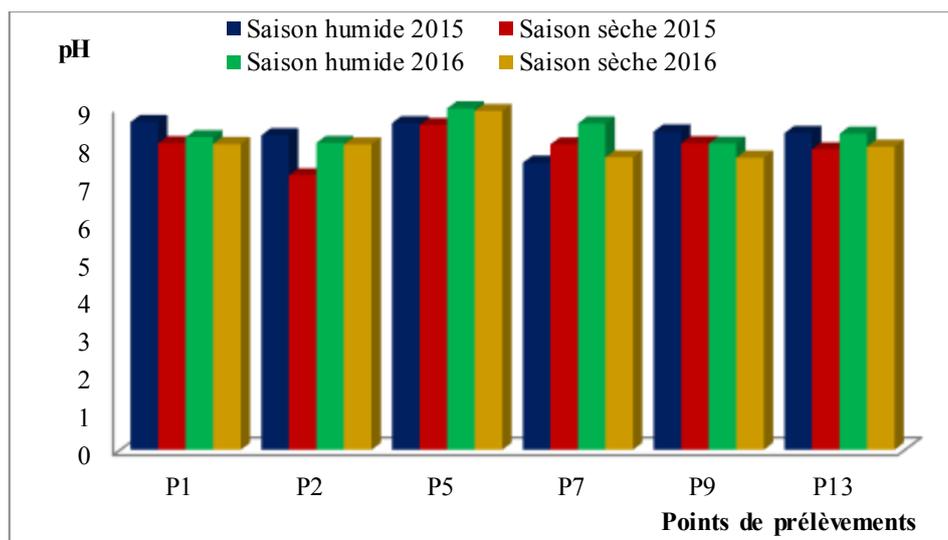


Figure 18. Variation du pH des eaux superficielles du Lac Fetzara

### 1.2.2. Le pH des eaux souterraines

La figure 19 montre un équilibre du pH presque dans tous les puits sélectionnés et durant les deux périodes d'études. Ces valeurs sont comprises entre 7.2 (P10) et 8.7 (P8) en saison humide et entre 7 (P10) et 8.8 (P4) en saison sèche.

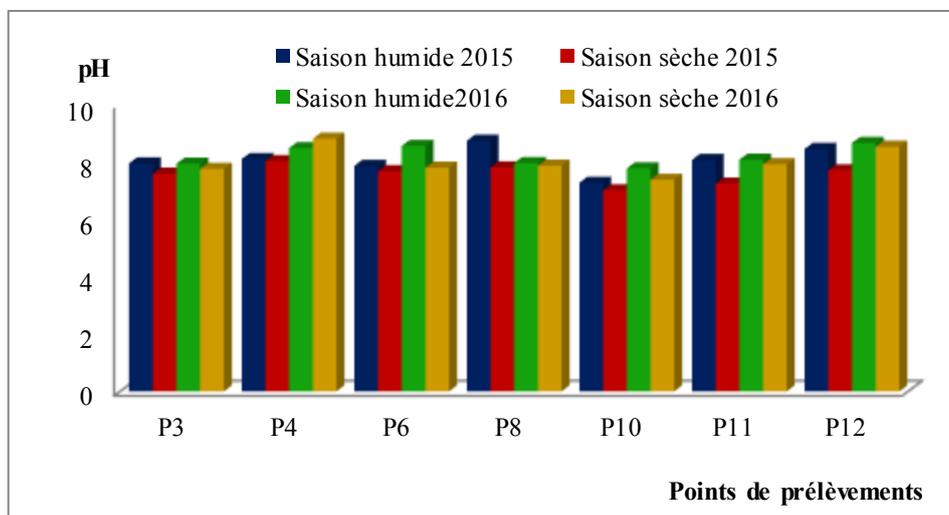


Figure 19. Variation du pH des eaux souterraines du Lac Fetzara

Les valeurs du pH des eaux superficielles et souterraines du Lac Fetzara sont considérées normales car elles se situent dans la gamme de 6.5 à 9 (JORA, 2011). Le pH de ces eaux correspond alors au type d'eau alcaline (Drouart et Vouillamoz, 1999). L'environnement physique, caractérisé en partie par des terrains calcaires, serait probablement à l'origine de cette alcalinité (Savary, 2010). Il est important aussi de noter que les valeurs du pH

diminuent en période sèche dans la majorité des points. Cette diminution traduit l'augmentation de la minéralisation qui entraîne une élévation de la force ionique de l'eau et donc une diminution du pH (Zahi, 2014).

### 1.3. La conductivité électrique

La conductivité électrique est proportionnelle à la teneur globale en espèces minérales ionisées et elle varie en fonction de la température. Certaines activités industrielles et agricoles peuvent l'augmenter par leurs rejets riches en éléments minéraux (Savary, 2010). Dans les eaux de surface des modifications importantes de la conductivité électriques peuvent intervenir rapidement au cours de la journée. Il est admis que des valeurs supérieures à 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  désignent une situation anormale (Rodier et *al.*, 2009). Le tableau ci-dessous donne quelques indications sur la relation existant entre la minéralisation et la conductivité électrique.

**Tableau 14.** Classe de la minéralisation des eaux d'après la conductivité électrique (Rodier et *al.*, 2009).

Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation
CE < 100	très faible
100 < CE < 200	faible
200 < CE < 333	moyenne accentuée
333 < CE < 666	accentuée
666 < CE < 1 000	importante
CE > 1 000	élevée

#### 1.3.1. La conductivité électrique des eaux superficielles

L'évolution de la conductivité électrique des eaux superficielles du Lac Fetzara (figure 20) est bien visible à l'échelle des saisons où les fortes valeurs s'observent en période sèche. Elles atteignent 8946  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en Juin 2016 alors que les valeurs les plus faibles se manifestent en Janvier 2015, elles sont de l'ordre de 685  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , indiquant une minéralisation importante à élevée (Rodier et *al.*, 2009). Les valeurs les plus fortes sont trouvées dans le point 9. Ce dernier qui est situé dans la partie la plus basse du lac (partie centrale), est très affectée par les apports naturels (apports salifères) (Zahi, 2014), ainsi que par les apports anthropiques (agricoles, urbains et industriels) (El Morhit, 2012). Sur l'ensemble des échantillons, trois valeurs dépassent la valeur maximale de 2800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (JORA, 2011). Les fortes

minéralisations sont localisées surtout au centre du lac (P9) et dans le canal principal (P1) ainsi que dans l'Oued Meboudja (P2) à la sortie du lac Fetzara.

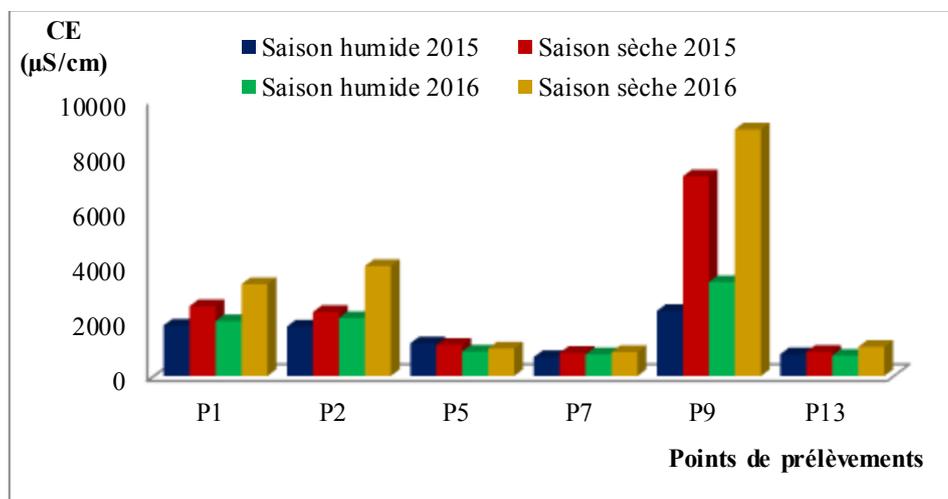


Figure 20. Variation de la conductivité électrique des eaux superficielles du Lac Fetzara

### 1.3.2. La conductivité électrique des eaux souterraines

Les valeurs enregistrées durant les périodes d'étude varient de 677 µS/cm à 3546 µS/cm, avec une valeur minimale enregistrée au puits 3 et la valeur maximale observée dans le puits 4 (figure 21). Ces valeurs correspondent à une minéralisation importante à élevée (Rodier et al., 2009). Les fortes valeurs sont localisées dans la partie Sud (P4) du Lac Fetzara en périodes humide et sèche.

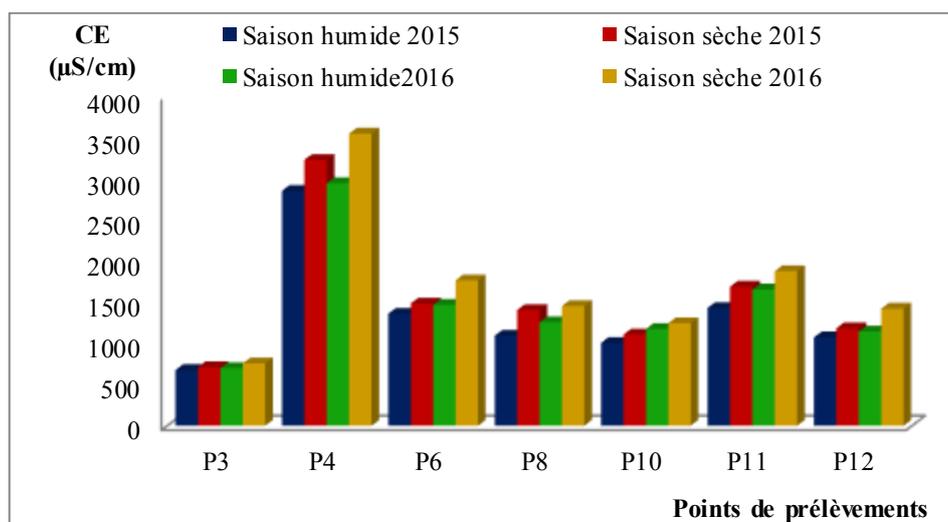


Figure 21. Variation de la conductivité électrique des eaux souterraines du Lac Fetzara

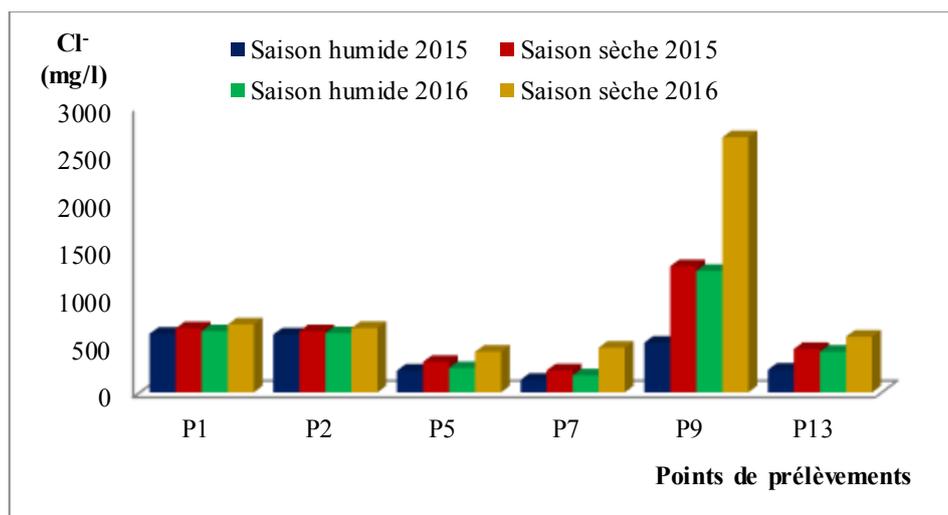
La répartition temporelle de la conductivité électrique des eaux superficielles et souterraines du Lac Fetzara montre une diminution pendant la période humide dans tous les points de mesures. Les variations des facteurs climatiques constituent également une source de la variation de la minéralisation. En effet, au cours de la saison pluvieuse, les concentrations baissent à cause de la dilution par les eaux pluviales. Par contre, au cours de la saison sèche, l'évaporation importante dans la région du Lac Fetzara entraîne un accroissement des concentrations en ions minéraux (Fekrache, 2015 ; Kotchi et *al.*, 2016).

#### **1.4. L'ion chlorure**

Les ions chlorure sont très répandus dans les milieux naturels sous forme de sels de sodium (NaCl), de potassium (KCl) et de calcium (CaCl<sub>2</sub>) (Gaujous, 1995). Les concentrations en ions chlorure des eaux sont extrêmement variées et liées principalement à la nature des terrains traversés (Rodier et *al.*, 2009). Celles rencontrées dans les eaux naturelles sont généralement de 10 à 20 mg/l (Rejsek, 2002), mais dans certaines régions, la traversée de marnes salifères peut conduire à des concentrations exceptionnelles de l'ordre de 1000 mg/l (Rodier et *al.*, 2009).

##### **1.4.1. Les ions chlorure dans les eaux superficielles**

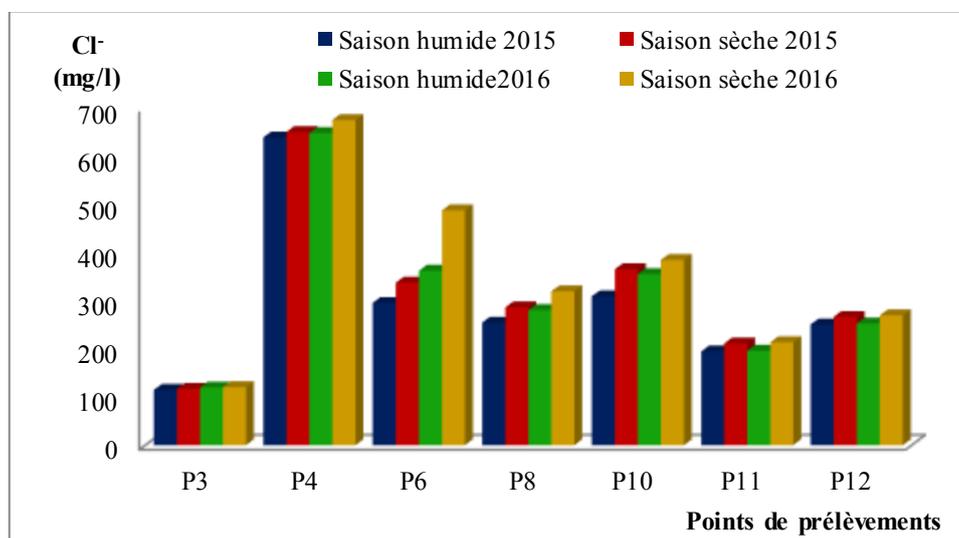
Les concentrations en ions chlorure dans les eaux superficielles varient globalement entre 131.3 mg/l et 2678 mg/l (figure 22), avec un pic important au niveau du point 9 (point central) et qui dépasse de loin la norme admise de 600 mg/l (JORA, 2011). Cette valeur extrêmement élevée peut être liée non seulement à des apports naturels (salifères) (Zahi, 2014) mais aussi aux rejets agricoles (Sigg et *al.*, 2006), industriels et urbains (Rodier et *al.*, 2009) effectués dans le Lac Fetzara. Sur l'ensemble des échantillons, trois valeurs dépassent la valeur maximale de 600 mg/l (JORA, 2011). Donc les fortes teneurs en ion chlorure se manifestent surtout au point (P9) situé dans le centre du lac et aux points (P1 et P2) localisés à l'Est du lac.



**Figure 22.** Variation de la concentration en ions chlorure dans les eaux superficielles du Lac Fetzara

#### 1.4.2. Les ions chlorure dans les eaux souterraines

Les concentrations en ions chlorure dans les eaux souterraines (figure 23) oscillent entre 114.9 mg/l (P3) et 675.1 mg/l (P4). Les fortes concentrations (> 500 mg/l) sont enregistrées dans la partie Sud du lac.



**Figure 23.** Variation de la teneur en ions chlorure dans les eaux souterraines du Lac Fetzara

L'évolution temporelle est marquée par un léger fléchissement des concentrations en ions chlorure pendant la saison humide par rapport à la saison sèche. Par leur effet de dilution, les eaux pluviales de la saison humide en serait probablement la cause de cette atténuation

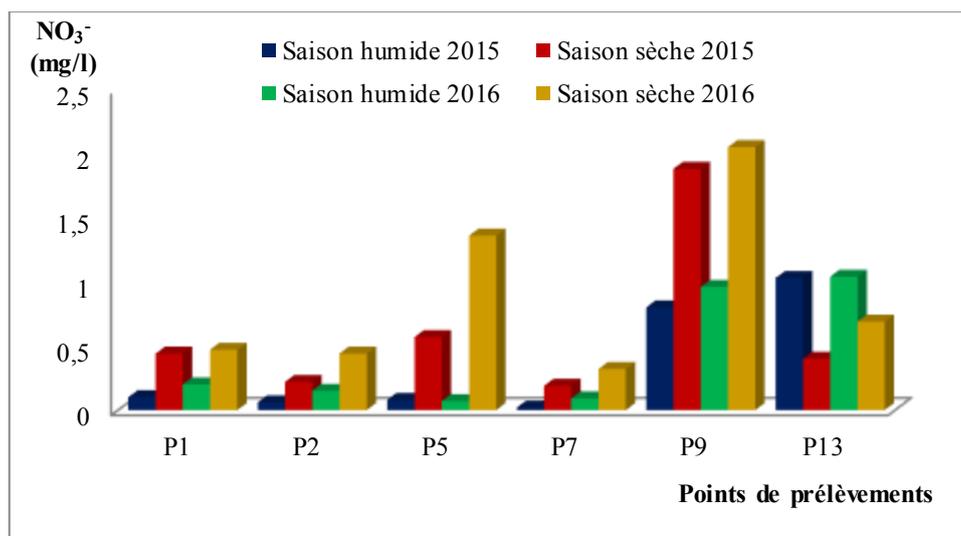
(Makhoukh et *al.*, 2011). Comparée à la grille de qualité des eaux (ANRH, 2009), la majorité des eaux de la zone humide du Lac Fetzara présentent une pollution notable à importante.

### **1.5. L'ion nitrate**

Les ions nitrate constituent le stade final d'oxydation de l'azote (Gilli et *al.*, 2004). Ils sont abondants dans le sol, dans la plupart des eaux et dans les plantes où ils sont nécessaires à la synthèse des espèces végétales. Sans apport artificiel, les eaux de surface ne contiennent pas plus de 10 mg/l d'ions nitrate (Savary, 2010), mais la concentration de ceux-ci peut atteindre des valeurs élevées en cas de ruissellement provenant des terres agricoles et des décharges, ou de contamination par les déjections humaines ou animales. Par ailleurs, cette concentration varie souvent avec la saison et peut augmenter lorsque les rivières sont alimentées par des aquifères riches en nitrates. L'utilisation croissante d'engrais artificiels et l'épandage de matières organiques (provenant principalement de l'élevage), ainsi que les changements dans l'utilisation des sols agricoles sont les principaux facteurs responsables de l'augmentation progressive de la concentration en ions nitrate des eaux souterraines (OMS, 2000). Les ions nitrate en excès contribuent avec d'autres éléments nutritifs (ions phosphates) à l'eutrophisation des eaux superficielles et par conséquent à la dégradation de la qualité des ressources en eau de surface (Savary, 2010). L'OMS recommande pour les eaux destinées à la consommation humaine une valeur limite de la concentration en ions nitrate de 50 mg/l. La réglementation française a retenu cette même valeur limite de 50 mg/l (Rodier et *al.*, 2009).

#### **1.5.1. Les ions nitrate dans les eaux superficielles**

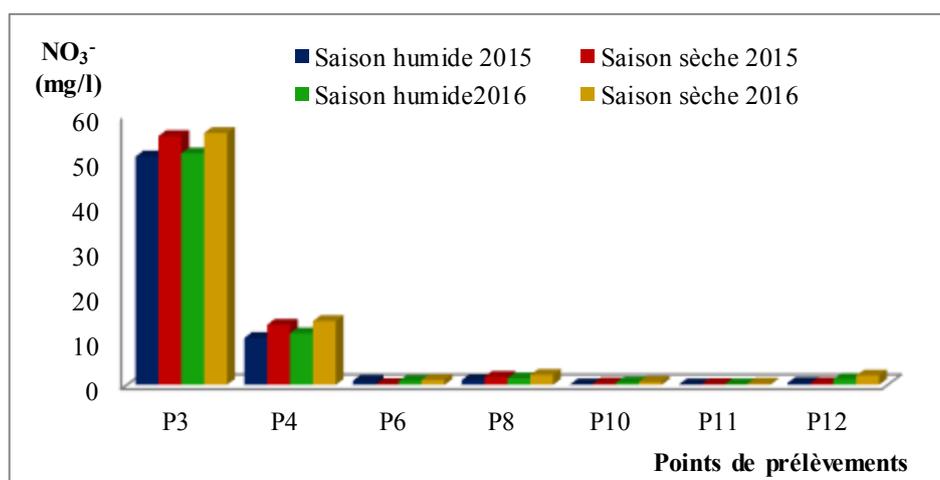
L'analyse des concentrations en ions nitrate dans les eaux superficielles du Lac Fetzara montre que les quantités les plus élevées sont enregistrées au niveau du point 9 (2 mg/l) (figure 24). Ce point est situé dans la partie centrale du lac et reçoit toutes les eaux collectées et de toutes natures (industrielles, urbaines, agricoles). Les concentrations en ions nitrate des eaux superficielles du Lac Fetzara étant inférieures à la concentration de potabilité suggérée par les normes algérienne et internationales (50 mg/l), les eaux de tous les points d'échantillonnages peuvent être alors considérées comme de bonne qualité (ANRH, 2009) par rapport à ce critère.



**Figure 24.** Variation de la concentration en ions nitrate dans les eaux superficielles du Lac Fetzara

### 1.5.2. Les ions nitrate dans les eaux souterraines

L'analyse des concentrations des ions nitrate dans les eaux souterraines du Lac Fetzara (figure 25), montre que les quantités d'ions nitrate les plus élevées sont trouvées dans les puits 3 et 4 situés à l'Est et au Sud du Lac Fetzara. Ces puits sont localisés respectivement à proximité de parcelles cultivées et d'un ensemble d'unités d'élevage d'animaux (OMS, 2000 ; Gilli et *al.*, 2004). A l'exception du point 3 où les eaux ont une concentration en ions nitrate élevée (56 mg/l) correspondant à une pollution importante, les eaux de tous les autres puits peuvent être considérées comme de bonne qualité à moyennement polluées (ANRH, 2009).



**Figure 25.** Variation de la concentration en ions nitrate dans les eaux souterraines du Lac Fetzara

Les échantillons d'eau superficielles et souterraines de l'année 2016 sont plus riches en ions nitrate que ceux de l'année 2015 dans tous les points d'échantillonnages. Cette augmentation rapide peut être due aux activités anthropiques (agricoles, industrielles et urbaines) qui caractérisent la zone du Lac Fetzara. Il est important aussi de noter que les concentrations en ions nitrate sont faibles pendant les périodes des hautes eaux en raison de la dilution par les eaux de pluies et fortes pendant les périodes des basses eaux où les pluies sont rares et l'évaporation est intense (Kotchi *et al.*, 2016). Aussi, la nitrification qui est très importante pendant cette période de basses eaux contribue de façon non négligeable dans cette augmentation (Fustec et Lefevre, 2000). On remarque aussi que les concentrations en ions nitrate dans les nappes d'eau souterraines sont généralement supérieures à celles des eaux superficielles notamment dans les zones du Lac Fetzara à forte pratique agricole.

### **1.6. L'ion ammonium**

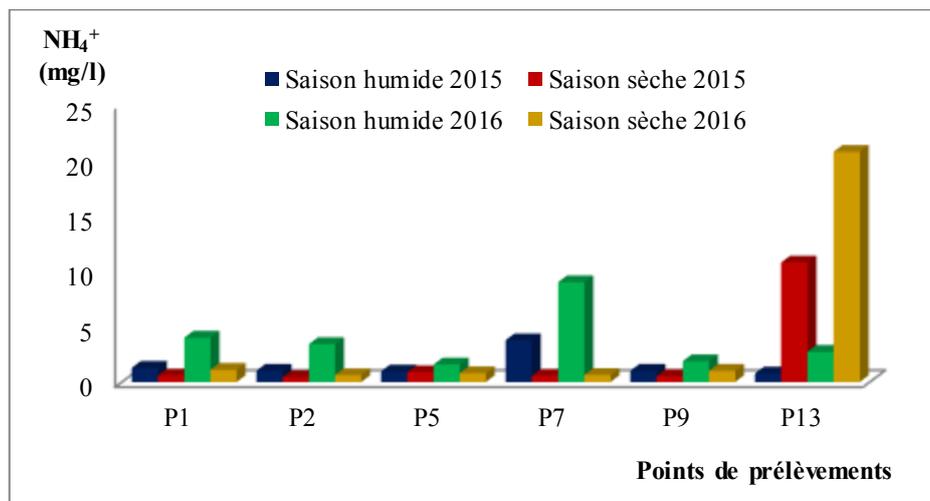
L'ammonium est assez souvent rencontré dans les eaux et traduit habituellement un processus de dégradation incomplète des substances organiques azotées dont le processus est dit ammonification (Rodier *et al.*, 2009). En milieu aérobie, l'ammoniaque se transforme par oxydation bactérienne en ions nitrite puis assez rapidement en ions nitrate (Gaujous, 1995).

La concentration en ion ammonium dans les eaux de surface est naturellement faible. Aussi, les eaux souterraines sont habituellement pauvres en ions ammonium. Mais des eaux issues de sols riches en substances humiques ou riche en fer peuvent présenter des teneurs de l'ordre de 1 à 3 mg/l. Des eaux profondes peuvent également se charger en ion ammonium par réduction des nitrates sous l'action de bactéries ou des sédiments qui renferment des minéraux contenant du fer (Savary, 2010). En ce qui concerne la qualité des eaux, la présence des ions ammonium en quantité relativement importante dans les milieux aquatiques peut être l'indice d'une pollution par des rejets d'origine humaine ou industrielle (Degrémont, 2005). L'OMS recommande comme valeur limite pour l'ion ammonium 1.5 mg/l (Rodier *et al.*, 2009). L'union européenne recommande une concentration de 0.5 mg/l comme valeur limite (Savary, 2010).

#### **1.6.1. Les ions ammonium dans les eaux superficielles**

Les résultats d'analyse des échantillons d'eau superficielle du Lac Fetzara, illustrés dans la figure 26, indiquent que les concentrations en ions ammonium sont toutes supérieures à 0,5 mg/l. Ceci permet de classer l'ensemble de ces eaux dans les catégories de pollution notable à

importante (ANRH, 2009). Les valeurs maximales sont observées dans le point 7 en période humide et au niveau du point 13 en période sèche. Les points 1, 2, 7 et 13 présentent une pollution importante (valeurs supérieures à 3 mg/l) selon la grille de qualité des eaux en ammonium adoptée en Algérie par l'ANRH, 2009. Au niveau des points 1, 2 et 7 (canal principale, Oued Meboudja et Oued Mellah) les fortes valeurs enregistrées sont liées à divers origines (agricole, urbaine et industrielle). Par contre les fortes concentrations observées dans le point 13 (Oued Zied) sont liées essentiellement à des rejets d'eaux résiduaires urbaines de l'agglomération avoisinante de l'Oued Zied. Il est important aussi de noter que les teneurs en ions ammonium sont plus importantes en hiver qu'en été. Cependant, la station 13 en fait exception car ses concentrations en ions ammonium deviennent très élevées (jusqu'à 21 mg/l) en période estivale. A cette période, ce point, est alimenté uniquement en eaux résiduaires urbaines (Habes, 2013) qui sont généralement très enrichies en ions ammonium essentiellement par l'ammonification des substances azotées et aux faibles apports météoriques (Debièche, 2002). En outre, les concentrations en ion ammonium sont devenues considérablement fortes au cours de l'année 2016.

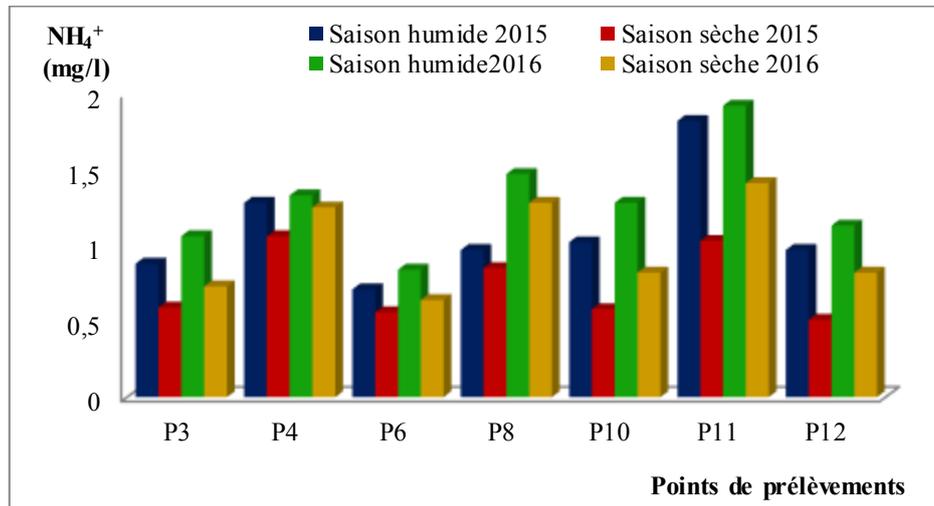


**Figure 26.** Variation de la concentration en ion ammonium dans les eaux superficielles du Lac Fetzara

### 1.6.2. Les ions ammonium dans les eaux souterraines

Pour les eaux souterraines, les concentrations en ion ammonium sont toutes supérieures à 0.5 mg/l (figure 27), valeur maximale recommandée par l'Algérie (JORA, 2011). Ceci permet de classer l'ensemble de ces eaux dans les catégories de pollution notable (ANRH, 2009). Les quantités les plus élevées sont enregistrées lors des périodes humide et sèche au niveau du

puits 11 qui est situé dans la partie Nord du lac. Ce puits est ouvert, il n'est pas utilisé et très il est pollué. Par contre, les valeurs les plus faibles sont observées pendant les deux périodes humide et sèche, au niveau du puits 6 situé à l'Ouest du lac. Ce puits est couvert, utilisable et propre. Il est important aussi de noter que les teneurs en ions ammonium sont plus importantes en hiver qu'en été.



**Figure 27.** Variation de la concentration en ions ammonium dans les eaux souterraines du Lac Fetzara

L'évolution temporelle de la concentration en ions ammonium est marquée par une augmentation dans les eaux superficielles et souterraines du Lac Fetzara pendant la saison humide par rapport à la saison sèche. Cette augmentation peut s'expliquer par les conditions défavorables à la nitrification dont notamment une température basse (Vilaginès, 2000). On remarque aussi que les concentrations en ion ammonium dans les eaux souterraines sont généralement inférieures à celles des eaux superficielles (Savary, 2010). En outre, les concentrations en ions ammonium sont devenues considérablement fortes au cours de l'année 2016 dans tous les points d'échantillonnage d'eau superficielle ou souterraine.

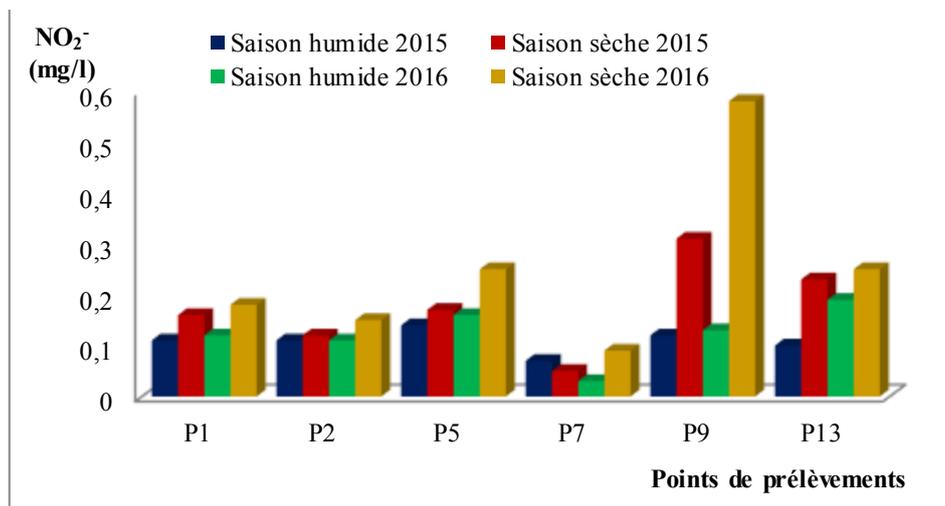
### 1.7. L'ion nitrite

Les ions nitrites sont présents dans le sol, dans les eaux naturelles et dans les plantes mais en quantités relativement faibles (Savary, 2010). Cette forme d'azote minéral est très rare car elle ne constitue qu'un terme de passage entre les formes nitrate et ammonium lors des processus de nitrification et dénitrification (Faurie et al., 1998). Très réactifs, ces ions interviennent dans de nombreux phénomènes de toxicité dont les plus connus sont la méthémoglobinémie et la

production de nitrosamines dans l'estomac de l'homme et des espèces animales (Lacoze, 1996).

### 1.7.1. Les ions nitrite dans eaux superficielles

Les teneurs en ions nitrite dans les eaux superficielles du Lac Fetzara (figure 28) sont comprises entre 0.03 mg/l et 0.58 mg/l et les quantités les plus importantes sont observées au niveau du point 9 en saison sèche. Ce point est situé dans la partie centrale du lac. Celle-ci recevant toutes les eaux collectées du bassin versant du Lac Fetzara est la plus exposée à l'évaporation. En période estivale, les teneurs en cet ion sont plus fortes. Globalement, les concentrations en ions nitrite dans les eaux superficielles du Lac Fetzara dépassent la norme de 0.1 mg/l, ce qui permis de classé ces eaux dans les catégories de pollution modérée à notable (ANRH, 2009).

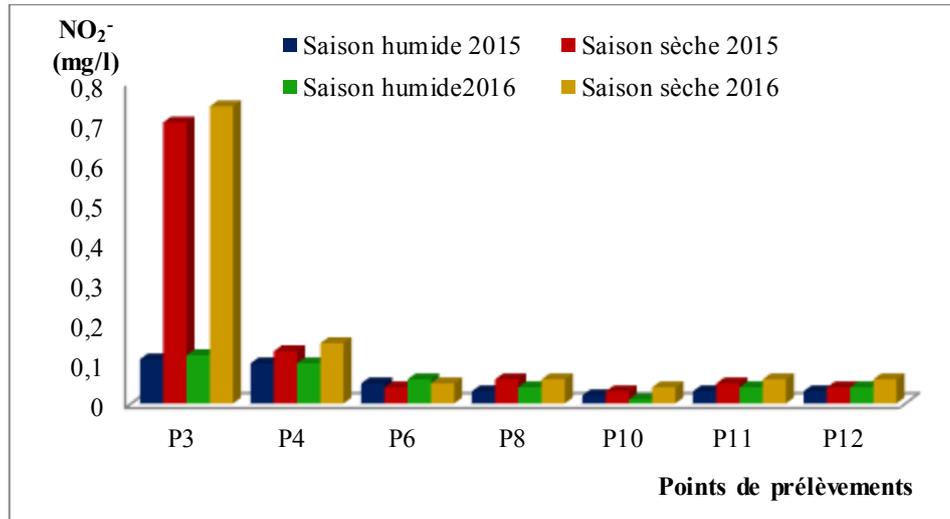


**Figure 28.** Variation de la concentration en ions nitrite dans les eaux superficielles du Lac Fetzara

### 1.7.2. Les ions nitrite dans les eaux souterraines

L'analyse des concentrations en ions nitrite dans les eaux souterraines du Lac Fetzara montre que les quantités les plus élevées sont enregistrées au niveau du point 3 lors des périodes humide et sèche, alors que les valeurs les plus faibles sont observées au niveau du point 10 dans les deux périodes humide et sèche (figure 29). En période estivale les teneurs en azote nitreux sont plus fortes. Sur l'ensemble des puits, deux seulement présentent des concentrations en ions nitrite dépassant la norme de potabilité (0.1 mg/l) (Lacoze, 1996). Ces

deux puits sont situés dans la partie Est (P3) et Sud (P4) du lac et ils se trouvent à proximité de parcelles cultivées et d'unités d'élevage d'animaux.



**Figure 29.** Variation de la concentration en ions nitrite dans les eaux souterraines du Lac Fetzara

Dans les eaux superficielles et souterraines du Lac Fetzara, une très grande variabilité saisonnière et annuelle des teneurs en ion nitrite est révélée avec une tendance à l'augmentation nette pendant l'année 2016. En période estivale les teneurs en azote nitreux sont plus fortes. Comme pour les ions nitrates, cette augmentation serait liée au phénomène d'évaporation et à la forte nitrification pendant cette période (Fustec et Lefevre, 2000).

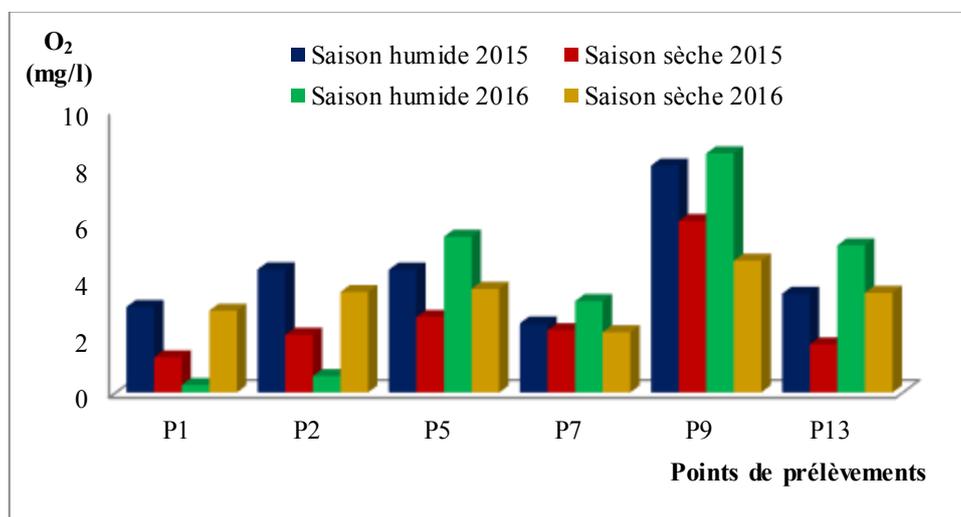
## 1.8. L'oxygène dissous

La concentration en oxygène dissous dans l'eau varie avec la température et la pression partielle atmosphérique (Savary, 2010). Les eaux superficielles peuvent en contenir des quantités relativement importantes proches de la saturation. Par contre, les eaux profondes n'en contiennent le plus souvent que quelques milligrammes par litre (Rodier *et al.*, 2009). L'oxygène dissous est un des principaux facteurs de régulation du cycle de l'azote. Sa présence ou son absence est déterminante pour les processus de transformation des formes minérales de l'azote (Montuelle, 2003).

### 1.8.1. L'oxygène dissous dans les eaux superficielles

Pour l'ensemble des échantillons d'eau prélevés, l'oxygène dissous présente d'importantes variations irrégulières par rapport à l'espace et au temps avec des valeurs limites de 0.2 mg/l et 8.4 mg/l (figure 30). Toutefois, en période humide des concentrations élevées en oxygène

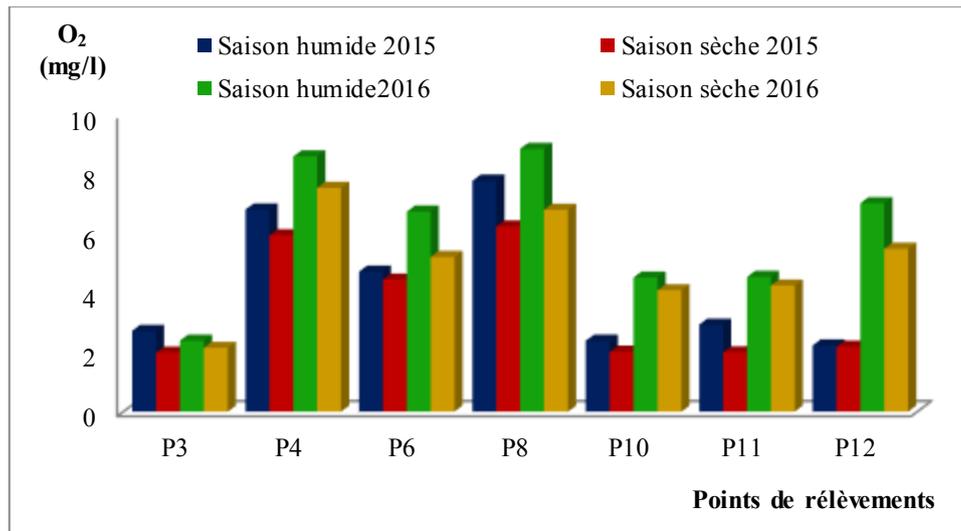
dissous sont observées dans la majorité des points. Ceci est essentiellement dû au refroidissement des eaux pendant la saison froide qui retiennent l'O<sub>2</sub> dans la masse d'eau puisque la température influence la solubilité de l'oxygène (Hebert et Legare, 2000), et le taux de consommation de l'oxygène par les micro-organismes (Villeneuve et al., 2006). En outre, les vitesses des vents engendrent un brassage continu de la masse d'eau et par conséquent un enrichissement de la phase dissoute en oxygène pendant la saison humide (Merghem et al., 2016). Cependant aux points 1 et 2, la faible concentration (0.2 mg/l) en saison humide serait liée à un phénomène de nitrification très consommateur de l'oxygène puisque des quantités élevées en ammonium sont également observées dans ces points. En effet, une quantité élevée d'ions ammonium dans le milieu favorise la croissance des bactéries nitrifiantes et par conséquent une consommation de l'oxygène dissous (Villeneuve et al., 2006).



**Figure 30.** Variation de la concentration en oxygène dissous dans les eaux superficielles du Lac Fetzara

### 1.8.2. L'oxygène dissous dans les eaux souterraines

Les concentrations en oxygène dissous dans les eaux souterraines du Lac Fetzara (figure 31) varient de 2 mg/l (P3) à 8.8 mg/l (P8). L'évolution temporelle est marquée par un léger abaissement des teneurs en oxygène dissous pendant la saison sèche par rapport à la saison humide. Ceci est essentiellement dû à la diminution de la température de l'eau, car une eau froide renferme une plus grande quantité d'oxygène dissous qu'une eau chaude (Hebert et Legare, 2000).



**Figure 31.** Variation de la concentration en oxygène dissous dans les eaux souterraines du Lac Fetzara

## 2. Etude des sédiments

Le sédiment constitue un compartiment dynamique et essentiel dans les écosystèmes aquatiques. Il joue un rôle important pour de nombreux animaux et végétaux en tant qu'habitat ou site de ponte. Cependant, il présente la caractéristique d'adsorber des polluants, pouvant être toxiques pour les organismes, et agissant alors comme un réservoir et une source secondaire de contamination à long-terme. Sa surveillance est donc nécessaire pour protéger l'intégrité écologique des écosystèmes aquatiques (Flück et *al.*, 2012).

### 2.1. Le pH

Les mesures du pH des sédiments du Lac Fetzara (figure 32) montrent une variation de 7.2 à 7.7 en période sèche et de 7.2 à 8.6 en période humide et que les plus faibles valeurs sont observées en été. Ce qui peut avoir une relation avec l'augmentation de la température, car les concentrations des ions augmentent quand la température augmente (effet de l'évaporation et de la forte minéralisation qui entraînent la diminution du pH des sédiments) (Guergueb, 2015 ; Sarah, 2014). Selon l'échelle d'interprétation du pH (Mathieu et Pielain, 2009), le pH des sédiments du Lac Fetzara correspond au type alcalin, qui peut être lié à la présence des carbonates (Sarah, 2014).

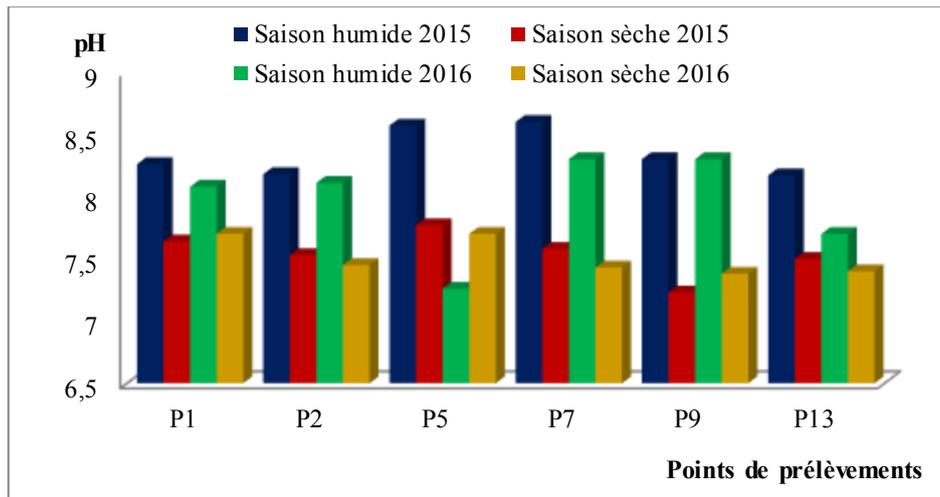


Figure 32. Variation du pH des sédiments du Lac Fetzara

## 2.2. La conductivité électrique

Globalement les valeurs de la conductivité électrique se rapprochent les unes par rapport aux autres et varient entre 95  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 696  $\mu\text{S}/\text{cm}$  durant la période humide et entre 193  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 2590  $\mu\text{S}/\text{cm}$  durant la période sèche (figure 33). La valeur la plus élevée est observée dans le point 9 qui est situé dans la partie centrale du lac. Etant la plus encaissée, elle est très affectée par les apports naturels salifères et carbonatés (Zahi et *al.*, 2013) et anthropiques (agricoles, industriels et urbains). La comparaison des valeurs saisonnières révèle que celles-ci sont plus fortes en été qu'en hiver. Car pendant la saison d'été les eaux chaudes et l'évaporation intense induisent une forte minéralisation en sels, ce qui augmente la conductivité électrique des sédiments (Ouhmidou et *al.*, 2015).

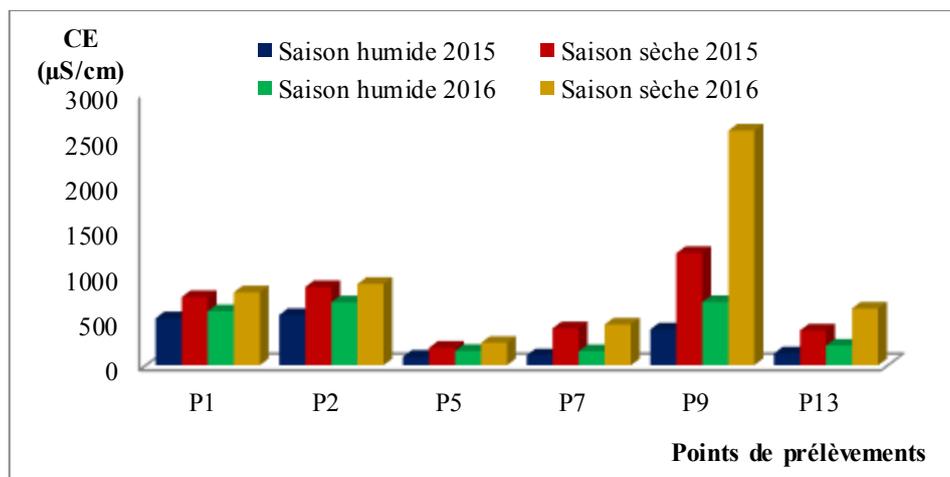


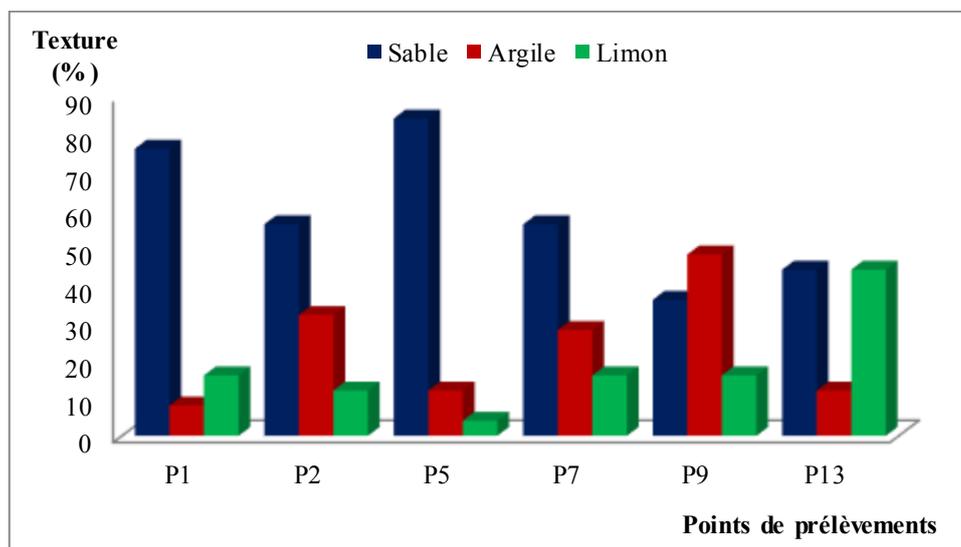
Figure 33. Variation de la conductivité électrique dans les sédiments du Lac Fetzara

### 2.3. La texture

La connaissance de la granulométrie est particulièrement importante car les fractions fines et en particulier les argiles assurent la cohésion des sédiments en raison de leurs propriétés électriques et leur structure en feuillets. Les contaminants sont adsorbés sur les particules en suspension puis accumulés dans les sédiments. Un sédiment se caractérise essentiellement par sa composition minérale, sa matière organique, sa granulométrie et sa teneur en eau (Diab, 2016).

Les résultats des analyses granulométriques (figure 34) montrent que la majorité des sédiments du Lac Fetzara sont de texture sableuse par rapport à la fraction argileuse et limoneuse. Le pourcentage des sables est important avec une moyenne de 58.66 %. Sa valeur maximale de 84 % est enregistrée dans le point 5. Alors que sa valeur minimale est observée au niveau des points 9 avec 36 % qui est situé dans la partie centrale du lac. On note aussi que la fraction argileuse présente des valeurs élevées avec une moyenne de 23.33 %, un maximum de 48 % dans la partie centrale du lac (P9) et un minimum de 8 % (P1).

Cependant, la fraction limoneuse se présente avec des valeurs faibles dont la moyenne est de 18 %, une valeur maximale (44 %) observée dans le point 13 et une valeur minimale de l'ordre de 4 % au niveau du point 5.



**Figure 34.** Distribution des fractions granulométriques des sédiments du Lac Fetzara

L'analyse granulométrique fait ressortir des textures sableuse, argileuse et sablo-limoneuse (tableau 15).

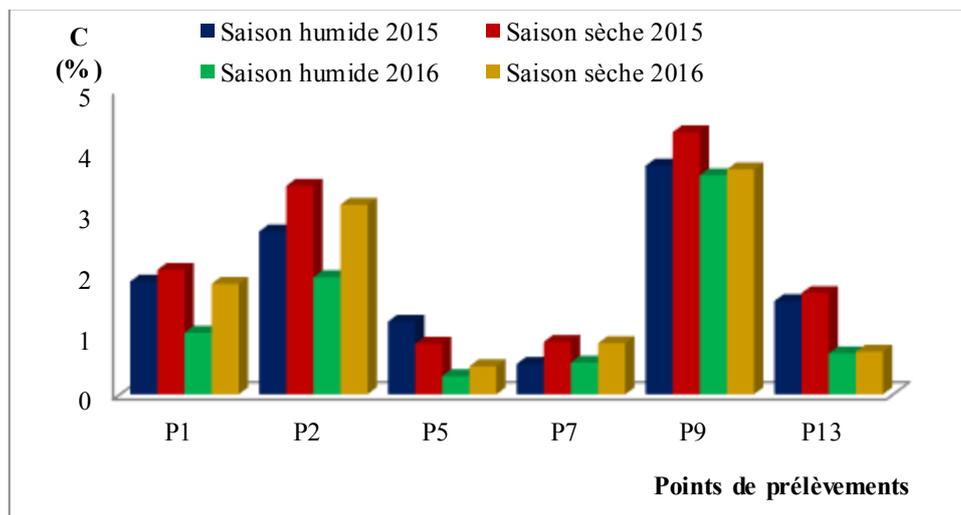
**Tableau 15.** Les différentes classes texturales des sédiments du Lac Fetzara

Les échantillons des sédiments	Les classes texturales correspondantes
P1, P2, P5, P7	Sableuse
P9	Argileuse
P13	Sablo-limoneuse

#### 2.4. Le carbone organique

Les teneurs en carbone organique des sédiments du lac Fetzara, varient entre 0.30 et 4.30 % (figure 35). Les teneurs les plus élevées sont observées dans le point 9 (> à 4 %). Ce point est située dans la partie centrale du lac et reçoivent toutes les eaux collectées (lessivage agricole, eaux usées et eaux industrielles) (Ouertani et *al.*, 2006).

La granulométrie est un facteur qui influence la teneur en carbone organique dans les sédiments. Les plus fortes teneurs en carbone organique sont observées dans les sédiments à granulométrie très fine. La surface spécifique dans ces derniers permet la rétention de plus grandes quantités de carbone organique que dans les sédiments à texture plus grossière (Le Gouche, 2016). Ceci est observé dans le point 9 qui se caractérise par une texture argileuse.

**Figure 35.** Variation de la teneur en carbone organique dans les sédiments du Lac Fetzara

## 2.5. La matière organique

La matière organique consiste en un mélange de produits de plantes et d'animaux à différents stades de décomposition et de substances qui ont été synthétisées chimiquement et biologiquement (Amalric et *al.*, 2011). Ces composés peuvent avoir une origine autochtone, et à un degré plus variable, une origine allochtone. Une fraction importante de cette matière organique est dégradée dans la colonne d'eau. Une quantité plus ou moins significative (10 à 60 %) arrive à la surface des sédiments (Kappler et *al.*, 2001) où elle sera soumise à d'autres transformations chimiques et biologiques. Une dernière fraction, la plus stable, sera enfouie (Belin, 1992). Les sédiments peuvent alors constituer un réservoir de la matière organique. La quantité de cette dernière dépend de la granulométrie (Benoit, 2005), et elle augmente lorsque les sédiments deviennent plus fins. Les argiles contiennent quatre fois plus que les sables. En effet, pour une masse ou un volume donné, plus les grains sont fins, plus la surface spécifique est importante. La matière organique peut alors être adsorbée sur ces surfaces. De plus, un sédiment de faible granulométrie est peu perméable. Ses eaux interstitielles sont alors peu renouvelées et limitent par conséquent la dégradation par oxydation de la matière organique présente dans ce sédiment (Le Gouche, 2016).

Dans nos échantillons de sédiments, le taux de la matière organique est compris entre 0.51 % et 7.39 % (figure 36) et les plus fortes concentrations sont enregistrées dans le point 9. Ce point est situé dans la partie centrale du lac et reçoit toutes les eaux collectées et de toutes natures (industrielles, urbaines, agricoles) (Yao Koffi et *al.*, 2009) qui apportent une décharge organique importante et une masse considérable de nutriments (Ouertani et *al.*, 2006). Aussi, ce point caractérisé par une texture argileuse (fine) qui permet de stocker plus de matière organique (Le Gouche, 2016).

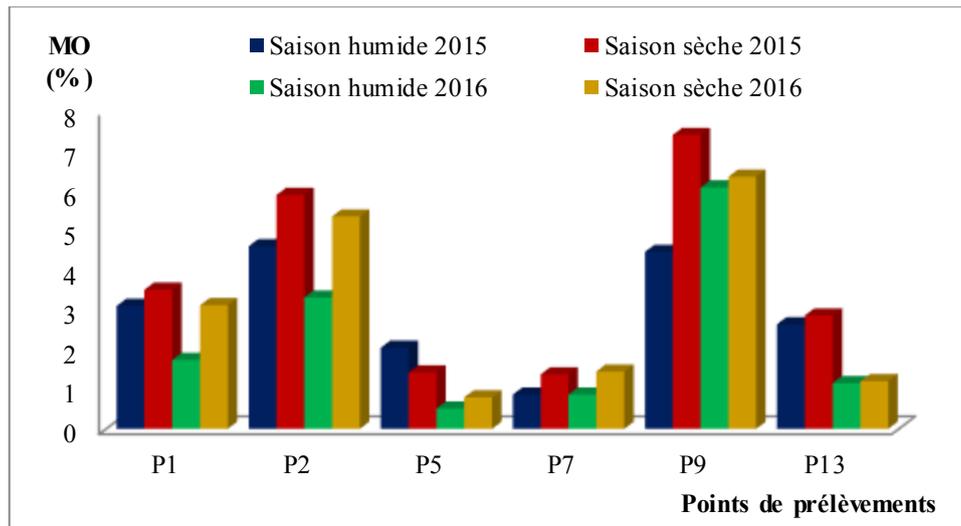
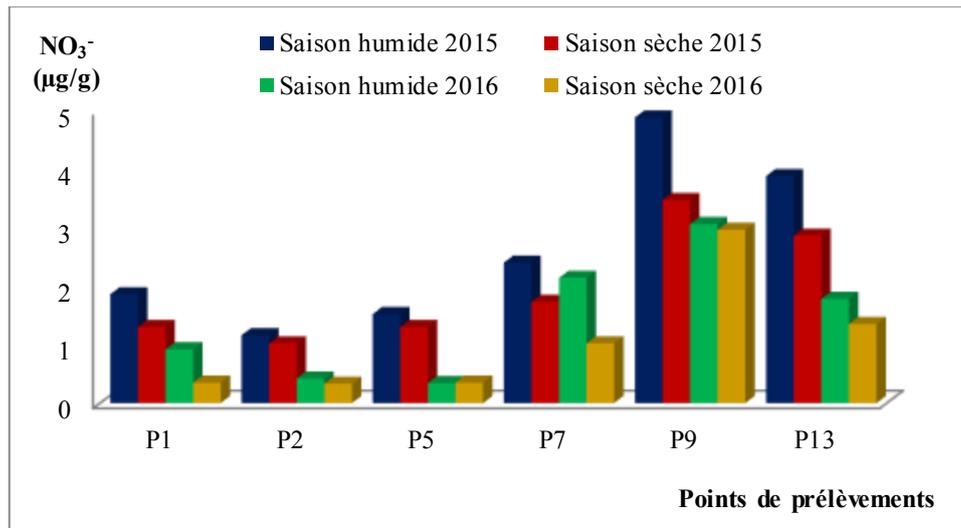


Figure 36. Variation de la teneur en matière organique dans les sédiments du Lac Fetzara

## 2.6. L'ion nitrate

Les teneurs en ions nitrate dans les sédiments de la zone humide du Lac Fetzara sont illustrées dans la figure 37. Elles sont comprises entre 0.35  $\mu\text{g/g}$  et 4.43  $\mu\text{g/g}$  (figure 36) dont les quantités les plus importantes sont observées au niveau du point 9. Les fortes teneurs en ions nitrates dans ce point sont liées aux sources agricoles, domestiques et industrielles (Guergueb, 2016) présentes dans le site du Lac Fetzara et aussi à la nitrification qui est très forte dans les sédiments de texture argileuse (Fustec et Lefeuvre, 2000 ; Montuelle, 2003). Il est à remarquer que les concentrations en ions nitrate sont plus fortes en hiver qu'en été à l'inverse de l'ion ammonium.

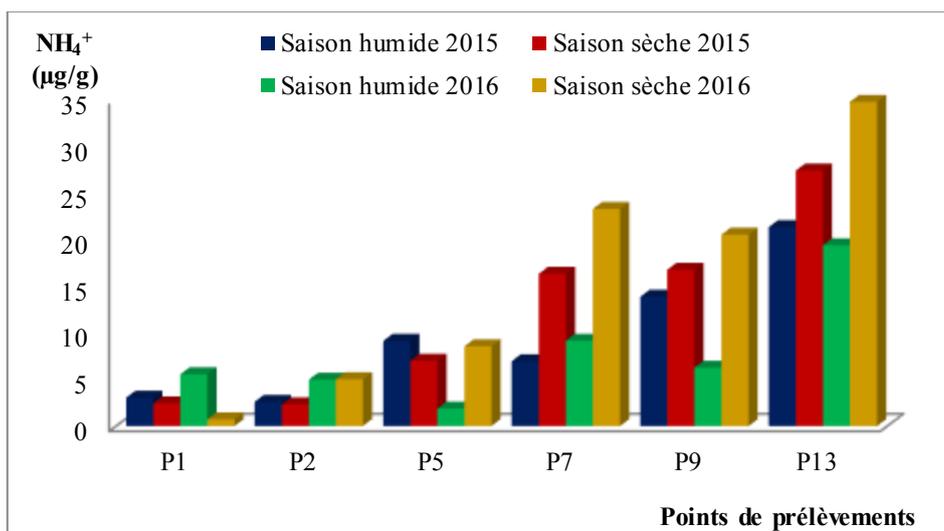
A cette saison où les conditions du processus biologique de nitrification peuvent être normalement réunies, les ions ammonium adsorbés dans les sédiments sont oxydés en ions nitrates (Chapelle et *al.*, 1994). Mais les ions nitrates peuvent disparaître à leur tour dans les sédiments par le processus de dénitrification (Lerat et *al.*, 1985) et par effet des flores aquatiques (Bernaud et Fustec, 2007).



**Figure 37.** Variation de la teneur en ions nitrate dans les sédiments du Lac Fetzara

### 2.7. L'ion ammonium

Les résultats du dosage des ions ammonium sont consignés dans la figure 38 qui montre que les fortes concentrations sont observées au niveau du point 13 qui représente l'Oued Zied. Celui-ci est uniquement alimenté en eaux résiduaires urbaines de l'agglomération de l'Oued Zied pendant la période sèche (Habes, 2013). Son évolution temporelle est marquée par un abaissement des teneurs en ions ammonium pendant la période humide par rapport à la période sèche résultant du blocage de la minéralisation de la matière organique en hiver (Feuillet Girard *et al.*, 1988). La comparaison des teneurs en ions ammonium et en ions nitrate dans les sédiments pour chaque campagne a confirmé que les teneurs en ion ammonium étaient toujours supérieures à celles des ions nitrates, à chaque point et à chaque période. Cette supériorité peut s'expliquer par le fait que les ions positifs ( $\text{NH}_4^+$ ) du fait de leurs charges s'adsorbent facilement sur les particules du sédiment, alors que les ions négatifs ( $\text{NO}_3^-$ ) n'étant pas retenus par les sédiments, se retrouvent plutôt dans la matrice aqueuse d'une colonne eau- sédiment du lac (Montuelle, 2003). Le sédiment se présente donc comme un réservoir en ion ammonium vis-à-vis de la colonne d'eau (Feuillet Girard *et al.*, 1988).



**Figure 38.** Variation de la teneur en ions ammonium dans les sédiments du Lac Fetzara

### 3. Etude statistique

#### 3.1. Analyse en composantes principales (ACP)

Les échantillons d'eau et de sédiments 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.

L'ACP est un outil d'analyse de données qui permet d'expliquer la structure des corrélations ou des covariances en utilisant des combinaisons linéaires des données originelles. Son utilisation permet de réduire et d'interpréter les données sur un espace réduit.

L'ACP a pour objectif de présenter, sous forme graphique, le maximum de l'information contenue dans une table de données, basée sur le principe de double projection sur les axes factoriels.

Dans cette étude, plusieurs analyses en composantes principales ont été effectuées sur les deux périodes d'échantillonnages (humide et sèche), et qui se présentent en trois parties : analyse des eaux superficielles, analyse des eaux souterraines et analyse des sédiments. L'utilisation de l'ACP pour l'étude physico-chimique des eaux et des sédiments permet de différencier les groupes ayant des caractéristiques similaires, leurs variations (facteurs)

suivant les axes principaux mais surtout les modes d'acquisition de l'azote. Les données ont été traitées statistiquement grâce à l'utilisation du logiciel Xlstat version 2016.

Notre ACP a été effectuée sur une matrice de données constituée de 19 prélèvements (points d'eau et des sédiments) en saison humide et 19 prélèvements (points d'eau et des sédiments) en saison sèche, pour lesquels 8 variables dans les eaux (la température, le pH, la conductivité électrique, l'oxygène dissous, l'ion nitrate, l'ion nitrite, l'ion ammonium et l'ion chlorure) et 6 variables dans les sédiments (le pH, la conductivité électrique, le C, la MO, l'ion nitrate et l'ion ammonium) ont été analysées.

### 3.1.1. Les eaux superficielles du Lac Fetzara

#### 3.1.1.1. Saison humide

##### a. Statistiques descriptives

L'étude statistique de la répartition spatiale des éléments chimiques présente les valeurs minimales, moyennes et maximales, ainsi que les écart-types (tableau16).

**Tableau 16.** Statistique descriptive pour la physico-chimie des eaux superficielles du Lac Fetzara (saison humide)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
pH	8.060	8.780	8.327	0.254
T (°C)	11.840	17.120	14.152	2.279
CE (µS/cm)	735.000	2882.000	1545.833	849.082
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	154.420	898.420	478.355	282.961
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.050	1.030	0.380	0.449
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	1.260	6.380	2.613	1.914
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.050	0.140	0.108	0.031
O <sub>2</sub> d (mg/l)	1.640	8.230	4.070	2.372

##### b. Matrice de corrélation

La matrice de corrélation donne les liens significatifs qui existent entre les différentes variables nécessaires à l'étude des paramètres utilisés. Ces liens sont traduits par les différentes corrélations qui existent entre les variables étudiées.

L'application de l'ACP aux données des eaux superficielles du Lac Fetzara a permis de dégager les différentes corrélations sur une matrice (tableau 17). Ces corrélations peuvent être entre elles positives ou négatives.

**Tableau 17.** Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimiques des eaux superficielles du Lac Fetzara (saison humide)

Variables	pH	T	CE	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	O <sub>2</sub>
pH	<b>1</b>							
T	-0.120	<b>1</b>						
CE	-0.179	0.158	<b>1</b>					
Cl <sup>-</sup>	-0.212	0.241	<b>0.973</b>	<b>1</b>				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.162	<b>0.942</b>	0.204	0.350	<b>1</b>			
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-0.580	-0.383	-0.418	-0.485	-0.436	<b>1</b>		
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.492	0.484	0.258	0.390	0.599	<b>-0.947</b>	<b>1</b>	
O <sub>2</sub>	0.084	0.618	0.436	0.394	0.640	-0.457	0.365	<b>1</b>

Les résultats de la matrice de corrélation des eaux superficielles du Lac Fetzara en saison humide (tableau 17) montrent qu'il existe une corrélation positive et fortement significative entre la conductivité électrique et les ions chlorure (0.973) d'où une grande influence des ions chlorure sur la salinité des eaux car l'augmentation des concentrations en ions chlorure dans les eaux de surface provoque un accroissement de la salinité (Fekrache, 2015).

Une autre forte corrélation positive existe entre la température et l'ion nitrate (0.942). La température est un facteur essentiel qui influence la nitrification en stimulant l'activité des micro-organismes nitrifiants pour la transformation de l'azote des substances azotées en ions nitrate (Guergueb, 2016).

Parallèlement, on note une forte corrélation négative (- 0.947) entre les ions ammonium et les ions nitrite. Cette forte corrélation négative peut être expliquée par le fait que l'augmentation des concentrations en ions nitrite est accompagnée de la diminution des concentrations en ions ammonium. Ceci traduit une conversion des ions ammonium en ions nitrite (Pambrun, 2005).

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

Le cercle de corrélation formé par les axes F1 et F2 (figure 39) représentant 72.66 % de l'information totale montre, selon l'axe F1 (50.02 %), des eaux fortement minéralisées, riches en oxygène dissous, en ions nitrite, en ions nitrate et en ions chlorure dans sa partie négative et des eaux riches en ions ammonium dans sa partie positive. Cet axe définit alors un gradient de minéralisation et de pollution principalement dû à l'ammonification des substances azotées. Aussi, cet axe représente l'influence du climat sur la qualité physico-chimique des eaux du Lac Fetzara. L'axe F2 (22.64 %) est corrélé positivement au pH et à l'ion nitrite et

négativement à tous les autres paramètres physico-chimiques. Cet axe caractérise donc l'acidité et la pollution dans sa partie positive et la minéralisation dans sa partie négative. En ce qui concerne la représentation des points (figure 39) dans les axes, l'axe F1 indique l'existence de trois groupes assez distincts : le premier groupe est composé par le point 9, le second groupe est constitué par les points 1, 2, 5 et 13 et le troisième groupe est formé par le point 7. Les paramètres qui ont créé cette hétérogénéité sont la conductivité électrique, la température, l'ion nitrite, l'ion nitrate, l'ion chlorure et l'oxygène dissous dans la partie positive de l'axe et l'ion ammonium dans la partie négative de l'axe. Cela signifie que le premier groupe est caractérisé par les concentrations les plus faibles de l'ion ammonium et les valeurs les plus élevées de tous les autres paramètres en opposition du troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires. L'axe F2 témoigne de l'existence de trois groupes assez distincts : le premier est composé par le point 5, le deuxième est constitué par les points 1 et 13 et le troisième est formé par les points 2, 7 et 9. Les paramètres responsables de cette variabilité sont l'ion nitrite et le pH. Cela signifie que le premier groupe est caractérisé par les valeurs les plus importantes en ion nitrite et en pH et les valeurs les plus faibles de tous les autres paramètres et au contraire du troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires dans l'ensemble des paramètres responsables de cette variabilité.

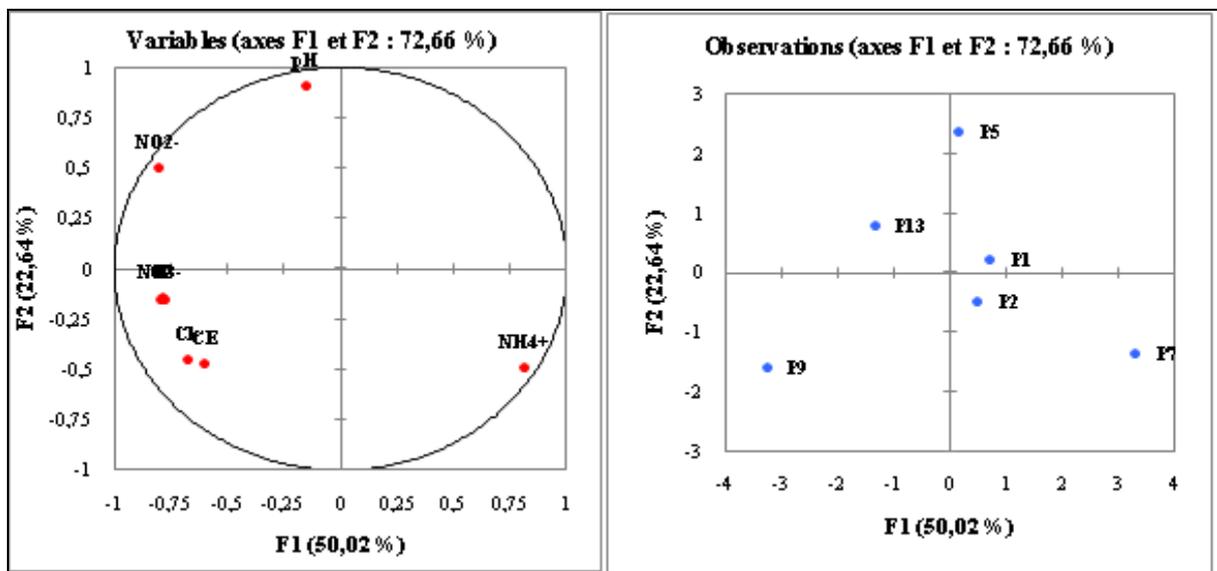


Figure 39. Répartition des paramètres et des points d'eau superficielle sur le plan factoriel en saison humide

### 3.1.1.2. Saison sèche

#### a. Statistiques descriptives

**Tableau 18.** Statistique descriptive pour la physico-chimie des eaux superficielles du Lac Fetzara (saison sèche)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
pH	7.620	8.720	8.008	0.376
T (°C)	18.610	25.090	23.188	2.344
CE (µS/cm)	852.000	8095.500	2844.167	2769.195
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	214.950	2001.600	739.748	644.468
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.250	1.960	0.748	0.643
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	0.530	15.760	3.222	6.144
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.070	0.440	0.212	0.127
O <sub>2</sub> d (mg/l)	2.060	5.360	3.017	1.216

#### b. Matrice de corrélation

**Tableau 19.** Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimiques des eaux superficielles du Lac Fetzara (saison sèche)

Variables	pH	T	CE	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	O <sub>2</sub>
pH	<b>1</b>							
T	0.011	<b>1</b>						
CE	-0.320	0.044	<b>1</b>					
Cl <sup>-</sup>	-0.366	0.129	<b>0.977</b>	<b>1</b>				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.185	0.358	<b>0.810</b>	<b>0.823</b>	<b>1</b>			
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-0.087	0.391	-0.329	-0.164	-0.149	<b>1</b>		
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.069	0.322	<b>0.798</b>	<b>0.846</b>	<b>0.941</b>	0.119	<b>1</b>	
O <sub>2</sub>	0.000	0.479	0.652	<b>0.860</b>	<b>0.966</b>	-0.159	<b>0.902</b>	<b>1</b>

Les résultats de la matrice de corrélation des eaux superficielles du Lac Fetzara en saison sèche (tableau 19) montrent qu'il existe une corrélation positive et fortement significative entre les ions chlorure, les ions nitrates, les ions nitrite et la conductivité électrique (respectivement 0.977, 0.810 et 0.798). Ceci traduit la participation de ces ions à l'acquisition de la charge saline des eaux (Bekkoussa et al., 2013).

La corrélation positive existante entre l'oxygène dissous et les ions nitrate et nitrite (respectivement 0.966 et 0.902) est excellente. L'oxygène dissous est un des principaux facteurs de régulation du cycle de l'azote. Sa présence ou son absence est déterminante pour

les processus de transformation des formes minérales de l'azote (Montuelle, 2003). De ce fait, une carence en oxygène dissous peut induire un ralentissement et même un arrêt du processus de nitrification (Pambrun, 2005). Une autre corrélation positive existante entre les ions nitrate et les ions nitrite (0.941). Ceci traduit un processus de nitrification (Vilaginès, 2000).

Les chlorures montrent une excellente corrélation avec l'oxygène dissous (0.860), avec les ions nitrites (0.846) et avec les ions nitrates (0.823). Ces paramètres font partie du cortège d'éléments permettant d'identifier une pollution anthropiques d'origine agricole, urbaine ou encore industrielle (Bekkoussa et *al.*, 2013).

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

Le cercle de corrélation formé par les axes F1 et F2 (figure 40) donne 77.18 % de l'information totale. L'axe F1 (57.94%), est principalement lié à la conductivité électrique, à l'ion chlorure, à l'ion nitrate, à l'ion nitrite et à l'oxygène dissous. Cet axe définit alors un gradient de minéralisation due à l'apport salifère du lac Fetzara et de pollution organique. Aussi, cet axe représente l'influence du climat sur la qualité physico-chimique des eaux du lac Fetzara. L'axe F 2 (19.24%) est corrélé positivement à l'ion ammonium et à la température. Cet axe définit alors un gradient de pollution principalement dû à l'ammonification des substances azotées. En ce qui concerne la représentation des points (figure 40) dans les axes, l'axe F1 indique l'existence de trois groupes assez distincts : le premier est composé par le point 9, le second est constitué par les points 1, 2 et 5 et le troisième est formé par le point 7 et 13. Les paramètres qui ont créé cette hétérogénéité sont la conductivité électrique, l'ion nitrite, l'ion nitrate, l'ion chlorure et l'oxygène dissous. Cela signifie que le premier groupe est caractérisé les valeurs les plus élevées de tous ces paramètres en opposition du troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires. L'axe F2 témoigne de l'existence de trois groupes assez distincts: le premier est composé par les points 5 et 13, le deuxième est constitué par les points 1 et 9 et le troisième est formé par les points 2 et 7. Les paramètres responsables de cette variabilité sont l'ion ammonium et la température. Cela signifie que le premier groupe est caractérisé par les valeurs les plus importantes de la température et de l'ion ammonium et au contraire du troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires dans l'ensemble des paramètres responsables de cette variabilité.

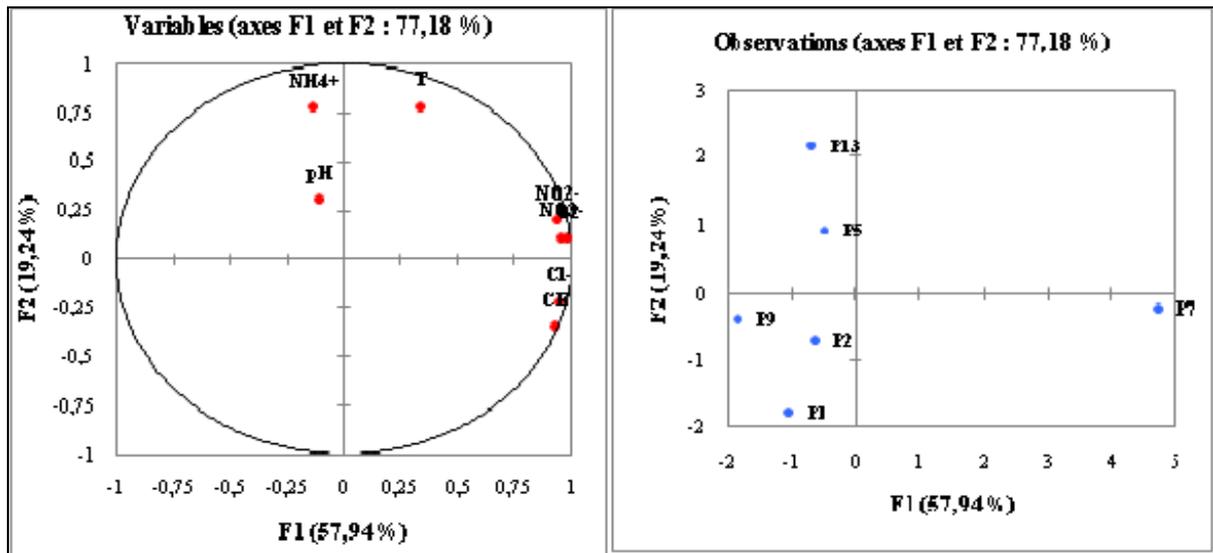


Figure 40. Répartition des paramètres et des points d'eau superficielle sur le plan factoriel en saison sèche

### 3.1.2. Les eaux souterraines du lac Fetzara

#### 3.1.2.1. Saison humide

##### a. Statistiques descriptives

Tableau 20. Statistique descriptive pour la physico-chimie des eaux souterraines du Lac Fetzara (saison humide)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
pH	7.510	8.540	8.123	0.334
T (°C)	14.430	16.700	15.704	0.711
CE (µS/cm)	688.000	2897.000	1416.214	706.865
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	117.320	643.500	305.121	167.014
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.110	51.130	9.350	18.819
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	0.150	1.870	0.976	0.532
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.010	0.110	0.051	0.038
O <sub>2</sub> d (mg/l)	2.460	8.310	5.003	2.352

### b. Matrice de corrélation

**Tableau 21.** Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du Lac Fetzara (saison humide)

Variables	pH	T	CE	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> d
pH	<b>1</b>							
T	-0.533	<b>1</b>						
CE	0.271	-0.010	<b>1</b>					
Cl <sup>-</sup>	0.153	0.053	<b>0.905</b>	<b>1</b>				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.203	-0.044	-0.272	-0.317	<b>1</b>			
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.433	-0.210	0.401	-0.016	0.044	<b>1</b>		
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.122	-0.264	0.318	0.223	<b>0.797</b>	0.282	<b>1</b>	
O <sub>2</sub> d	0.531	-0.065	0.523	0.649	-0.347	-0.172	0.063	<b>1</b>

Les résultats de la matrice de corrélation des eaux souterraines du Lac Fetzara en saison humide (tableau 21) montrent qu'il existe une corrélation positive et fortement significative entre la conductivité électriques et les ions chlorure. Ces deux paramètres évoluent parallèlement et leur coefficient de corrélation est égal à 0.905.

La corrélation positive existante entre les ions nitrate et les ions nitrite (0.797) est excellente. Les concentrations en ions nitrate et nitrite mettent en évidence une évolution proportionnelle, ce qui indique bien un processus de nitrification (Vilaginès, 2000).

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

Le cercle de corrélation formé par les axes F1 et F2 (figure 41) donne 61,11 % de l'information totale. L'axe F1 (35,68%), est principalement lié à la conductivité électrique, à l'ion chlorure et à l'oxygène dissous. Cet axe définit alors un gradient de minéralisation. L'axe F 2 (25,43%) est corrélé positivement à l'ion nitrite et à l'ion nitrate. Il définit alors un gradient de pollution due essentiellement à la nitrification des substances azotées. En ce qui concerne la représentation des points (figure 41) dans les axes, l'axe F1 indique l'existence de trois groupes assez distinctifs : le premier groupe est composé par le point 4, le second est constitué par les points 6, 8, 10, 11 et 12, et le troisième groupe est formé par le point 3. Les paramètres qui ont créé cette hétérogénéité sont la conductivité électrique, l'ion chlorure et l'oxygène dissous. Cela signifie que le premier groupe est caractérisé par les valeurs les plus élevées de tous ces paramètres en opposition du troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires. L'axe F2 témoigne de l'existence de trois groupes assez

distinctifs: le premier est composé par le point 3, le deuxième est constitué par les points 4, 6, 8, et 12, et le troisième est formé par les points 10 et 11. Les paramètres responsables de cette variabilité sont l'ion nitrite et l'ion nitrate. Cela signifie que le premier groupe est caractérisé par les valeurs les plus importantes de l'ion nitrite et de l'ion nitrate, contrairement au troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires dans l'ensemble des paramètres responsables de cette variabilité.

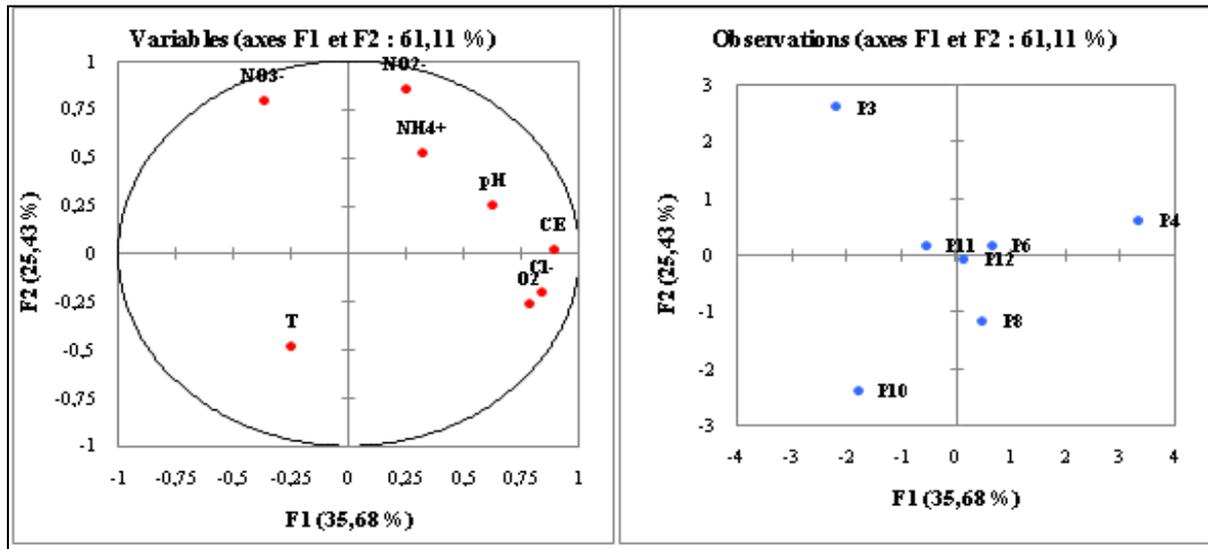


Figure 41. Répartition des paramètres et des points d'eau souterraine sur le plan factoriel en saison humide

### 3.1.2.2. Saison sèche

#### a. Statistiques descriptives

Tableau 22. Statistique descriptive pour la physicochimie des eaux souterraines du Lac Fetzara (saison sèche)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
pH	7.510	8.820	8.190	0.475
T (°C)	20.100	23.740	21.767	1.099
CE (µS/cm)	734.500	3386.500	1633.357	843.030
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	118.920	662.670	336.010	174.263
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.210	55.650	10.564	20.459
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	0.600	1.220	0.864	0.267
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.030	0.720	0.156	0.251
O <sub>2</sub> d (mg/l)	2.070	6.740	4.310	1.794

## b. Matrice de corrélation

**Tableau 23.** Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimiques des eaux souterraines du Lac Fetzara (saison sèche)

Variables	pH	T	CE	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> d
pH	<b>1</b>							
T	0.425	<b>1</b>						
CE	0.416	0.115	<b>1</b>					
Cl <sup>-</sup>	0.397	0.143	0.863	<b>1</b>				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.441	-0.696	-0.260	-0.360	<b>1</b>			
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.032	-0.099	0.624	0.267	-0.228	<b>1</b>		
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-0.456	-0.690	-0.344	-0.449	<b>0.995</b>	-0.257	<b>1</b>	
O <sub>2</sub> d	0.634	0.036	0.602	0.634	-0.399	0.462	-0.458	<b>1</b>

Les résultats de la matrice de corrélation des eaux souterraines du Lac Fetzara en saison sèche (tableau 23) montrent qu'il existe une corrélation positive (0.995) et fortement significative entre les ions nitrate et les ions nitrite. Ceci traduit un processus de nitrification qui contribue à la transformation de l'ion ammonium en ion nitrite et en ion nitrate par oxydation (Fustec et Lefevre, 2000).

## C. Analyse en Composantes Principales (ACP)

Le cercle de corrélation formé par les axes F1 et F2 (figure 42) représentant 74.59 % de l'information totale montre, selon l'axe F1 (50.82 %), des eaux fortement minéralisées, riches en oxygène dissous et en ions chlorure dans sa partie négative et des eaux riches en ions nitrate et en ions nitrite dans sa partie positive. Cet axe définit alors un gradient de minéralisation et de pollution azotée. L'axe F2 (23.77 %) est corrélé positivement à la température. En ce qui concerne la représentation des points (figure 42) dans les axes, l'axe F1 indique l'existence de trois groupes assez distinctifs : le premier groupe est composé par le point 3, le second groupe est constitué par le point 4 et le troisième groupe est formé par les points 6, 8, 10, 11 et 12. Les paramètres qui ont créé cette hétérogénéité sont la conductivité électrique, l'ion chlorure et l'oxygène dissous dans la partie négative de l'axe et les ions nitrate et les ions nitrite dans la partie positive de l'axe. Cela signifie que le premier groupe est caractérisé par les teneurs les plus élevées en ions nitrate et en ions nitrite et les valeurs les plus faibles de la conductivité électrique, de l'ion chlorure et de l'oxygène dissous en opposition du troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires. L'axe F2 témoigne de l'existence de trois groupes assez distincts: le premier est composé par

le point 12, le deuxième est constitué par les points 4, 6, 8, 10 et 11 et le troisième est formé par le point 3. Le paramètre responsable de cette variabilité est la température. Cela signifie que le premier groupe est caractérisé par les valeurs fortes de la température contrairement au troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires de la température.

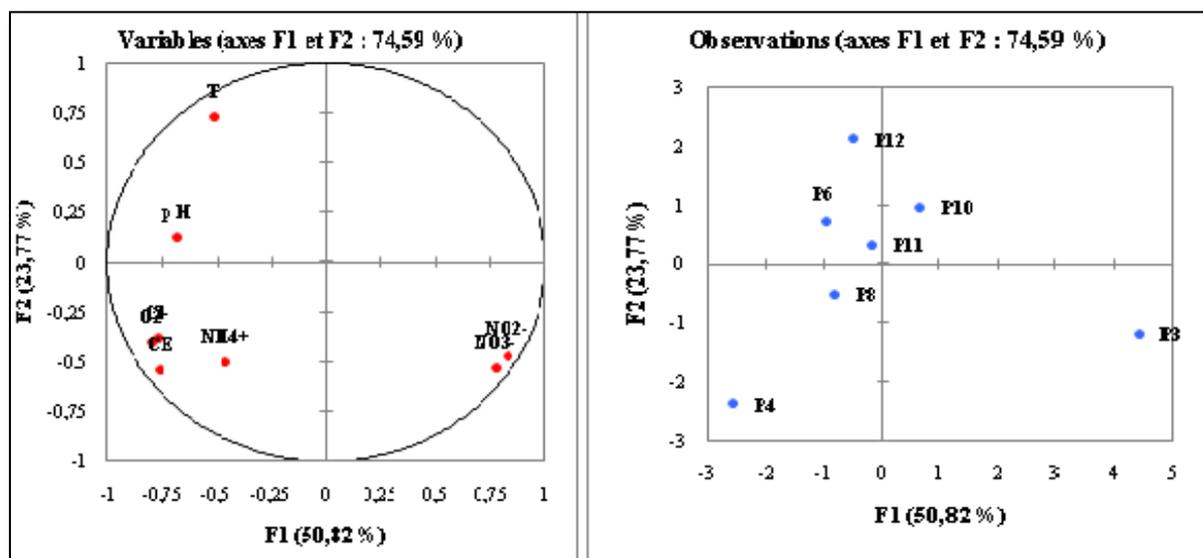


Figure 42. Répartition des paramètres et des points d'eau souterraine sur le plan factoriel en saison sèche

### 3. 1. 3. Les sédiments du Lac Fetzara

#### 3. 1. 3.1. Saison humide

##### a. Statistique descriptive

Tableau 24. Statistique descriptive pour la physico-chimie des sédiments du Lac Fetzara (saison humide)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
pH	7.910	8.450	8.150	0.209
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	126.000	625.000	359.833	238.577
C (%)	0.510	3.670	1.623	1.180
MO (%)	0.860	5.260	2.762	1.649
$\text{NO}_3^-$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	0.790	3.970	2.120	1.198
$\text{NH}_4^+$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	3.780	20.330	8.668	6.186

### b. Matrice de corrélation

**Tableau 25.** Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimique des sédiments du Lac Fetzara (saison humide)

Variables	p H	CE	C	MO	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
pH	<b>1</b>					
CE	0.231	<b>1</b>				
C	0.234	<b>0.764</b>	<b>1</b>			
MO	0.074	<b>0.750</b>	<b>0.962</b>	<b>1</b>		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.368	0.045	0.488	0.472	<b>1</b>	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-0.282	-0.431	-0.059	0.117	0.590	<b>1</b>

Les résultats de la matrice de corrélation des sédiments du Lac Fetzara en saison humide (tableau 25) montrent qu'il existe une corrélation positive et fortement significative entre le carbone organique et la matière organique (0.962). Les fortes valeurs en carbone organique coïncident avec les fortes valeurs en matière organique car le carbone est le principal élément de la matière organique.

Une autre corrélation positive existe entre la conductivité électrique et la matière organique (0.750) et entre la conductivité électrique et le carbone organique (0.764). L'association des fortes valeurs de ces trois éléments dans la majorité des sédiments permettant d'identifier une pollution anthropique d'origine agricole, urbaine ou encore industrielle.

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

Le cercle de corrélation formé par les axes F1 et F2 (figure 43) représente 77.70 % de l'information totale. L'axe F1 (48.96 %) est principalement lié au carbone organique, à la matière organique et à la conductivité électrique. L'axe F2 (28.74 %) est corrélé avec l'ion ammonium et l'ion nitrate. En ce qui concerne la représentation des points (figure 43) dans les axes, l'axe F1 indique l'existence de trois groupes assez distincts: le premier est composé des points 1, 2 et 9, le second est constitué de point 13 et le troisième est formé par les points 5 et 7. Le premier groupe est caractérisé par les valeurs les plus élevées en matière organique, en carbone organique et la plus minéralisée en opposition du troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires. L'axe F2 est témoin de l'existence de 3 groupes assez distincts: le premier est composé des points 9 et 13, le second est constitué par les points 1, 5 et 7, et le troisième est formé par le point 2. Les paramètres responsables de cette

variabilité sont l'ion ammonium et l'ion nitrate. Cela signifie que le premier groupe est caractérisé par les valeurs les plus importantes en ions ammonium et en ions nitrate contrairement au troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires.

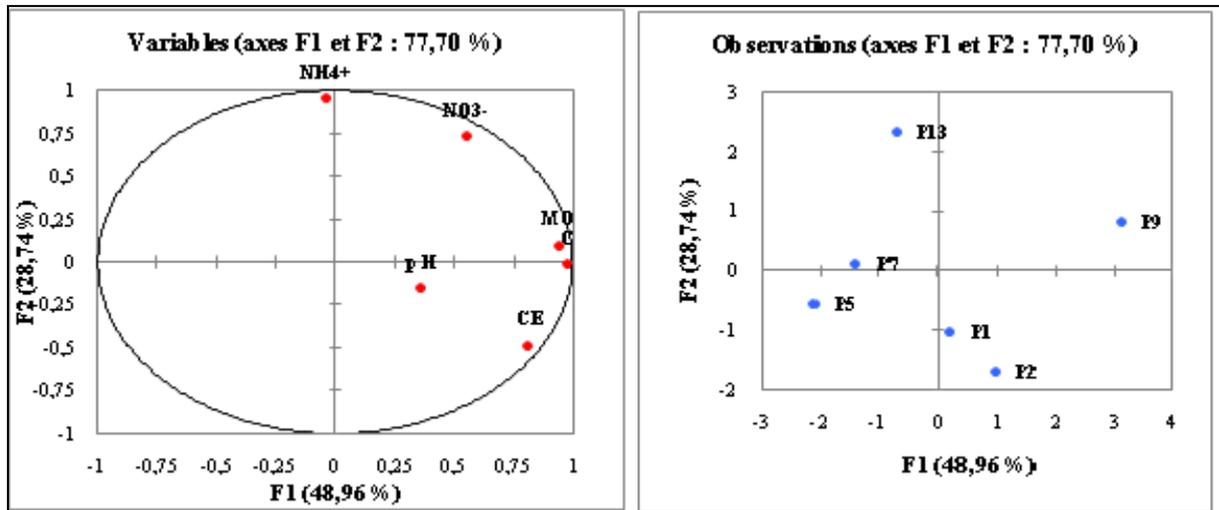


Figure 43. Répartition des paramètres et des points de sédiments sur le plan factoriel en saison humide

### 3.1.3.2. Saison sèche

#### a. Statistiques descriptives

Tableau 26. Statistique descriptive pour la physico-chimie des sédiments du Lac Fetzara (saison sèche)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
pH	7.300	7.730	7.523	0.156
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	220.000	1914.000	772.000	614.007
C (%)	0.640	3.990	1.973	1.371
MO (%)	1.100	6.860	3.382	2.369
$\text{NO}_3^-$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	0.670	2.910	1.448	0.890
$\text{NH}_4^+$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	1.580	31.040	13.735	11.348

### b. Matrice de corrélation

**Tableau 27.** Matrice de corrélation des différents paramètres physico-chimiques des sédiments du Lac Fetzara (saison sèche)

Variables	p H	CE	C	MO	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
p H	<b>1</b>					
CE	<b>-0.716</b>	<b>1</b>				
C	-0.649	<b>0.923</b>	<b>1</b>			
MO	-0.645	<b>0.922</b>	1.000	<b>1</b>		
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>-0.820</b>	0.656	0.391	0.389	<b>1</b>	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-0.587	0.015	-0.192	-0.195	0.636	<b>1</b>

Les résultats de la matrice de corrélation des sédiments du Lac Fetzara en saison sèche (tableau 27) montrent qu'il existe des corrélations positives et fortement significatives entre la conductivité électrique, le carbone organique (0.923) et la matière organique (0.922). Les teneurs élevées de ces trois éléments sont l'indice d'une pollution.

Parallèlement, on note une forte corrélation négative entre le pH et l'ion nitrate (0.820). Le pH est un facteur très important pour la nitrification. En pH très acide ou très basique, la nitrification est complètement inhibée (Pambrun, 2005).

Une autre corrélation négative existe entre le pH et la conductivité électrique (0.716). Car l'augmentation de la minéralisation entraîne une diminution du pH (Zahi, 2014).

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

Le cercle de corrélation formé par les axes F1 et F2 (figure 44) représente 96.15 % de l'information totale. L'axe F1 (65.37%) est principalement lié à la conductivité électrique, au carbone organique, à la matière organique et à l'ion nitrate dans sa partie positive et au pH dans sa partie négative. Sur cet axe sont définis la pollution anthropique d'origines agricole, industrielle et urbaine dans sa partie positive et l'acidité dans sa partie négative. L'axe F2 (30.78 %) est corrélé seulement avec l'ion ammonium. Cet axe définit alors un gradient de pollution principalement due à des eaux résiduaires urbaines (Habes, 2013) qui sont généralement très enrichies en ions ammonium essentiellement produits par l'ammonification des substances azotées. En ce qui concerne la représentation des points (figure 44) dans les axes : l'axe F1 indique l'existence de trois groupes assez distincts: le premier est composé par le point 9, le second est constitué des points 1 et 2 et le troisième est formé par les points 5, 7

et 13. Le premier groupe est caractérisé par les valeurs les plus élevées en ions nitrate, en matière organique, en carbone organique et la plus minéralisée, et les valeurs les plus faibles de pH en opposition du troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires. L'axe F2 est témoin de l'existence de 3 groupes assez distincts: le premier est composé des points 7, 9 et 13, le second est constitué par le point 5, et le troisième est formé par les points 1 et 2. Le paramètre responsable de cette variabilité est l'ion ammonium. Cela signifie que le premier groupe est le plus riche en ions ammonium contrairement au troisième groupe. Le deuxième groupe contient des valeurs intermédiaires.

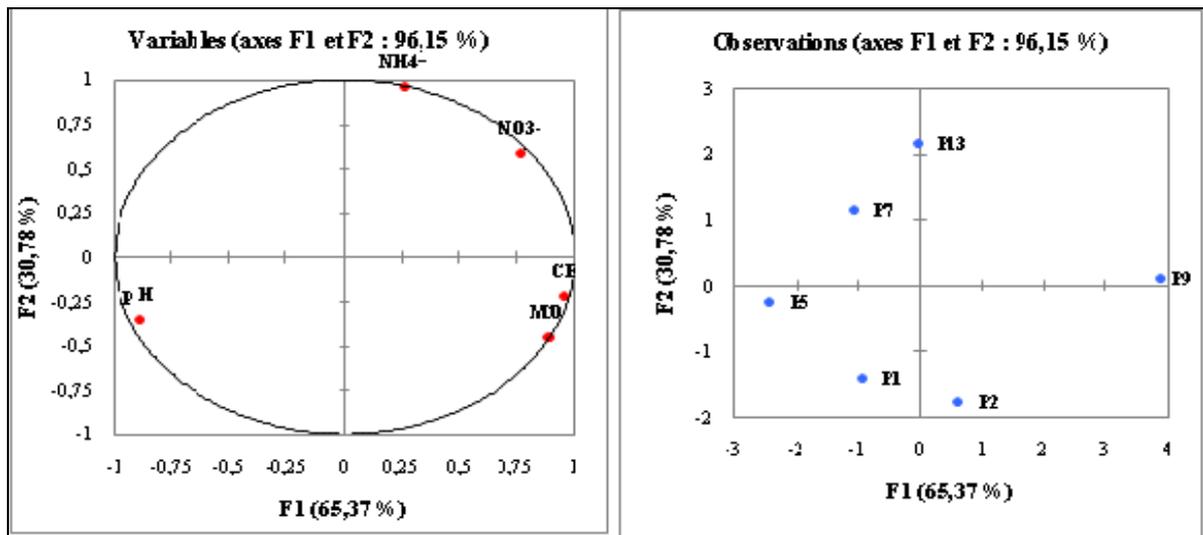


Figure 44. Répartition des paramètres et des points de sédiments sur le plan factoriel en saison sèche

### 3.2. Test *t* de Student

#### 3.2.1. Comparaison des moyennes des paramètres mesurés entre les deux saisons (humide et sèche) dans les points d'eau et des sédiments du Lac Fetzara

##### a. Eaux superficielles

###### ➤ Point 1

L'analyse des résultats du test *t* de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 1 (tableau 28), montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour la température, la conductivité électrique, l'oxygène dissous, les ions chlorure et les ions ammonium. Pour les autres paramètres, il existe des différences hautement significatives.

**Tableau 28.** Test  $t$  de Student du point 1 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P1		$t_{obs}$	$p$
	Moyenne			
	Saison humide	Saison sèche		
T (C°)	11.82	23.87	304.44	0.000***
pH	8.40	8.02	23.98	0.002**
CE ( $\mu$ S/cm)	1906	2922	167.75	0.000***
O <sub>2</sub> d (mg/l)	1.61	2.03	19	0.000***
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	628.87	691.41	70.18	0.000***
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.14	0.43	17.76	0.003**
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.11	0.16	6.12	0.004**
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	2.61	0.84	61.84	0.000***

**NB :**  $t_{obs}$  : valeur observée de la variable  $t$  de Student

$p$  : probabilité de mettre en évidence des différences significatives

$p \leq \alpha = 0.001$  : (\*\*\*) différence très hautement significative

$p \leq \alpha = 0.01$  : (\*\*) différence hautement significative

$p \leq \alpha = 0.05$  : (\*) différence significative

$p > \alpha = 0.05$  : (NS) différence non significative

### ➤ Point 2

L'analyse des résultats du test  $t$  de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 2 (tableau 29) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour la température, le pH, la conductivité électrique, l'oxygène dissous et les ions chlorure. Pour le paramètre nitrate, la différence est hautement significative. Tandis que pour, les ions nitrite et ammonium la différence est juste significative.

**Tableau 29.** Test  $t$  de Student du point 2 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P2		$t_{obs}$	$p$
	Moyenne			
	Saison humide	Saison sèche		
T (C°)	12.23	23.24	57.45	0.000***
pH	8.14	7.59	18.68	0.000***
CE ( $\mu$ S/cm)	1945.83	3153.83	1937.11	0.000***
O <sub>2</sub> d (mg/l)	4.43	2.75	55.32	0.000***
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	615.01	658.25	172.47	0.000***
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.10	0.32	16.75	0.004**
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.11	0.13	3.50	0.039*
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	2.11	0.51	2490	0.02*

➤ **Point 5**

L'analyse des résultats du test  $t$  de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 5 (tableau 30) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour la température, la conductivité électrique, l'oxygène dissous, les ions nitrate et les ions ammonium. Pour les ions nitrite et chlorure la différence est hautement significative. Tandis que pour le pH, la différence est significative.

**Tableau 30.** Test  $t$  de Student du point 5 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P5			
	Moyenne		$t_{obs}$	$p$
	Saison humide	Saison sèche		
T (C°)	13.42	24.05	200.03	0.000***
pH	8.76	8.71	5.06	0.015*
CE ( $\mu$ S/cm)	1036.67	1062	14.36	0.001***
O <sub>2</sub> d (mg/l)	4.92	3.12	78.62	0.000***
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	241.46	352.2	10.76	0.009**
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.08	0.92	40.88	0.001***
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.14	0.21	7.56	0.005**
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	2.23	0.80	18.38	0.000***

➤ **Point 7**

L'analyse des résultats du test  $t$  de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 7 (tableau 31) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour tous les paramètres, à l'exception des ions nitrate et nitrites où les différences entre les moyennes sont hautement significatives.

**Tableau 31.** Test  $t$  de Student du point 7 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P7			
	Moyenne		$t_{obs}$	$p$
	Saison humide	Saison sèche		
T (C°)	13.04	23.16	112.95	0.000***
pH	8.02	7.33	27.31	0.000***
CE ( $\mu$ S/cm)	734.33	851	132.29	0.000***
O <sub>2</sub> d (mg/l)	2.80	2.12	31.86	0.000***
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	154.14	349.35	814.27	0.009***
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.05	0.22	11.63	0.007**
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.04	0.07	6.36	0.003**
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	6.20	0.59	50.85	0.000***

## ➤ Point 9

L'analyse des résultats du test  $t$  de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 9 (tableau 32) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour tous les paramètres, à l'exception du pH et des ions nitrite où les différences entre les moyennes sont hautement significatives.

**Tableau 32.** Test  $t$  de Student du point 9 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P 9		$t_{obs}$	$p$
	Moyenne			
	Saison humide	Saison sèche		
T (C°)	17.05	24.33	41.38	0.001***
pH	8.21	7.81	13.14	0.006**
CE ( $\mu$ S/cm)	2883	8094.83	2449.33	0.000***
O <sub>2</sub> d (mg/l)	8.20	5.35	98.30	0.000***
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	897.94	2001.20	3132.47	0.000***
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.86	1.92	51.59	0.000***
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.11	0.41	23	0.002**
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	1.40	0.73	24.93	0.000***

## ➤ Point 13

L'analyse des résultats du test  $t$  de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 13 (tableau 33) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour tous les paramètres, à l'exception du pH et des ions nitrite où les différences sont hautement significatives.

**Tableau 33.** Test  $t$  de Student du point 13 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P 13		$t_{obs}$	$p$
	Moyenne			
	Saison humide	Saison sèche		
T (C°)	16.82	25.02	170.71	0.000***
pH	8.31	7.94	12.05	0.007**
CE ( $\mu$ S/cm)	762	960.67	63.53	0.000***
O <sub>2</sub> d (mg/l)	4.34	2.57	52.06	0.000***
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	331.64	520.46	436.22	0.000***
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	1.06	0.51	28.73	0.000***
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.11	0.21	5.88	0.004**
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	1.71	15.82	436.22	0.000***

## Conclusion

Le résumé de l'analyse des résultats du test  $t$  de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour les eaux superficielles du Lac Fetzara est présente dans le tableau suivant :

**Tableau 34.** Test  $t$  de Student pour les paramètres mesurés en saisons humide et sèche des eaux superficielles du Lac Fetzara

Paramètres	Eaux superficielles		
	Test $t$ de Student		
	***	**	*
T (°C)	tous les points	/	/
pH	P 2, P 7	P 1, P 9, P 13	P 5
CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	tous les points	/	/
O <sub>2</sub> (mg/l)	tous les points	/	/
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	P 1, P 2, P 7, P 9, P 13	P 5	/
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	P 5, P 9, P 13	P 1, P 2, P 7	/
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	/	P 1, P 5, P 7, P 9, P 13	P 2
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	P 1, P 5, P 7, P 9, P 13	P 2	/

### b. Eaux souterraines

#### ➤ P 3

L'analyse des résultats du test  $t$  de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 3 (tableau 35) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour tous les paramètres, à l'exception des ions chlorure qui présentent des différences hautement significatives et des différences significatives pour le pH.

**Tableau 35.** Test *t* de Student du point 3 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P 3		<i>t<sub>obs</sub></i>	<i>p</i>
	Moyenne			
	Saison humide	Saison sèche		
T (C°)	15.60	20.05	143.13	0.000***
pH	7.90	7.60	9.13	0.012*
CE (µS/cm)	687.67	733.83	46.82	0.000***
O <sub>2</sub> d (mg/l)	251	2.03	18.25	0.000***
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	117.19	118.66	9.08	0.003**
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	51.04	55.63	102.28	0.000***
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.09	0.72	50.25	0.000***
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	0.92	0.62	10.68	0.002****

## ➤ P 4

L'analyse des résultats du test *t* de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 4 (tableau 36) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour tous les paramètres, à l'exception du pH, des ions ammonium et nitrite où les différences sont juste significatives.

**Tableau 36.** Test *t* de Student du point 4 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P 4		<i>t<sub>obs</sub></i>	<i>p</i>
	Moyenne			
	Saison humide	Saison sèche		
T (C°)	15.80	21.56	159.17	0.000***
pH	8.23	8.38	4.21	0.024*
CE (µS/cm)	2894	3386.20	253.81	0.000***
O <sub>2</sub> d (mg/l)	7.66	8.28	18.89	0.000***
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	643.23	662.60	129.67	0.000***
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	10.91	13.73	124.59	0.000***
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.09	0.13	5	0.015*
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	1.31	1.11	8.99	0.012*

## ➤ P 6

L'analyse des résultats du test *t* de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 6 (tableau 37) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour la température, le pH, la conductivité électrique, l'oxygène dissous et les ions chlorure et qu'il existe des différences hautement significatives pour les ions nitrate. Pour les ions nitrite et ammonium, il existe des différences juste significatives.

**Tableau 37.** Test *t* de Student du point 6 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P 6			
	Moyenne		$t_{obs}$	<i>p</i>
	Saison humide	Saison sèche		
T (C°)	14.41	21.81	554.75	0.000***
pH	8.02	7.69	13.10	0.001***
CE (µS/cm)	1413.13	1597	119.49	0.000***
O <sub>2</sub> d (mg/l)	5.70	4.81	57.35	0.000***
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	328.61	412.28	1390.27	0.000***
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.83	0.61	10.75	0.009**
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.05	0.03	3.50	0.039*
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	0.73	0.58	5.46	0.012*

➤ **P 8**

L'analyse des résultats du test *t* de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 8 (tableau 38) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour la température, le pH, la conductivité électrique, l'oxygène dissous et les ions chlorure et qu'il existe des différences hautement significatives pour les ions nitrate et ammonium. Pour les ions nitrite, il existe des différences significatives.

**Tableau 38.** Test *t* de Student du point 8 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P 8			
	Moyenne		$t_{obs}$	<i>p</i>
	Saison humide	Saison sèche		
T (C°)	16.08	21.07	86.95	0.000***
pH	8.32	7.79	22.43	0.000***
CE (µS/cm)	1173.83	1428.13	531.54	0.000***
O <sub>2</sub> d (mg/l)	8.29	6.52	92.44	0.000***
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	267.16	302.81	285.84	0.000***
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	1.20	1.94	23.15	0.002**
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.02	0.05	3.50	0.039*
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	1.19	1.02	5.98	0.009**

➤ **P 10**

L'analyse des résultats du test *t* de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 10 (tableau 39) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour la température, la conductivité électrique, l'oxygène dissous, les ions chlorure et ammonium. La

différence est hautement significative pour le pH et juste significative pour les ions nitrite. Pour les ions nitrate, il n'y a pas de différences significatives entre les moyennes.

**Tableau 39.** Test *t* de Student du point 10 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

P 10				
Paramètres	Moyenne		<i>t</i> <sub>obs</sub>	<i>p</i>
	Saison humide	Saison sèche		
T (C°)	16.67	21.97	180.03	0.000***
pH	7.48	7.12	10.03	0.002**
CE (µS/cm)	1088.33	1174.33	50.60	0.000***
O <sub>2</sub> d (mg/l)	3.52	3.02	23.56	0.000***
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	331.90	374.90	2633.20	0.000***
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.31	0.43	4.28	0.051
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.01	0.04	4	0.028*
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	1.12	0.69	24	0.000***

➤ P 11

L'analyse des résultats du test *t* de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 11 (tableau 40) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour tous les paramètres, à l'exception de l'ion nitrite dont les différences sont juste significatives.

**Tableau 40.** Test *t* de Student du point 11 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche

P 11				
Paramètres	Moyenne		<i>t</i> <sub>obs</sub>	<i>p</i>
	Saison humide	Saison sèche		
T (C°)	15.87	22.02	179.40	0.000***
pH	8.02	7.54	17.84	0.000***
CE (µS/cm)	1541	1780	164.26	0.000***
O <sub>2</sub> d (mg/l)	3.69	3.07	15.15	0.001***
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	195.38	212.25	366.20	0.000***
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.11	0.20	14.50	0.001***
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.02	0.05	3.50	0.039*
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	1.83	1.19	25.66	0.000***

➤ P 12

L'analyse des résultats du test *t* de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 12 (tableau 41) montre

qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour tous les paramètres, à l'exception des ions nitrite dont les différences sont hautement significatives.

**Tableau 41.** Test *t* de Student du point 12 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P 12			
	Moyenne		<i>t</i> <sub>obs</sub>	<i>p</i>
	Saison humide	Saison sèche		
T (C°)	15.25	23.71	307.78	0.000***
pH	8.51	8.09	23.43	0.000***
CE (µS/cm)	1103.67	1301	71.92	0.000***
O <sub>2</sub> d (mg/l)	4.60	3.81	52.77	0.000***
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	251.62	268.04	465.27	0.000***
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.81	1.20	14.37	0.005**
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.02	0.05	6.36	0.003**
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	1.02	0.62	16.50	0.000***

### Conclusion

Le résumé de l'analyse des résultats du test *t* de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour les eaux souterraines du lac Fetzara est présente dans le tableau suivant :

**Tableau 42.** Test *t* de Student pour les paramètres mesurés en saisons humide et sèche des eaux souterraines

Paramètres	Eaux souterraines			
	Test <i>t</i> de Student			
	***	**	*	NS
T (C°)	tous les paramètres	/	/	/
pH	P 6, P 8, P 11, P 12	P 10	P 3, P 4	/
CE (µS/cm)	tous les paramètres	/	/	/
O <sub>2</sub> (mg/l)	tous les paramètres	/	/	/
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	P 4, P6, P 8, P 10, P 11, P12	P 3	/	/
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	P 3, P 4, P 11	P 6, P 8, P 12	/	P 10
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	P3	P 12	P 4, P 6, P 8, P 10, P 11	/
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	P 10, P 11, P 12	P 3, P 8	P 4, P 6	/

## c. Les sédiments

## ➤ P 1

L'analyse des résultats du test  $t$  de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 1 (tableau 43) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour tous les paramètres, à l'exception des ions nitrate et ammonium dont les différences entre les moyennes sont hautement significatives.

**Tableau 43.** Test  $t$  de Student du point 1 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P 1		$t_{obs}$	$p$
	Moyenne			
	Saison humide	Saison sèche		
pH	8.14	7.14	43.61	0.000***
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	556	778.13	366.29	0.000***
C (%)	1.41	1.90	33.27	0.000***
MO (%)	2.39	3.29	39.51	0.001***
$\text{NO}_3^-$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	1.34	0.81	19.85	0.003**
$\text{NH}_4^+$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	4.10	1.54	24.83	0.002**

## ➤ P 2

L'analyse des résultats du test  $t$  de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 2 (tableau 44) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour la conductivité électrique, le carbone organique et la matière organique. La différence est hautement significative pour le pH et juste significative pour les ions nitrate et ammonium.

**Tableau 44.** Test  $t$  de Student du point 2 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P 2		$t_{obs}$	$p$
	Moyenne			
	Saison humide	Saison sèche		
pH	8.11	7.43	22.11	0.002**
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	622.67	880.33	73.70	0.000***
C (%)	2.24	3.22	30.55	0.000***
MO (%)	3.90	5.58	65.62	0.000***
$\text{NO}_3^-$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	0.74	0.63	3.50	0.039*
$\text{NH}_4^+$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	3.74	3.62	3.65	0.036*

## ➤ P 5

L'analyse des résultats du test  $t$  de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 5 (tableau 45) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour le pH et la conductivité électrique. La différence est hautement significative pour les ions ammonium et juste significative pour les ions nitrate, le carbone organique et la matière organique.

**Tableau 45.** Test  $t$  de Student du point 5 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P 5		$t_{obs}$	$p$
	Moyenne			
	Saison humide	Saison sèche		
pH	7.91	7.70	12.36	0.001***
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	124.67	218	35	0.001***
C (%)	0.71	0.62	4.70	0.018*
MO (%)	1.25	1.03	5.11	0.015*
$\text{NO}_3^-$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	0.87	0.79	4.07	0.027*
$\text{NH}_4^+$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	5.54	7.74	17.97	0.003**

## ➤ P 7

L'analyse des résultats du test  $t$  de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 7 (tableau 46) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour tous les paramètres.

**Tableau 46.** Test  $t$  de Student du point 7 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P 7		$t_{obs}$	$p$
	Moyenne			
	Saison humide	Saison sèche		
pH	8.42	7.51	37.72	0.000***
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	132.33	428.83	195.27	0.000***
C (%)	0.49	0.82	19.22	0.000***
MO (%)	0.82	1.41	21.04	0.000***
$\text{NO}_3^-$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	0.24	1.35	37.39	0.000***
$\text{NH}_4^+$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	8.01	19.72	356.49	0.000***

## ➤ P 9

L'analyse des résultats du test  $t$  de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 9 (tableau 47) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour tous les paramètres, à l'exception du carbone organique qui présente des différences hautement significatives.

**Tableau 47.** Test  $t$  de Student du point 9 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P 9		$t_{obs}$	$p$
	Moyenne			
	Saison humide	Saison sèche		
pH	8.33	7.29	40.70	0.000***
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	542	1908	308.02	0.000***
C (%)	3.64	4	16.66	0.004**
MO (%)	5.22	6.83	64.41	0.000***
$\text{NO}_3^-$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	3.92	3.18	25.81	0.000***
$\text{NH}_4^+$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	10.05	18.53	166.73	0.000***

## ➤ P 13

L'analyse des résultats du test  $t$  de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour le point 13 (tableau 48) montre qu'il existe des différences très hautement significatives entre les deux saisons pour le pH, la conductivité électrique, les ions nitrate et ammonium. La différence est hautement significative pour la matière organique. Pour le carbone organique, il n'existe pas de différences significatives.

**Tableau 48.** Test  $t$  de Student pour le point 13 des paramètres mesurés en saisons humide et sèche.

Paramètres	P 13		$t_{obs}$	$p$
	Moyenne			
	Saison humide	Saison sèche		
pH	7.91	7.43	27.59	0.000***
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	173	502	152.30	0.000***
C (%)	1.06	1.18	3.53	0.072
MO (%)	1.86	2.02	8.49	0.003**
$\text{NO}_3^-$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	2.79	2.06	22.34	0.000***
$\text{NH}_4^+$ ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	20.29	31.18	67.19	0.000***

## Conclusion

Le résumé de l'analyse des résultats du test *t* de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en saison humide et en saison sèche pour les sédiments du Lac Fetzara est présenté dans le tableau suivant :

**Tableau 49.** Test *t* de Student pour les paramètres mesurés en saisons humide et sèche des sédiments

Paramètres	Sédiments			
	Test <i>t</i> de Student			
	***	**	*	NS
<b>pH</b>	P 1, P 5, P 7, P 9, P 13	P 2	/	/
<b>CE (µS/cm)</b>	tous les points	/	/	/
<b>C (%)</b>	P 1, P 2, P 7	P9	P 5	P 13
<b>MO (%)</b>	P 1, P 2, p 7, p 9	P 13	P5	/
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (µg/g)</b>	P 7, P 9, P13	P1	P 2, P 5	/
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (µg/g)</b>	P 7, P 9, P 13	P 1, P5	P 2	/

### 3.2.2. Comparaison des moyennes des paramètres mesurés entre les deux années 2015 et 2016, dans les eaux et les sédiments du Lac Fetzara

#### ➤ Eaux superficielles

L'analyse des résultats du test *t* de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en 2015 et en 2016 des eaux superficielles (tableau 50) montre qu'il existe des différences très hautement significatives pour tous les paramètres à l'exception de l'oxygène dissous qui présente des différences juste significatives.

#### ➤ Eaux souterraines

L'analyse des résultats du test *t* de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en 2015 et en 2016 des eaux souterraines (tableau 50) montre qu'il existe des différences très hautement significatives pour la conductivité électrique, l'oxygène dissous, les ions chlorure, nitrate et ammonium. Les différences sont hautement significatives pour la température et juste significatives pour le pH et les ions nitrite.

➤ **Les sédiments**

L'analyse des résultats du test  $t$  de Student de la comparaison des moyennes de chacun des paramètres mesurés en 2015 et en 2016 des sédiments (tableau 50) montre qu'il existe des différences très hautement significatives pour le pH, la conductivité électrique et les ions ammonium. Les différences sont juste significatives pour les ions nitrate. Alors que pour le carbone organique et la matière organique, il n'existe pas des différences significatives.

**Tableau 50.** Test  $t$  de Student des paramètres mesurés en deux années (2015, 2016) d'étude des eaux et des sédiments du Lac Fetzara

<b>Eaux superficielles</b>				
<b>Paramètres</b>	<b>Moyenne</b>		<b><math>t_{obs}</math></b>	<b><math>p</math></b>
	<b>2015</b>	<b>2016</b>		
T (C°)	18.55	19.61	84.99	0.000***
pH	8.10	8.21	8.82	0.001***
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1966.29	2419.21	16477.26	0.000***
O <sub>2</sub> d (mg/l)	3.42	3.61	9.47	0.011*
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	499.02	745.32	11267.97	0.000***
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.48	0.63	14.55	0.001***
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.13	0.18	9.90	0.001***
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	1.85	3.92	121.98	0.000***
<b>Eaux souterraines</b>				
<b>Paramètres</b>	<b>Moyenne</b>		<b><math>t_{obs}</math></b>	<b><math>p</math></b>
	<b>2015</b>	<b>2016</b>		
T (C°)	18.65	18.93	7.29	0.005**
pH	7.79	8.03	7.76	0.016*
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1449.53	1600.05	4157.13	0.000***
O <sub>2</sub> d (mg/l)	3.83	5.54	50.40	0.000***
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	306.49	334.60	826.92	0.000***
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	9.62	10.22	24.82	0.000***
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0.09	0.11	3.50	0.039*
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	0.91	1.13	26.94	0.000***
<b>Sédiments</b>				
<b>Paramètres</b>	<b>Moyenne</b>		<b><math>t_{obs}</math></b>	<b><math>p</math></b>
	<b>2015</b>	<b>2016</b>		
pH	7.93	7.71	12.28	0.001***
CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	470.21	677.39	10082.87	0.000***
C (%)	2.02	1.90	2.44	0.135
MO (%)	3.14	2.71	3.92	0.059
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	2.09	1.43	4.93	0.016*
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ( $\mu\text{g}/\text{g}$ )	10.72	11.70	30.05	0.000***

#### 4. DISCUSSION

La température des eaux superficielles et souterraines de la zone humide du Lac Fetzara montre des valeurs maximales en été et minimales en hiver. Elle est liée exclusivement au climat de la région (Fekrache, 2015 ; Merghem *et al.*, 2016), tout en restant inférieures à la valeur maximale de 25°C (JORA, 2011). Les températures élevées agissent positivement sur la conductivité électrique par action sur la solubilité et sur la mobilité des sels, sur la nitrification (teneur en ions nitrate et en ions nitrite) par une action directe sur les micro-organismes nitrifiants (Metahri, 2012) et négativement sur l'oxygène dissous (influence sur la solubilité de l'oxygène dans l'eau et sur le taux de consommation par les organismes) (Villeneuve *et al.*, 2006).

Les valeurs du pH limitées entre 7.2 et 8.9 traduisent l'alcalinité de cette eau (Drouart et Vouillamoz, 1999). L'environnement physique caractérisé en partie par des terrains calcaires seraient probablement à l'origine de cette alcalinité (Savary, 2010). Il est important aussi de noter que les valeurs du pH sont diminuées en période sèche dans la majorité des points d'eau analysés. Cette diminution traduit l'augmentation de la minéralisation qui entraîne une élévation de la force ionique de l'eau et donc une diminution du pH (Zahi, 2014). Le pH est un facteur très important pour la nitrification (Pambrun, 2005). La vitesse de cette dernière n'est pas influencée dans une gamme de pH comprise entre 7.2 et 8 (Degremont, 2005), mais dans un pH très basique ou très acide, la nitrification est complètement inhibée, car l'ammoniaque libre (NH<sub>3</sub>) et l'acide nitreux (HNO<sub>2</sub>) ont un effet inhibiteur sur la nitrification (Pambrun, 2005).

Par ailleurs, les eaux de la zone humide du Lac Fetzara se présentent avec une minéralisation importante à élevée. Les fortes valeurs sont observées dans les secteurs central et Est pour les eaux superficielles et Sud pour les eaux souterraines. Cette forte minéralisation dans ces points est fonction de la nature des terrains traversés (apports salifères), de la saison et des rejets (agricoles, urbains et industriels) (El Morhit *et al.*, 2012). Les variations des facteurs climatiques constituent également une source de la variation de la minéralisation. En effet, au cours de la saison pluvieuse, les concentrations baissent par dilution due aux eaux pluviales. Par contre, au cours de la saison sèche, l'évaporation importante entraîne un accroissement des concentrations en ions minéraux (Kotchi *et al.*, 2016).

La variation spatiotemporelle des concentrations des ions chlorure indique une augmentation très hautement significatives dans la majorité des points d'eau en saison sèche par rapport à la

saison humide dont les eaux pluviales diluent les solutions aqueuses du Lac Fetzara (Makhoukh et *al.*, 2011). Comparée à la grille de qualité des eaux (ANRH, 2009), la majorité des eaux de la zone humide du Lac Fetzara présentent une pollution notable à importante. Comme pour la conductivité électrique dans les eaux du Lac Fetzara, les fortes valeurs sont observées dans sa partie centrale et sa partie située à Est pour les eaux superficielles et la partie située au Sud pour les eaux souterraines. Cette augmentation dans ces points n'est pas liée seulement à des apports salifères (Zahi, 2014) mais aussi à la pollution par des rejets agricoles (Sigg et *al.*, 2006), industriels et urbains (Rodier et *al.*, 2009).

L'oxygène dissous présente d'importantes variations irrégulières par rapport à l'espace et au temps avec des valeurs limites de 0.2 mg/l et 8.8 mg/l. L'évolution saisonnière montre des concentrations élevées en période humide qu'en période sèche. La différence est très hautement significative. Ceci est dû essentiellement à la diminution de la température de l'eau, car une eau froide renferme d'une plus grande quantité d'oxygène dissous qu'une eau chaude (influence directe de la température sur la solubilité de l'oxygène dans l'eau et indirecte sur l'activité bactérienne) (Hebert et Legare, 2000 ; Villeneuve et *al.*, 2006) et à la faible nitrification dans cette période (Fustec et Lefeuvre, 2000). En outre, les vitesses des vents engendrent un brassage continu de la masse d'eau peu profonde et par conséquent un enrichissement de la phase aqueuse en oxygène dissous pendant la saison humide (Merghem et *al.*, 2016). L'oxygène dissous est un des principaux facteurs de régulation du cycle de l'azote. Sa présence ou son absence est alors déterminante pour les processus de transformation des formes minérales de l'azote et des substances organiques azotées (Montuelle, 2003). De ce fait, une carence en oxygène dissous peut induire un ralentissement et même un arrêt du processus de nitrification (Pambrun, 2005).

Les teneurs en ion nitrate dans les eaux du Lac Fetzara restent inférieures à la valeur admissible par les normes (50 mg/l) (Savary, 2010) à l'exception du point 3 (puits) qui se trouve à la proximité de parcelles de sol cultivées où les concentrations en cet ion sont élevées (56 mg/l). En période estivale, les teneurs en cet ion sont plus fortes. Cette variabilité saisonnière pourraient s'expliquer par le fait qu'en période sèche, il y a augmentation des teneurs en ions minéraux par réduction de la masse d'eau sous l'effet de l'évaporation intense et en période humide il y a dilution des solutions aqueuses du lac par les eaux de pluie (Kotchi et *al.*, 2016). Aussi, la nitrification contribue de façon non négligeable dans la transformation de l'ion ammonium vers l'ion nitrite et l'ion nitrate par oxydation dans la période de basses

eaux (Fustec et Lefevre, 2000). Cette réaction est optimale en présence de l'oxygène dissous (Sigg et *al.*, 2006). Les nitrates produits peuvent dans des conditions particulières et assez rares, être réduits en ammonium, mais ils sont d'une manière générale éliminés par dénitrification (Bernaud et Fustec, 2007). On remarque aussi que les concentrations en ion nitrate dans les nappes d'eau souterraines sont généralement supérieures à celles des eaux superficielles notamment dans les zones à forte pratique agricole (OMS, 2000 ; Gilli et *al.*, 2004). Les échantillons d'eau superficielles et souterraines de l'année 2016 sont plus riches en ions nitrate que ceux de l'année 2015. Cette augmentation qui est très hautement significative peut être due aux activités anthropiques (utilisation excessive d'engrais dans l'agriculture, aux déchets végétaux et animaux, ainsi qu'aux effluents liquides domestiques et industriels) (Merceron, 1999) aboutissants dans la zone humide du Lac Fetzara.

Globalement, les concentrations en ion nitrite dépassent la norme de 0,1 mg/l (Lacoze, 1996) dans la majorité des points d'eau superficielle et deux puits seulement (P3 et P4) pour les eaux souterraines. Dans les eaux superficielles, les fortes concentrations (0,58 mg/l) sont observées dans le point 9 situé dans la partie centrale du lac. Celle-ci recevant toutes les eaux collectées du bassin versant du Lac Fetzara et la plus exposée à l'évaporation. Par contre, dans les eaux souterraines les fortes concentrations sont enregistrées dans le puits 3 de la partie Est qui se trouve à la proximité de parcelles de sol cultivées. En période estivale, les concentrations en cet ion sont plus fortes. Comme pour les ions nitrates, cette augmentation serait liée au phénomène d'évaporation et à la forte nitrification pendant cette période (Fustec et Lefevre, 2000). Il est important aussi de noter que les échantillons d'eau superficielle et souterraine de l'année 2016 sont plus riches en ions nitrite que ceux de l'année 2015. Les différences sont hautement significatives pour les eaux superficielles et significatives pour les eaux souterraines. Cette augmentation peut être due à la pollution (agricole, industrielle et urbaine) qui touche la zone du Lac Fetzara.

Les concentrations en ions ammonium dans les eaux dépassent la norme de 0,5 mg/l et montrent des valeurs plus importantes en hiver qu'en été. Les conditions défavorables à la nitrification, notamment une température basse, expliquent cette augmentation (Vilaginès, 2000). Cependant, le point superficiel 13 en fait exception car ses concentrations en ions ammonium deviennent très élevées (jusqu'à 20.75 mg/l) en période estivale. A cette période, ce point, est alimenté uniquement en eaux résiduaires urbaines (Habes, 2013) qui sont généralement très enrichies en ions ammonium. Aussi l'ammonification contribue de façon

non négligeable dans cette augmentation par la transformation des ions nitrate en ions nitrite et enfin la réduction qui donne les ions ammonium (Bernaud et Fustec, 2007). En outre, les concentrations en ion ammonium sont devenues considérablement fortes au cours de l'année 2016 dans tous les points soit superficielles ou souterraines. Cette augmentation qui est très hautement significative peut être liée à la diversité des apports anthropiques (agricoles, industriels et urbains) qui alimentent la zone humide du Lac Fetzara par des eaux très riches en ions ammonium.

Le pH des sédiments de la zone humide du Lac Fetzara correspond au type alcalin (Mathieu et Pieltain, 2009) qui peut être lié à la présence des carbonates (Sarah, 2014). Les plus faibles valeurs sont observées en été. Ce qui peut avoir une relation avec l'augmentation de la température (Guergueb, 2015 ; Sarah, 2014).

La valeur la plus importante de la conductivité électrique des sédiments est observée dans le point 9 qui se situe dans la partie centrale du lac. Cette partie étant la plus basse, est très affectée par les apports naturels salifères et carbonatés (Zahi et *al.*, 2013) et anthropiques (agricoles, industriels et urbains). La comparaison des valeurs saisonnières révèle que celles-ci sont plus fortes en été qu'en hiver. Cette différence qui est très hautement significative serait probablement liée à la dilution par les eaux pluviales abondantes en période humide (Monyr et *al.*, 2016).

L'analyse granulométrique montre que les sédiments analysés présentent des textures sableuses, argileuses et sablo-limoneuse avec une dominance des textures sableuses (58.66 %) par rapport à la fraction argileuse et limoneuse (avec respectivement 23.33 % et 18 %). La granulométrie est un facteur qui influence le contenu en carbone et en matière organique dans les sédiments. Les plus fortes valeurs sont observées dans les sédiments à granulométrie très fine. Les particules les plus fines (argiles) stockent plus de matière organique (Le Gouche, 2016). Elle influence aussi la teneur en azote (ions nitrate et nitrite) des sédiments grâce aux argiles qui constituent un lieu favorable à la nitrification bactérienne (Fustec et Lefeuvre, 2000 ; Montuelle, 2003).

Les teneurs en matière organique dans les sédiments sont relativement faibles, à l'exception du point 9 où les teneurs dépassent 7 % dans les deux périodes d'étude. Ce point est situé dans la partie centrale du lac qui reçoit toutes les eaux collectées (industrielles, urbaines et agricoles) à la périphérie du Lac Fetzara (Yao Koffi et *al.*, 2009). Ces eaux apportent donc

une charge organique importante et une masse considérable de nutriments au milieu lacustre (Ouertani et *al.*, 2006). Aussi, ce point 9 caractérisé par une texture argileuse (fine), constitue un milieu de stocke de matière organique (Le Gouche, 2016). Ceci est en adéquation avec les fortes teneurs en carbone organique observées à ce point 9. Les eaux collectées (eaux de lessivage des sols et les eaux résiduelles) y sont les sources essentielles des matières organiques (Ouertani et *al.*, 2006).

Les concentrations en ions nitrate dans les sédiments sont plus importantes en hiver qu'en été, à l'inverse de l'ion ammonium. A cette saison, les sédiments bien oxygénés constituent une matrice oxydante et par conséquent favorisent à l'oxydation bactérienne de l'ion ammonium (Chapelle et *al.*, 1994). Les nitrates produits et accumulés par les sédiments peuvent être transformés en ion ammonium ou dénitrifiés (Lerat et *al.*, 1985). Les quantités les plus importantes sont observées dans le point 9 (partie centrale du lac). Les fortes concentrations enregistrées dans ce point sont liées à la diversité des sources d'apports (agricoles, domestiques et industrielles) (Guergueb, 2016). En outre, la nitrification qui est très forte dans les sédiments de texture argileuse contribue de façon non négligeable à sa grande quantité (Fustec et Lefèvre, 2000 ; Montuelle, 2003).

Par contre l'évolution temporelle de l'ion ammonium dans les sédiments du Lac Fetzara est marquée par un abaissement pendant la période humide par rapport à la période sèche résultant du blocage de la minéralisation de la matière organique en hiver (Feuillet Girard et *al.*, 1988) et à la forte oxygénation des sédiments dans cette période qui favorise l'oxydation et donc la diminution dans les concentrations (Chapelle et *al.*, 1994). La comparaison des teneurs en ions ammonium et en ions nitrate dans les sédiments pour chaque campagne a confirmé que les teneurs en ion ammonium étaient toujours supérieures à celles des ions nitrate, à chaque point et à chaque période. Cette supériorité peut s'expliquer par le fait que les ions positifs ( $\text{NH}_4^+$ ) du fait de leurs charges s'adsorbent facilement sur les particules du sédiment, alors que les ions négatifs ( $\text{NO}_3^-$ ) n'étant pas retenus par les sédiments, se retrouvent plutôt dans la matrice aqueuse d'une colonne eau- sédiment du lac (Montuelle, 2003). Le sédiment se présente donc comme un réservoir en ammonium vis-à-vis de la colonne d'eau (Feuillet Girard et *al.*, 1988). Il importe aussi de noter que les sédiments de l'année 2016 sont plus riches en ions ammonium que les sédiments de l'année 2015. Les différences qui sont très hautement significatives sont liées essentiellement à la pollution

(agricoles, industrielles et urbaines) qui augmente les apports d'azote dans les eaux et les sédiments du Lac Fetzara.

Les résultats de l'ACP nous a permis de joindre les différentes caractéristiques pour chaque point d'eau (superficiel et souterraine) et des sédiments, et de répartir ces derniers en 2 classes sur la base du niveau de pollution par l'azote.

Pour les eaux superficielles et les sédiments, c'est le point 9 situé dans la partie centrale du lac recevant toutes les eaux collectées et de toutes nature (agricoles, industrielles et urbaines) qui est le plus riche en ions nitrate et nitrite et le point 13 (Oued Zied) qui est alimenté en eaux résiduaires urbaines, est le plus riche en ion ammonium.

En ce qui concerne les eaux souterraines, les fortes concentrations en ions nitrate et nitrites sont observées dans la partie Est du lac (P3) qui se trouve à la proximité de parcelles cultivées. Par contre les quantités les plus élevées en ion ammonium sont enregistrées au niveau du puits 11 qui situé dans la partie Nord du lac. De visu, ce puits non couvert est très pollué.

Le test *t* de Student nous a permis de comparer les moyennes de chacune des formes d'azote mesurées entre les deux saisons humide et sèche et entre les deux années d'étude 2015 et 2016, dans les eaux superficielles, souterraines et les sédiments du Lac Fetzara.

En résumé de l'analyse de la comparaison des moyennes entre les deux saisons dans les eaux et les sédiments, apparaissent des différences soit très hautement significatives, hautement significatives et parfois significatives selon les points d'échantillonnages.

Par contre le résumé de l'analyse de la comparaison des moyennes entre les deux années montre :

- Des différences très hautement significatives pour les différentes formes d'azote dans les eaux superficielles.
- Des différences très hautement significatives pour les ions nitrate et ammonium et juste significatives pour les ions nitrite dans les eaux souterraines.
- Des différences très hautement significatives pour les ions ammonium et juste significatives pour les ions nitrates dans les sédiments.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Le but de ce travail est d'étudier les matières azotées dans les eaux (superficielles et souterraines) et les sédiments de la zone humide du Lac Fetzara, en cherchant leurs sources, leurs quantifications, leurs transferts, leurs transformations, ainsi que leur impact sur le lac lui-même et sur son environnement, à partir d'une approche physicochimique spatio-temporelle.

Située dans la région d'Annaba, la zone humide du Lac Fetzara couvre une superficie estimée à 18600 ha dont une très grande partie est affectée par la pollution. L'activité agropastorale pratiquée dans sa zone périphérique, l'activité industrielle et les eaux résiduaires des agglomérations urbaines avoisinantes constituent des sources potentielles de la pollution de ses eaux par les matières azotées et d'autres substances.

Le climat de type méditerranéen sub-humide de cette zone est caractérisé par deux saisons contrastées : une période humide et fraîche de 8 mois (s'étalant du mois d'Octobre jusqu'au mois de Mai) et une période sèche et chaude de 4 mois (de Juin à Septembre). C'est durant la saison sèche que le taux d'évaporation très élevé, provoque une concentration des sels dans la matrice aqueuse et dans les sédiments.

Quatre campagnes de mesures et de prélèvements des échantillons d'eaux (superficielles et souterraines) et des sédiments ont été effectuées durant les mois de Janvier (saison humide) et de Juin (saison sèche) des années 2015 et 2016.

Les échantillons d'eau ont été prélevés au niveau de 13 points (6 pour les eaux superficielles et 7 pour les eaux souterraines) et des sédiments ont été échantillonnés au niveau de 6 points.

La température, le pH, l'oxygène dissous et la conductivité électrique des eaux ont été mesurés sur le terrain (*in situ*). Les analyses chimiques des eaux (concernant Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) et des sédiments (pH, CE, MO, C, texture, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) ont été effectuées au laboratoire. L'étude statistique des résultats analytiques obtenus est basée sur l'analyse en composantes principales (ACP) et sur le test *t* de Student.

Les températures mesurées dans les eaux reflètent l'influence du climat de la région. Les pH sont basiques, tandis que les variations de la conductivité électrique qui est dominés par l'ion chlorure 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 d'eau après la saison des pluies. Les fortes valeurs de sels minéraux solubles sont observées dans le secteur central, à l'Est et au Sud du lac.

Des fluctuations spatio-temporelles importantes des concentrations en oxygène dissous caractérisent aussi bien les eaux de surface que les eaux souterraines où des situations de sursaturation et d'anoxie sont observées.

Les concentrations en ions nitrate sont globalement inférieures à la norme de 50 mg/l, à l'exception du puits 3 qui se trouve à la proximité de parcelles cultivées où les concentrations sont élevées (56 mg/l) correspondant à une pollution importante. Cependant, la majorité des eaux superficielles et celles des deux puits 3 et 4 qui, situés dans la partie Est et Sud, sont riches en ions nitrite. La forte activité anthropique (agricole, industrielle et urbaine) qui caractérise cette zone serait la source directe ou indirecte de cette pollution. En ce qui concerne les concentrations en ion ammonium, tous les points étudiés présentent une pollution nette avec des valeurs maximales dans les points qui reçoivent des eaux résiduaires urbaines.

La variation saisonnière de différentes formes d'azote est essentiellement sous l'influence des conditions climatiques (température, précipitation et évaporation), physico-chimiques (pH et l'oxygène dissous) et biochimiques (nitrification, dénitrification et ammonification).

Concernant les ions nitrate et nitrite, la variation saisonnière est marquée par une augmentation des concentrations pendant la saison sèche par rapport à la saison humide. L'intense évaporation et la forte nitrification dans cette période en sont les causes essentielles. Par contre les concentrations en ion ammonium sont très élevées en saison humide. Le ralentissement de la nitrification sous l'effet de la diminution de la température en serait l'explication la plus plausible.

La transformation des différentes formes d'azote se fait par le changement en forme nitrate dans les conditions oxydantes et en forme ammonium dans les conditions réduites avec une étape sous la forme nitrite ou sous forme d'azote ( $N_2$ ) s'évaporant dans l'atmosphère.

Les analyses effectuées sur les sédiments du Lac Fetzara ont révélé que les sédiments ont des textures sableuse, argileuse et sablo-limoneuse, et leur pH est alcalin.

La salinité, la teneur en matière organique et en carbone organique sont généralement faibles à l'exception du point 9 qui est situé dans la partie centrale du lac. Cette partie étant la plus encaissée du lac, est très affectée par les apports naturels et anthropiques.

Comme les eaux superficielles, les fortes concentrations en ions nitrate dans les sédiments sont enregistrées dans la partie centrale (point 9) du lac. Par contre les fortes teneurs en ions ammonium sont observées au niveau du point 13 qui représente l'oued Zied. Celui-ci est alimenté en eaux résiduaires urbaines de l'agglomération d'Oued Zied. Les sédiments y constituent donc un lieu d'accumulation importante d'azote dans la colonne d'eau.

L'évolution temporelle de la teneur en ions nitrate est marquée par une augmentation pendant l'hiver, résultant de la forte oxygénation des sédiments qui favorise l'oxydation bactérienne de l'ion ammonium (nitrification). Par contre, la concentration en ions ammonium est forte pendant la période sèche. La forte minéralisation (ammonification) et la faible oxygénation des sédiments dans cette période en seraient les causes.

L'interprétation des données analytiques en fonction de la répartition et l'évolution des points de prélèvements par rapport à la pollution azotée est basée sur l'analyse en composantes principales (ACP) et sur le test *t* de Student. Le niveau de cette pollution varie spatialement selon la distance d'éloignement de la source de pollution et par rapport à la saison (humide et sèche) et les années (2015 et 2016).

L'effet de la pollution agricole, industrielle et urbaine qui touche la zone humide du Lac Fetzara est traduit par une augmentation considérable de la concentration en azote dans les eaux et les sédiments pendant la deuxième année d'étude. Cette augmentation cause de graves dommages pour les différents compartiments du lac.

Sur la base de tous ces résultats, nos recommandations suivantes permettent de protéger le Lac Fetzara contre la pollution par les matières azotées :

- Le contrôle qualitatif et quantitatif des apports d'eau vers le lac doit être effectué d'une manière systématique pour prévoir toute augmentation excessive des teneurs en matières azotées.
- Réaliser épuration préalable des rejets des eaux urbaines et industrielles avant qu'ils n'atteignent le Lac Fetzara.
- La réduction des apports de substances azotées en agriculture par l'utilisation rationnelle des engrais.

Ajoutez quelques idées de perspectives de recherche dans la même thématique :

Par exemple :

- Le rôle de la végétation aquatique sur la dynamique de l'azote dans la zone humide du Lac Fetzara.
- L'impact des oiseaux sur la charge azotée dans la zone du Lac Fetzara en période de migration.
- Etude de l'élevage du pastoralisme et la dynamique de l'azote dans la zone humide du Lac Fetzara.
- Etude de la contribution de l'élevage des animaux sur la périphérie du Lac Fetzara à la pollution de ses eaux.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**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.

**Amalric L., 2011** - Analyse de polluants organiques dans les sédiments, Aquaref. 44p.

**Andrianarisoa K.S., 2009** - Minéralisation de l'azote et nitrification dans les écosystèmes forestiers : effet du type de sol et de l'essence forestière. Thèse Doct., Univ. Nancy ; 279 p.

**ANRH., 2009** - Surveillance de la qualité des eaux. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Algérie, 26p.

**Bekkoussa B., Jourde H., Batiot-Guilhe C., Meddi M., Khaldi A., Azzaz H., 2013** - Origine de la salinité et des principaux éléments majeurs des eaux de la nappe phréatique de la plaine de Ghriss, Nord-Ouest algérien. *Hydrological Sciences Journal* ; 58 (5) : 1111-1127.

**Bliefert C., Bernaud R., 2001** - Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets, Boeck ; 463p.

**Belin S., 1992** - Distribution microscopique de la matière organique disséminée dans les roches mères : technique d'étude, interprétation des conditions de dépôt et de diagenèse. Thèse doc., Univ. d'Orsay ; 371 p.

**Benoit C., 2005** - Biogéochimie et enregistrement des composés organostanniques dans les sédiments du bassin d'Arcachon. Thèse doc., Univ. Bordeaux I ; 224 p.

**Bernaud G., Fustec E., 2007** - Conserver les zones humides, Educagri ; 291p.

**Bonneau M., Souchier B., 1994** - Constitutions et propriétés du sol, Masson ; 654p.

**Bordet J., 2007** - L'eau dans son environnement rural, Copyright, Paris ; 308p.

**Boudin F., Tribovillard N., Trichet J., 2007** - Géologie de la matière organique, Vuibert, Paris; 261p.

**Bouziyani M., 2000** - L'eau de la pénurie aux maladies, Ibn Khaldoun ; 243p.

**Burgin A.J., Hamilton S.K., 2007** - Have we overemphasized the role of denitrification in aquatic ecosystems? A review of nitrate removal pathways. *Frontiers in Ecology and the Environment*; 5: 89-96.

**Casado M.M.G., Malano Leno L., Grandjean D., De Alencastro L.F., 2016** - Impact des sédiments sur la qualité de l'eau. *Aqua & Gaz* ; 4 : 56-63.

**Chapelle A., Mesnage V., Mazouni N., Deslous Paoli J.M., Picot B., 1994** - Modélisation des cycles de l'azote et du phosphore dans les sédiments d'une lagune soumise à une exploitation conchylicole. *Océanol Acta*; 17: 609-620.

**Chapman D., Kimstach V., 1996** - Selection of water quality variables, water quality assessments, a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, E et FN; 126p.

**Cornwell J.C., Kemp W.M., Kana T.M., 1999** - Denitrification in coastal ecosystems: methods, environmental controls, and ecosystem level controls, a review. *Aquatic Ecology*; 33:41-54.

**CPCS., 1967** - Classification française des sols. Commission de Pédologie et Cartographie des Sols, INRA, Paris ; 87p.

**Curie F., 2006** - Rétention de nitrates dans les zones humides riveraines : rôle des facteurs hydrologiques, géomorphologiques et biogéochimiques. Thèse Doct., Univ. Paris 4 ; 227 p.

**Dalgaard T., Bienkowski J.F., Bleeker A., Dragosits U., Drouet J.L., Durand P., 2012** - Farm nitrogen balances in six European landscapes as an indicator for nitrogen losses and basis for improved management. *Biogeosciences*; 9: 5303-5321.

**Dajoz R., 2008** - La biodiversité : l'avenir de la planète et de l'homme, Ellipses; 269p.

**Dassonville F., Renault P., 2002** - Interactions between microbial processes and geochemical transformations under anaerobic conditions: a review. *Agronomie*; 22: 51-68.

**Debièche T.H., 2002** - Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est Algérien. Thèse Doct., Univ. Franche-Comté Constantine ; 193p.

**Degrémont SA., 2005** - Mémento technique de l'eau. 2<sup>ème</sup> édition, Copyright; 1717p.

**Delhaize E., Ryan P.R., 1995** - Aluminum toxicity and tolerance in plants. *Plant Physiol* ; 107 : 315-321.

**DGF., 2003** - Fiche descriptive sur les zones humides Ramsar, lac Fetzara, wilaya d'Annaba. Direction Général des forêts, Algérie, 6p.

**Diab W., 2016** - Étude des propriétés physico-chimiques et colloïdales du bassin de la rivière Litani, Liban. Thèse Doc., Univ. Libanaise et de Lorraine (Cotutelle), 214p.

**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). *Rev. Sci. Technol. Synthèse*; 23; 92p.

**Djamai Z., 2018** - Etude écologique et paléoécologique en milieu salé. Cas du lac Fetzara (Nord-Est algérien). Thèse Doc., Univ. Badji Mokhtar Annaba, 124p.

**Doré M., 1989** - Chimie des oxydants et traitement des eaux, Technique et documentation ; 494p.

**Drouart E., Vouillamoz J., 1999** - Alimentation en eau des populations menacées. Harmann ; 565p.

**Durand J.H., 1950** - Première résultats de l'étude des sols du lac Fetzara. Doc. Inédit; SE Alger; 112 P+ carte.

**El Morhit M., Fekhaoui M., Serghini A., El Blidi S., El Abidi A., Yahyaoui A., Hachimi M., 2012** - Étude de l'évolution spatio-temporelle des paramètres hydrologiques caractérisant la qualité des eaux de l'estuaire du Loukkos (Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique* ; 34 (2) : 151-162.

**Faurie C., Ferra C., Médorin P., Dévaux J., 1998** - Écologie : Approche scientifique et pratique, Technique et pratique, Paris ; 333p.

**Fekrache F., 2015** - Contribution à l'étude de l'origine de la salinité des eaux du lac Fetzara. Thèse Doc., Univ. Badji Mokhtar Annaba, 151p.

**Feuillet Girard M., Héral M., Sornin J.M., Deslous-Paoli J.M., Robert J.M., 1988** - Eléments azotés de la colonne d'eau et de l'interface eau-sédiment du bassin de Marennes-Oléron, influence des cultures d'huitres. *Aqua. Living. Resour* ; 1 : 251-265.

**Flück R., Campiche S., De Alencastro L.F., Rossi L., 2012** - Surveillance de la qualité des sédiments. *Aqua et Gas*; 4 : 19-22.

**Foufou A., 2018** - Diagnostic et modélisation de la pollution des eaux par les métaux lourds au niveau de la décharge de Berka Zerga (Annaba). Thèse Doct., Univ. Badji Mokhtar Annaba, 195p.

**Fustec E., Lefeuvre C., 2000** - Fonctions et valeurs des zones humides, Dunod ; 423p.

**Gaudnik C., 2011** - Impacts des dépôts d'azote atmosphérique sur la végétation des prairies acides du domaine atlantique français. Thèse Doct., Univ. Bordeaux 1 ; 245p.

**Gaujous D., 1995** - La pollution des milieux aquatiques aide - mémoire, Technique et documentation ; 219 p.

**Genermont S., Cellier P., 2016** - La place de l'agriculture au sein des grands cycles biogéochimiques : azote, particules, ozone. *Agriculture*; Numéro spécial : 117-129.

**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), Gabinet Hispano d'Igéniera; 115 p.

**Giles J., 2005** - Nitrogen study fertilizes fears of pollution. *Nature Publishing Group*; 433(7028): 791.

**Gilli E., Mangan C., Madry J., 2004** - Hydrogéologie, objets, méthodes, Applications, Paris ; 301p.

**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. Acte Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime, Tanger, Maroc, 331-334.

**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. Badji Mokhtar Annaba; 168 p.

**Hallaire M., 1958** - Soil water movement in the film and vapor phase under the influence of evapotranspiration. *HRB Special Report*; 40: 88-105.

**Hebert S., Legare S., 2000** - Suivi de la qualité de l'eau des rivières et petits cours d'eau, Québec, Envirodoq ; 48p.

**Joleaud L., 1936** - Etude géologique de la région de Bône et de La Calle. Bull. Serv. Carte Géol. Algérie ; Imp. Typo-litho et Cie, Alger ; 2(12) : 185p. +4 pl.

**JORA., 2011** - Conventions et accords internationaux, lois et décrets arrêtes, décisions, avis, communications et annonces. *Journal officiel de la république algérienne* ; 34 : 1-23.

**Kappler A., Schink B., Brune A., 2001** - Dynamics in composition and size-class distribution of humic substances in profundal sediments of Lake Constance. *Organic Geochemistry*; 32: 3-10.

**Khelfaoui H., Chaffai H., Hani A., Laouar R., 2012** - Impacts des rejets industriels sur les eaux de la région de Berrahal (Nord Est Algérien). *Rev. Sci.Technol. Synthèse*; 25:71-81.

**Kirchman D.L., Sherr E., Sherr B., Fuhrman J.A., Hagström A., Moran M.A., 2008** - Microbial Ecology of the Ocean, John Wiley & Sons, Etats-Unis; 616p.

**Koller E., 2004** - Traitement des pollutions industrielles, eau, air, déchets, boues, Dunod, Paris ; 628p.

**Kotchi R., Soro G., Soro D.T., Fousso R.M., Onitie O.Z, Ahoussi E.K., Soro N., 2016** - Variation saisonnière de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des aquifères d'Altérites du département d'Agboville (Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal* ; 12 : 213-240.

**Lacoze J.C., 1996** - L'eutrophisation des eaux marines et continentales, Ellipses ; 181p.

**Lagarde J., 1995** - Initiation à l'analyse des données, Dunod, Paris ; 157p.

**Le Gouche C., 2017** - Sédimentation de la matière organique dans les bassins profonds : cas du Bassin Arctique à l'Eocène. Thèse Doct., Univ. Rennes ; 286p.

**Lerat Y., Boucher G.F., Le Corre P., 1985** - Echanges à l'interface eau-sédiment dans un secteur côtière à forte biodéposition (parc Ostréicole), cas de l'ammonium et des nitrates, Cahiers de Biologie Marine, Tom XXVI, 393-408.

**Makhoukh M., Sbaa M., Berrahou A., Van-Clooster M., 2011** - Contribution a l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued Moulouya (Maroc oriental). *Larhyss journal* ; 09 :149-169.

**Marre A., 1992** - Le Tell oriental Algérien de Collo à la frontière Tunisienne, étude géomorphologique, volume 1 et 2 O.P.U. Alger, Algérie.

**Martine G., 1979** - Le problème de l'azote dans les eaux, Technique et Documentation ; 261p.

**Mathieu C., Pieltain F., 2003** - Analyse chimique des sols. Tec & Doc Lavoisier; 388p.

**Maxi F., Laurent E., Marc D.R., Ariane P., 2007**- Géologie, Dunod, Paris ; 223p.

**Merceron M., 1999** - Pollution diffuses : du bassin versant du littoral, Ifremer ; 311p.

**Merghem K.A., Elhalouani H., Alnedhary A.A., Dssouli K., Gharibi E., Alansi R.Q., Michalet A., 1998** - Le phosphate dans le compartiment sédimentaire fluvial. Influence d'une station d'épuration. Thèse de Doct., Univ. Lille ; 221p.

**Metahri M.S., 2012** - Elimination simultanée de la pollution azotée et phosphatée des eaux usées traitées par des procédés mixtes. Cas de la STEP Est de la ville de Tizi-Ouzou. Thèse Doct., Univ. Mouloud Mammeri; 172 p.

**Montuelle B., 2003** - Qualité et gestion des sédiments d'eau douce, Eléments physico-chimiques et biologiques, Cemagref ; 291p.

**Monyr N., Abdallaoui A., El-Hmaidi A., Berrada M., 2016** - Etude de la variation saisonnière des paramètres physicochimiques des sédiments superficiels de la retenue du barrage Sidi Chahed (Meknès, Maroc): approche par carte auto-organisatrice SOM, *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering* ; 3 : 118-129.

**Ochoa S., 2008** - Etude conjuguée géochimique/hydrologique des relations nappe-rivière dans une zone humide: cas de la zone humide alluviale de Monbéqui, France. Thèse Doct., Univ. Toulouse 3 ; 243p.

**O.M.S., 2000** - Directives de qualité pour les eaux de boisson, Organisation Mondiale de la Santé; 1025p.

**Ouertani N., Hamouda R., Belayouni H., 2006** - Etude de la matière organique dans les sédiments superficiels d'un système aquatique confiné anoxique évoluant en milieu urbain : cas du Lac sud de Tunis. *Geo. Eco. Trop* ; 30 (2) : 21-34.

**Ouhmidou M., Chahlaoui A., Kharroubi A., Chahboune M., 2015**- Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux du barrage Hassan Addakhil d'Errachidia, Maroc. *J. Mater. Environ.Sci* ; 6(6) : 1663-1677.

**Pambrun V., 2005** - Analyse et modélisation de la nitrification partielle et de la précipitation concomitante du phosphore dans un réacteur à alimentation séquencée. Thèse Doct., Univ. Toulouse ; 287p.

**Pourriot R., Meybeck M., 1995** - Limnologie générale, Masson, Paris ; 947p.

**Ramade F., 2005** - Eléments d'écologie : écologie appliquée, 6<sup>ème</sup> édition, Dunod, Paris ; 862p.

**Raven P.H., Berg L. R., 2009** - Environnement, Boeck, 680p.

**Rebah M., 2005** - Les risques écologiques en Algérie, APIC, 219p.

**Reddy K.R., Patrick W.H., 1984** - Nitrogen transformations and loss in flooded soils and sediments. *CRC Crit Rev Environ Control*; 13: 273-309.

**Rejsek F., 2002** - Analyse des eaux: aspect réglementaires et techniques, CRDPA Aquitaine ; 361p.

**Rhazi L., Rhazi M., Grillas P., El Khyari D., 2006** - Richness and structure of plant communities in temporary pools from western morocco: influence of human activities. *Hydrobiologia*; 570: 197-203.

**Rodier J., 1978** - L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer, Dunod ; 1526p.

**Rodier J., Legube B., Merlet N., 2009** - L'Analyse de l'eau, 9e édition, Dunod, Paris; 1526 p.

**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.

**Roussel O., Bourmeau E., Walter C., 2000** - Evaluation du déficit en matière organique des sols français et des besoins potentiels en amendements organiques. *Etude et Gestion Des sols* ; 8(1) : 65-81.

**Rouyrre C., 2003** - Guide de l'eau, Seuil ; 147p.

**Sarah A., 2014** - Spéciation du Phosphore dans des Sédiments Aquatiques. Thèse Doct., Univ. Constantine ; 154p.

**Savary P., 2010** - Guide des analyses de la qualité de l'eau, Groupe Territorial ; 161p.

**Sigg L., Behra P., Stumm W., 2006** - Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement, Dunod ; 549p.

**Smith, M. S., 1982** - Dissimilatory reduction of  $\text{NO}_2^-$  to  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{N}_2\text{O}$  by a soil *Citrobacter* sp. *Applied and environmental. Microbiology*; 43(4): 854-860.

**Sutton M.A., Bleeker A., Howard C.M., Bekunda M., Grizzetti B., 2013** - Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, 114p.

**Thorntwaite C.W., Mather J., 1957** - Instruction and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. *Philadelphia Publications in Climatology*; 10(3): 185-311.

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

**Vila J.M., 1980** - La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro - Tunisiens. Thèse Doct. Univ. Pierre et Marie- Curie Paris VI, France, 268 p.

**Vilaginès R., 2000** - Eaux, environnement et santé publique, Technique et documentation ; 171p.

**Villeneuve V., Légaré S., Painchaud J., Vincent W., 2006** - Dynamique et modélisation de l'oxygène dissous en rivière. *Revue des sciences de l'eau* ; 19 (4) : 259-274.

**Yao Koffi M., Soro M., Trokourey A., Bokra Yobou., 2012** - Caractérisation physico-chimique des sédiments de la zone urbaine d'une lagune tropicale (lagune Ebrié, Côte d'Ivoire). *Bulletin d'Informations de la Société Ouest Africaine de Chimie* ; 06 : 71-82.

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

**Zahi F., 2014** - Contribution a l'étude hydrochimique du sous bassin versant du lac Fetzara (nord-est Algérien), approche géochimique et fonctionnement des sols et des eaux. Thèse Doct., Univ. Badji Mokhtar Annaba ; 193p.

**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. Badji Mokhtar Annaba; 151 p.

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